

2 LANDASAN TEORI

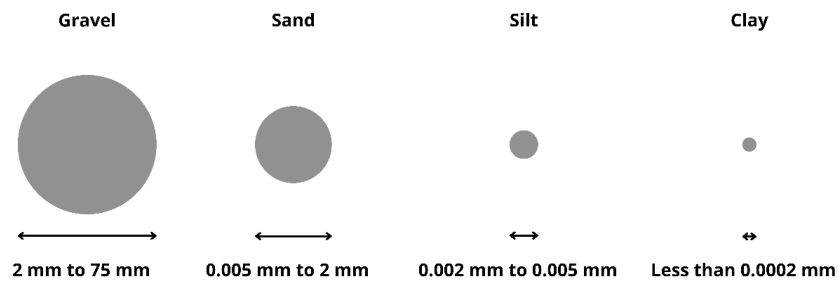
2.1 Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang disusun dari agregat atau butiran mineral padat yang tidak tersedimentasi satu sama lain dan dari bahan organik yang telah melapuk dengan berbagai ukuran yang juga diisi oleh zat cair ataupun gas dalam mengisi rongga antar partikel padat (Das, 1995). Tanah ini menjadi elemen penting dalam setiap pekerjaan teknik sipil dikarenakan tanah yang berfungsi sebagai pendukung atau penopang beban dari bangunan di atasnya.

Tanah dapat diartikan sebagai kumpulan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang cenderung lepas (*loose*) dan terletak di atas batuan dasar (*bedrock*) (Hardiyatmo, 2017). Pembentukan tanah terjadi melalui proses fisik maupun kimia. Proses fisik mengubah batuan induk menjadi partikel-partikel kecil dengan pengaruh erosi, angin, air, manusia, dan perubahan suhu atau cuaca. Sedangkan, proses pelapukan secara kimia dipengaruhi oleh oksigen, karbon dioksida, air yang mengandung asam atau alkali, dan proses kimia lainnya.

Berdasarkan ukuran partikelnya tanah terdiri dari kerikil, pasir, lanau, dan lempung dapat dilihat pada Gambar 2.1. Partikel tanah dapat dibedakan sesuai dengan ukurannya, adapun perbedaan ukurannya adalah sebagai berikut:

1. Berangkal (*boulders*) yaitu potongan batuan yang besar, dengan ukuran yang lebih besar dari 250 mm hingga 300 mm atau 150 mm sampai 250 mm. Fragmen batuan ini dikenal dengan sebutan kerakal (*cobbles/pebbles*).
2. Kerikil (*gravel*) yaitu partikel batuan yang memiliki ukuran dari 5 mm hingga 150 mm.
3. Pasir (*sand*) yaitu partikel batuan berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, yang berkisar dari kasar ukuran 3 - 5 mm dan bahan halus berukuran kurang dari 1 mm.
4. Lanau (*silt*) yaitu partikel batuan berukuran dari 0,002 - 0,074 mm.
5. Lempung (*clay*) yaitu partikel mineral dengan ukuran lebih kecil dari 0,002 mm yang menjadi sumber utama dari kohesi pada tanah kohesif.
6. Koloid (*colloids*) yaitu partikel mineral yang diam dan berukuran lebih kecil dari 0,001 mm (Bowles, 1986).



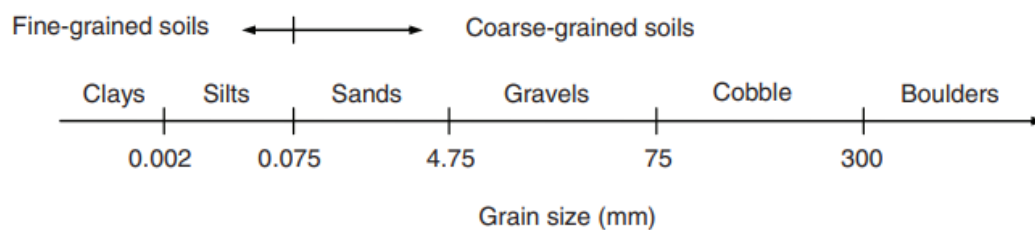
Gambar 2.1 Ukuran Partikel Tanah

2.1.1 Klasifikasi Tanah

Umumnya tanah diklasifikasikan menggunakan dua sistem yaitu sistem USCS (*Unified Soil Classification System*) dan sistem AASHTO (*American of State Highway and Transportation Officials*). Kedua sistem klasifikasi tersebut dibedakan berdasarkan metode pengelompokannya. Sistem USCS digunakan untuk mengelompokkan tanah secara universal. Sedangkan. Sistem AASHTO digunakan untuk mengelompokkan tanah subgrade.

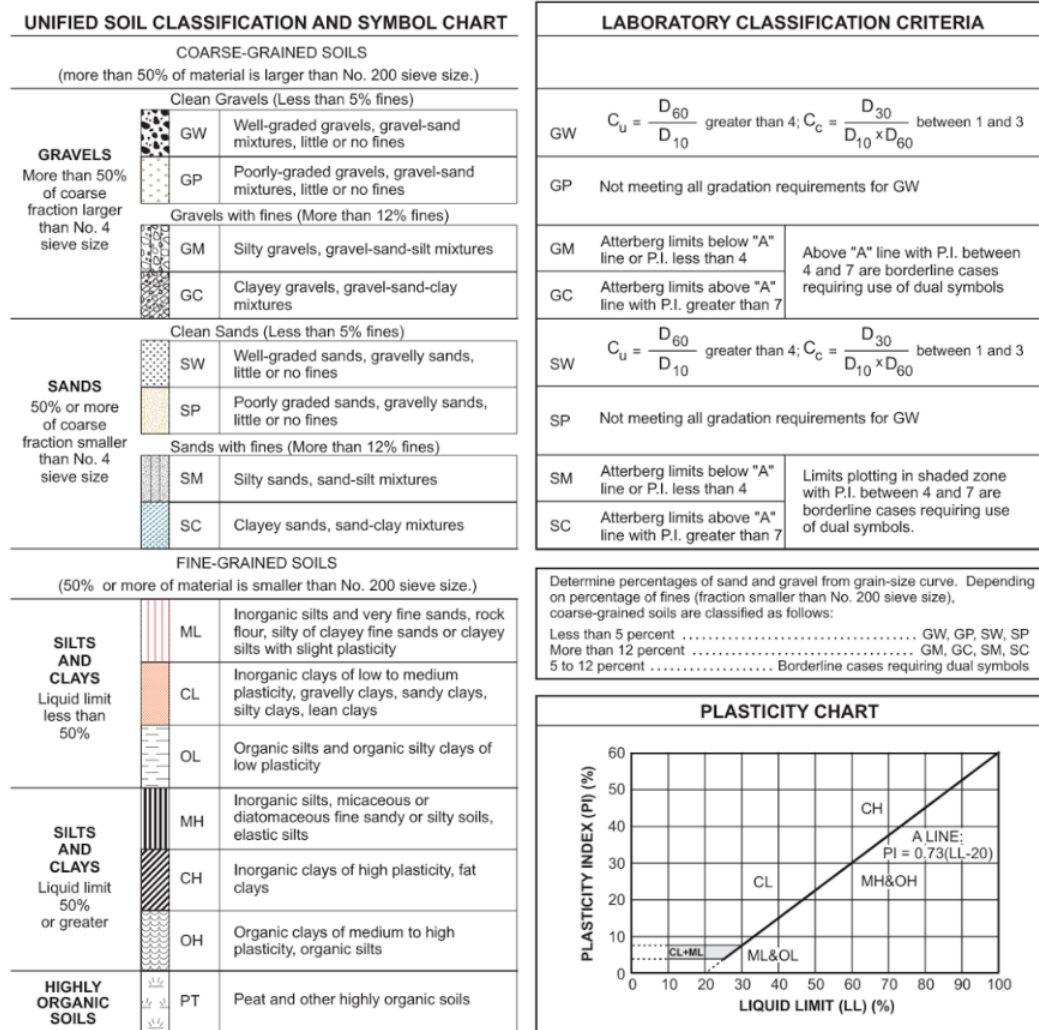
1. Sistem USCS

Pengelompokan dengan sistem USCS secara garis besar dibedakan berdasarkan ukuran partikel tanah yang dibagi menjadi kerikil (G), pasir (S), lanau (M), dan lempung (C) (Das, 2011). Selain pengelompokan tersebut, lempung organik (O) dan gambut (PT) juga termasuk pengelompokan yang ditawarkan oleh sistem USCS. Pengelompokan sistem USCS dikenalkan pertama kali oleh Cassagrande (1948). Pengelompokan tanah berdasarkan ukuran butir dapat dilihat pada Gambar 2.2. Adapun sistem klasifikasi tanah USCS dapat dilihat lebih rinci pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Pengelompokan Sistem USCS berdasarkan Ukuran Butir

Sumber: Das, 2011



Gambar 2.3 Sistem Klasifikasi USCS

Sumber: PUPR, 2019

2. Sistem AASHTO

Klasifikasi tanah sistem AASHTO dikembangkan di tahun 1929 untuk *Public Road Administration Classification System*. Sistem AASHTO mengklasifikasikan tanah menjadi tujuh bagian dimana dengan rentang A-1 sampai A-7. Dimana kategori A-1, A-2, dan A-3 merupakan tanah yang lolos saringan No. 200 yang kurang dari 35%. Sedangkan, tanah yang lolos saringan No. 200 lebih dari 35% adalah kategori A-4, A-5, A-6, dan A-7. Adapun sistem klasifikasi sistem AASHTO dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

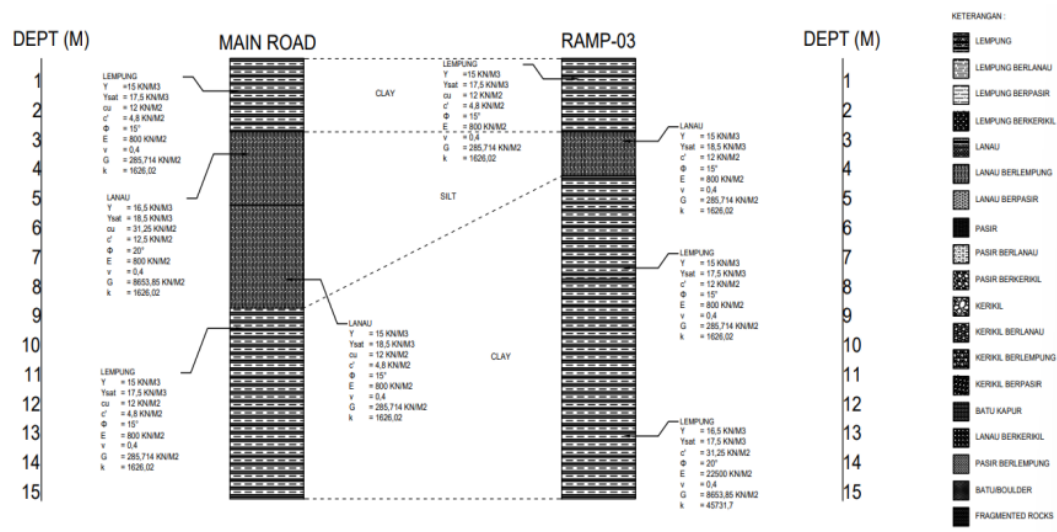
General Classification	Granular Materials (35% or less passing 0,075 mm sieve)						
Group Classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis, % passing:							
2 mm	50 max	-	-	-	-	-	-
0,425 mm	30 max	50 max	51 max	-	-	-	-
0,075 mm	10 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
Fraction passing 0,425 mm:							
Liquid limit	-		Non - Plastic	40 max	41 max	40 max	41 max
Plasticity Index	6 max			10 max	10 max	11 max	11 max
Usual types of significant constituents	Stone fragments, gravel, sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General rating as a subgrade	Excellent to good						
General Classification	Silt-Clay Materials (> 35% passing 0,075 mm sieve)						
Group Classification				A-4	A-5	A-6	A-7
							A-7-5 A-7-6
Sieve analysis, % passing:							
2 mm				-	-	-	-
0,425 mm				-	-	-	-
0,075 mm				36 min	36 min	36 min	36 min
Fraction passing 0,425 mm:							
Liquid limit				40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity Index				10 max	10 max	11 min	11 min*
Usual types of significant constituents				Silty soils		Clayey soils	
General rating as a subgrade				Fair to poor			
*Plasticity index for A-7-5 subgroup is equal to or less than liquid limit – 30.							
*Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than liquid limit – 30.							

(Sumber: Bentley & Carter, 2016)

2.1.2 Stratifikasi Tanah

Dalam tahap desain susunan lapisan tanah atau stratifikasi tanah menjadi data penting dalam pekerjaan konstruksi. Stratifikasi tanah ini memberikan pengaruh yang signifikan dalam tahap perencanaan. Stratifikasi tanah merupakan susunan lapisan tanah yang terdiri dari jumlah lapisan dan ketebalan setiap lapisan di bawah permukaan yang dibagi berdasarkan kesamaan jenis dan konsistensi tanahnya (Bakrie Infrastructure Geo Tech, 2022). Penyusunan stratifikasi tanah didasarkan pada data hasil penyelidikan tanah yang dilengkapi dengan data hasil uji laboratorium.

Secara alami stratifikasi tanah dapat berubah sangat berbeda dalam jarak vertikal dan horizontalnya. Stratifikasi tanah dalam rentang kecil dapat menghasilkan data yang ideal. Penyusunan stratifikasi tanah yang ideal terkendala dalam keterbatasan jumlah titik penyelidikan tanah baik berupa pengujian lapangan ataupun pengujian di laboratorium, dari keterbatasan tersebut maka stratifikasi yang dihasilkan memiliki rentang yang besar. Berikut merupakan ilustrasi stratifikasi tanah dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Ilustrasi Stratifikasi Tanah

Sumber: Bakrie Infrastructure Geo Tech, 2022

2.1.3 Parameter Tanah

Parameter tanah digunakan untuk mengidentifikasi berbagai indeks yang dimiliki oleh tanah. Parameter tanah dimanfaatkan untuk membantu dalam perhitungan analisis yang membutuhkan data tanah baik berupa data fisik tanah maupun data kimia tanah.

1. Berat isi tanah

Berat volume tanah atau berat isi tanah menjadi salah satu parameter fisik tanah yang penting untuk diketahui. Nilai tipikal dari berat volume tanah ini dapat digunakan untuk memperkirakan tekanan *overburden* pada kedalaman yang berbeda. Nilai tipikal untuk berat isi tanah dapat diketahui dari Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai Tipikal Berat Isi Tanah

		Bulk Unit Weight (kN/m³)		Saturated Unit Weight (kN/m³)	
		Loose	Dense	Loose	Dense
<i>Granular Soils</i>	<i>Gravel</i>	16,0	18,0	20,0	21,0
	<i>Well graded sand and Gravel</i>	19,0	21,0	21,5	23,0
	<i>Coarse or medium sand</i>	16,5	18,5	20,0	21,5
	<i>Well graded sand and gravel</i>	18,0	21,0	20,5	22,5
	<i>Fine or silty sand</i>	17,0	19,0	20,0	21,5
	<i>Rock fill</i>	15,0	17,5	19,5	21,0
	<i>Brick Hardcore</i>	13,0	17,5	16,5	19,0
	<i>Slag fill</i>	12,0	15,0	18,0	20,0
	<i>Ash fill</i>	6,5	10,0	13,0	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	

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

2. Angka pori tanah

Angka pori atau *void ratio* (e_0) pada tanah adalah rasio antara ruang yang tidak ditempati oleh partikel padat (*volume void*) dengan volume partikel padat dalam suatu massa tanah. Penentuan angka pori dapat dilakukan dengan membandingkan jenis tanah guna mendapatkan nilai parameter angka pori pada tanah. Adapun nilai tipikal untuk angka pori, *moisture content* pada kondisi tersaturasi dan berat isi kering tanah dapat diketahui dari Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai Tipikal Angka Pori Tanah

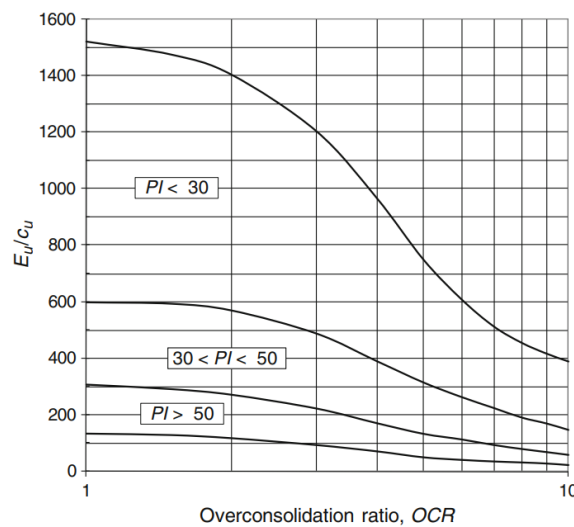
Type of Soil	Void Ratio	Natural Moisture Content in a Saturated State (%)	Dry Unit Weight, γ_d (kN/m³)
<i>Loose uniform sand</i>	0,8	30	14,5
<i>Dense uniform sand</i>	0,45	16	18

<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 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

(Sumber: Das & Sobhan, 2014)

3. Modulus elastisitas

Nilai modulus elastisitas tanah atau E_u digunakan untuk menentukan nilai kekakuan pada tanah. Modulus kekakuan tidak terdrainase pada tanah lempung diestimasi menggunakan pendekatan nilai rasio modulus E_u/c_u dengan nilai *overconsolidation ratio* (OCR) yang dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubungan E_u/c_u -PI-OCR untuk Lempung

Sumber: Ameratunga et al., 2016

4. Angka poisson's

Angka *poisson's* atau *poisson's ratio* digunakan untuk rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Nilai dari *poisson's ratio* dapat ditentukan

berdasarkan pada jenis material. Adapun beberapa nilai tipikal untuk angka *poisson's* dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Tipikal Angka *Poisson's*

Material	<i>Poisson's Ratio</i>
Lempung jenuh (<i>undrained</i>)	0,5
Lempung jenuh (<i>drained</i>)	0,2 – 0,4
Pasir rapat	0,3 – 0,4
Pasir lepas	0,1 – 0,3
Loess	0,1 – 0,3
Es	0,36
Alumunium	0,35
Baja	0,29
Beton	0,15

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

5. Kohesi dan sudut geser tanah

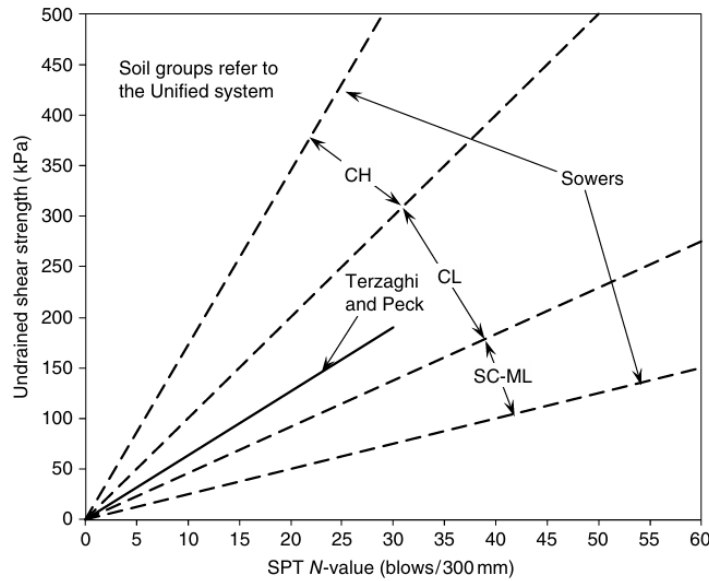
Penentuan nilai kohesi tanah dapat dilakukan dari korelasi antara nilai N-SPT dengan nilai kohesi tanah. Semakin kecil nilai N-SPT pada tanah maka nilai kohesi juga semakin kecil. Adapun pendekatan nilai kohesi tanah untuk tanah kohesif dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Variasi Korelasi N-SPT dengan C_u Tanah Kohesif

<i>Consistency</i>	N-SPT	C_u (kN/m³)
<i>Very soft</i>	0 – 2	< 12
<i>Soft</i>	1 – 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

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

Nilai kohesi pada tanah lempung juga dapat dihitung dengan pendekatan persamaan (2.1). Selain dengan persamaan, nilai kohesi tanah dapat ditentukan berdasarkan hubungan nilai N-SPT lapangan dengan menggunakan grafik seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Korelasi antara C_u dan N-SPT berdasarkan Terzaghi (1967) dan Sowers (1979)

Sumber: Bentley & Carter, 2016

$$c_u (\text{kN/m}^2) \approx \text{KN} \quad (2.1)$$

Dimana, $K \approx 6$ dan $N \approx N_{60}$ (Ameratunga *et al.*, 2016).

Nilai sudut geser pada tanah hanya dimiliki oleh tanah jenis non-kohesif atau tanah granular. Nilai sudut geser dalam tanah dapat diketahui melalui korelasi nilai tipikal pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Korelasi q_c dan D_r dengan Sudut Geser dalam Tanah

<i>State of Packing</i>	<i>Relative Density</i>	<i>N-SPT</i>	<i>q_c, in MPa</i>	<i>Approximate Triaxial Friction Angle (degree)</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

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

6. Kohesi efektif dan sudut geser tanah efektif

Tanah lempung yang terkonsolidasi normal, nilai sudut geser efektif dapat bernilai $< 20^\circ$ hingga lebih kecil dari 30° . Sedangkan, nilai tipikal sudut geser

efektif untuk lempung keras di interval $25^\circ - 30^\circ$, atau bisa lebih tinggi. Adapun nilai tipikal untuk kohesi dan sudut geser efektif tanah dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Nilai Tipikal Kohesi dan Sudut Geser Tabah Efektif

Soil Group	Typical Soils in Group	Soil Parameters	
		c' (kPa)	ϕ' (degree)
<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

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

7. Indeks kompresi

Indeks kompresi atau *compression index* atau C_c , merupakan parameter yang berfungsi untuk mengukur seberapa kaku tanah lempung pada saat kondisi konsolidasi biasa, dan menjadi parameter penting dalam proses konsolidasi akhir. Indeks kompresi dikaitkan juga dengan nilai *water content*, angka pori, batas cair, atau nilai indeks plastisitas. Klasifikasi tanah lempung berdasarkan nilai kompresinya menurut Kulhawy dan Mayne (1990) dapat dilihat pada Tabel 2.8. Adapun nilai indeks kompresi tanah dapat ditentukan menggunakan nilai korelasi jenis tanah, dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.8 Klasifikasi Kompresibilitas berdasarkan Nilai Indeks Kompresi

Compressibility	C_c
<i>Slight or low</i>	< 0,2
<i>Moderate of intermediate</i>	0,2 – 0,4
<i>High</i>	> 0,2

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

Tabel 2.9 Nilai Tipikal 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>	<i><0,05</i>	<i>0,025</i>
<i>Stiff glacial till (boulder clay), marls, very stiff tropical residual clays</i>	<i>Low compressibility</i>	<i>0,05 – 0,1</i>	<i>0,025 – 0,05</i>
<i>Firm clays, glacial outwash clays, consolidated lake deposits, weathered marls, firm glacial till, normally consolidated clays at depth, firm tropical residual clays</i>	<i>Medium compressibility</i>	<i>0,1 – 0,3</i>	<i>0,05 – 0,15</i>
<i>Poorly consolidated alluvial clays such as estuarine deposits, and sensitive clays</i>	<i>High compressibility</i>	<i>0,3 – 1,5</i>	<i>0,15 – 0,75</i>
<i>Highly organic alluvial clays and peats</i>	<i>Very high compressibility</i>	<i>>1,5</i>	<i>0,75 – 5+</i>
<i>^aRelated to the coefficient of volume compressibility m_v. ^bBased on an initial voids of 0,5 and initial and final pressures of 100 kPa and 200 kPa, respectively.</i>			

(Sumber: Bentley & Carter, 2016)

8. Indeks pemuaiian

Indeks pemuaiian atau *swelling index* atau C_s , bernilai lebih kecil daripada indeks kompresi dan biasanya dapat ditentukan di laboratorium. Adapun pendekatan nilai indeks pemuaiian yaitu sebesar 1/5 sampai 1/10 dari indeks kompresi seperti pada persamaan (2.2) (Ameratunga *et al.*, 2016).

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c \quad (2.2)$$

9. Indeks pemampatan kembali

Indeks pemampatan kembali atau *rebound index* merupakan kemiringan dari kurva pelepasan beban dan pembebanan kembali pada grafik e -log σ' . Nilai indeks pemampatan kembali sama dengan nilai indeks pemuaian.

10. Koefisien konsolidasi tanah arah vertikal

Koefisien konsolidasi tanah arah vertikal atau C_v digunakan untuk menghitung kecepatan penurunan konsolidasi pada tanah. Kecepatan penurunan perlu diperhitungkan jika penurunan konsolidasi yang terjadi pada suatu struktur diperkirakan besar. Saat penurunan kecil, maka kecepatan penurunan bisa diabaikan, karena penurunan yang terjadi sejalan dengan waktunya tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan. Penentuan koefisien konsolidasi dapat ditentukan dengan metode kecocokan log-waktu atau dengan metode akar waktu. Nilai C_v dapat dihitung menggunakan persamaan (2.3).

$$C_v = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{t} \quad (2.3)$$

Dimana:

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (cm²/detik)

T_v = faktor waktu yang dipengaruhi oleh derajat konsolidasi

H_{dr} = panjang aliran yang ditempuh air selama proses konsolidasi (cm)

t = lama waktu konsolidasi (detik)

Selain menggunakan metode kecocokan log-waktu atau akar-waktu dan persamaan koefisien konsolidasi arah vertikal dapat ditentukan berdasarkan nilai tipikal pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Nilai Tipikal Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal

Soil Type (Unified Classification)	C_v	
	cm²/s	m²/a
<i>Low plasticity clay (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 – 0,0005	0,3 – 0,5
<i>Organic silt (OL)</i>	0,0002 – 0,0001	0,6 – 3,0

(Sumber: Bentley & Carter, 2016)

11. Koefisien konsolidasi tanah arah horizontal

Material tanah jenis lempung dengan tipe seragam memiliki nilai koefisien konsolidasi arah horizontal atau C_h . Adapun besar nilai koefisien konsolidasi arah horizontal dapat dihitung dengan persamaan (2.4).

$$C_h = (1 \text{ to } 2) \times C_v \quad (2.4)$$

Dimana, C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal (cm^2/detik).

12. Permeabilitas tanah

Nilai permeabilitas tanah atau k , merupakan nilai kemampuan tanah meloloskan air baik arah vertikal maupun horizontal. Nilai permeabilitas tanah memiliki hubungan dengan nilai koefisien konsolidasi yang ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2.5)$$

Dimana, C_v koefisien konsolidasi, m_v adalah koefisien volume kompresi, dan γ_w merupakan berat jenis air ($= 9,81 \text{ kN/m}^3$).

Nilai permeabilitas tanah juga dapat ditentukan dengan korelasi nilai tipikal. Semakin granular jenis tanah maka nilai permeabilitas yang dimiliki oleh tanah juga semakin besar. Adapun untuk tanah kohesif semakin lunak jenis tanahnya maka nilai permeabilitas semakin besar. Berikut merupakan nilai tipikal permeabilitas tanah dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Nilai Tipikal Permeabilitas Tanah

Soil Behaviour Type	Soil Permeability (m/s)
<i>Sensitive fine grained</i>	3×10^{-9} to 3×10^{-8}
<i>Organic solis-peats</i>	1×10^{-8} to 1×10^{-6}
<i>Clays-clay to silty clay</i>	1×10^{-10} to 1×10^{-7}
<i>Silt mixtures clayey silt to silty clay</i>	3×10^{-9} to 1×10^{-7}
<i>Sand mixtures; silty sand to sandy silt</i>	1×10^{-7} to 1×10^{-5}
<i>Sands; clear sands to silty sands</i>	1×10^{-5} to 1×10^{-3}
<i>Gravelly sand to sand</i>	1×10^{-3} to 1
^a <i>Very stiff sand to clayey sand</i>	1×10^{-8} to 1×10^{-6}
^a <i>Very stiff fine grained</i>	1×10^{-9} to 1×10^{-7}

^a*Over consolidated or cemented*

(Sumber: Ameratunga *et al.*, 2016)

2.2 Metode Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan untuk menentukan perlapisan tanah dan karakteristik teknis tanah sebagai informasi untuk tahap perencanaan suatu pekerjaan konstruksi (Rahardjo, 1997). Penyelidikan tanah dapat memberikan informasi kondisi tanah yang mendekati keadaan sebenarnya di lapangan guna mengurangi risiko akibat karakteristik tanah yang bervariasi dalam suatu lokasi. Penyelidikan tanah dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Mendapatkan informasi pelapisan tanah dan batuan. Berdasarkan stratifikasi tanah dapat diketahui lapisan tanah keras, ketebalan tanah yang kompresibel dan variasi kondisi tanah.
2. Mendapatkan informasi lokasi muka air tanah.
3. Mendapatkan informasi sifat fisis dan mekanis tanah atau batuan.
4. Menentukan parameter tanah untuk analisis.

Lokasi dan kedalaman titik penyelidikan tanah harus berdasarkan kondisi geologi yang telah dilakukan pada tahapan studi kondisi lapangan. Begitu pun dengan kedalaman penyelidikan tanah harus meliputi semua lapisan yang mempengaruhi pekerjaan atau terpengaruhi oleh konstruksi. Kedalaman penyelidikan juga harus ditentukan berdasarkan kondisi hidrogeologi. Adapun ketentuan jumlah minimum titik penyelidikan tanah dapat ditentukan dengan keterangan pada Tabel 2.12. Sedangkan, penentuan metode penyelidikan tanah dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Tabel 2.12 Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah

Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
Gedung tinggi 8 lantai ke atas	- Satu titik setiap 300 m² dalam pola grid dengan jarak 10 m sampai 30 m dengan minimum 3 titik per blok menara. - Dalam hal beberapa menara terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung dengan 4 sampai 7 lantai	- Satu titik setiap 400 m² dalam pola grid dengan jarak 15 m sampai 40 m dengan minimum 2 titik per gedung.

Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
	- Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Gedung kurang dari 4 lantai atau bangunan pabrik (di luar rumah tinggal)	- Satu titik setiap 600 m² dalam pola grid dengan jarak 25 m sampai 50 m dengan minimum 1 titik per gedung. - Dalam hal beberapa gedung terletak berdekatan, dijadikan satu kesatuan dan digunakan kaidah yang sama. - Tambah titik apabila hasil investigasi menunjukkan anomali lapisan tanah.
Bangunan kurang dari 4 lantai dengan tapak sangat luas > 25000 m ²	- Satu titik setiap 2500 m² dalam pola grid dengan jarak 50 m sampai 100 m. - Tambah titik untuk dapat menghasilkan potongan tanah pada orientasi.
Struktur memanjang (jalan raya, rel kereta, kanal, tanggul, <i>runway</i> dan <i>taxiway</i>)	- Satu titik per 50 sampai 200 m, kecuali <i>runway/taxiway</i> jarak maksimum dibatasi 100 m. Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik di antaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail.
Terowongan transportasi	- Satu titik setiap 10 sampai 75 m pada daerah pemukiman dan 20 sampai 200 m pada daerah terbuka. Jarak yang besar dapat dipakai pada investigasi awal. - Tambah titik di antaranya apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detail. - Pada setiap portal minimum 1 titik.
Basemen dan/atau dinding penahan tanah - Tinggi < 6m - Tinggi ≥ 6m	1 titik setiap 15 sampai 40 m 1 titik setiap 10 sampai 30 m
Jembatan	- Untuk jembatan konvensional dengan bentang < 50 m: minimum 1 titik pada tiap abutment dan pilar per 2 lajur lalu lintas

Jenis Struktur	Jumlah Minimum Penyelidikan Tanah
	- Untuk jembatan khusus dengan bentang ≥ 50 m atau jembatan di laut: ditentukan oleh tenaga ahli geoteknik
Konstruksi Khusus (menara, fondasi mesin berat, tangki)	1 per 300 m ² tapak konstruksi, dengan minimum 1 titik penyelidikan tanah.
Bendungan besar	- Pada tahap perencanaan awal, minimum 5 titik, 3 pada sumbu bendungan dan 2 titik, masing-masing di hulu dan hilir - Pada tahap perencanaan detail, penambahan titik bor disesuaikan kondisi geologi yang ditemukan pada penyelidikan tahap perencanaan. Minimum 1 titik setiap 50 m sepanjang sumbu dam - Tambahkan titik pada pintu air, terowongan pengelak, <i>spillway</i>, <i>outlet</i>, <i>power house</i>, dll.
Stabilitas lereng, galian dalam, dan timbunan tinggi dengan ketinggian > 6 m untuk tanah normal dan > 3 m pada tanah lunak	- 3-5 titik pada potongan kritis untuk menghasilkan model untuk dilakukan analisis. Jumlah potongan kritis tergantung tingkat masalah stabilitas. - Untuk kelongsoran yang masih aktif, minimum satu titik pada sisi atas lereng yang longsor.
Reklamasi	1 per 1000 m ² luas timbunan

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2017)

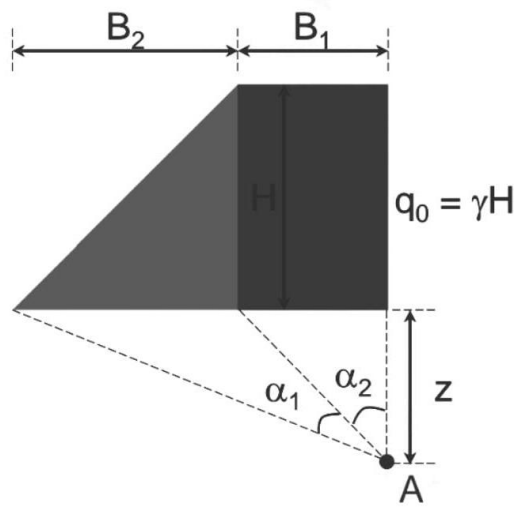
Informasi dan Sifat Geoteknik yang akan dicari	Metode Penyelidikan Lapangan ^{a)}	Kesesuaian Penerapannya dan Kemungkinan Hasil yang Dapat Diperoleh																	
		Pengambilan Contoh						Pengujian Lapangan									Pengukuran Muka Air Tanah		
		Tanah			Batuan			CPT & CPTU	Pressuremeter ^{c)}	Dilatometer	SPT ^{d)}	DP	FVT	DMT	PLT	Sistem Terbuka	Sistem Tertutup		
		Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori A	Kategori B	Kategori C												
Informasi Dasar																			
Jenis Tanah		K1 H1	K1 H1	K1 H2	-	-	-	K2 H2	K3 H3	K3 H3	K2 H1	K3 H3	-	K3 H2	-	-	-		
Jenis Batu		-	-	-	B1	B1	B2	B3 e)	B3		-	-	-	-	-	-	-		
Penyebaran Lapisan ^{b)}		K1 H1	K1 H1	K3 H3	B1	B1	B2	K1 H1	B3 K3 H3	K3 H3	K2 H2	K1 H2	-	K2 H1	-	-	-		
Tinggi Muka Air Tanah		-	-	-	-	-	-	K2	-	-	-	-	-	-	-	B2 K1 H2	B1 K1 H1		
Tekanan Air Pori		-	-	-	-	-	-	K2 H2	H3	-	-	-	-	-	-	B2 K1 H2	B1 K1 H1		
Sifat Geoteknik																			
Besaran Butir		K1 H1	K1 H1	-	B1	B1	B2	-	-	-	K2 H1	-	-	-	-	-	-		
Kadar Air		K1 H1	K2 H1	K3 H1	B1	B1	-	-	-	-	K2 H2	-	-	-	-	-	-		
Batas Atterberg		H1	H1	-	-	-	-	-	-	-	H2	-	-	-	-	-	-		
Kepadatan		K2 H1	K3 H3	-	B1	B1	-	K2 H2	-	-	K2 H2	K2	-	K2 H2	-	-	-		
Kekuatan Geser		K2 H1	-	-	B1	-	-	K2 H1	K1 H1	-	K2 H3	K2 H3	H1	K2 H1	B2 K1 H1	-	-		
Pemampatan		K2 H1	-	-	B1	-	-	K1 H2	K1 H1	H1	K2 H2	K2 H2	-	K2 H1	K1 H1	-	-		
Permeabilitas		K2 H1	-	-	B1	-	-	K3 H2	H3	-	-	-	-	-	-	K2 H3	K2 H2		
Test Kimiawi		K1 H1	K1 H1	-	B1	B1	-	-	-	-	K2 H2	-	-	-	-	-	-		
Catatan:					Kesesuaian Penerapannya:														
^{a)}	Lihat Bab 5.3 dan 5.4 untuk istilah				B1 Sangat baik untuk Batuan					B2 Agak baik untuk Batuan				B3 Kurang baik untuk Batuan					
^{b)}	Dalam arah horizontal dan vertikal				K1 Sangat baik untuk tanah berbutir Kasar *)					K2 Agak baik untuk tanah berbutir Kasar			K3 Kurang baik untuk tanah berbutir Kasar						
^{c)}	Tergantung jenis pressuremeter				H1 Sangat baik untuk tanah berbutir Halus *)					H2 Agak baik untuk tanah berbutir Halus			H3 Kurang baik untuk tanah berbutir Halus						
^{d)}	Diasumsikan sampel tertahan				- Tidak berlaku														
^{e)}	Hanya batuan lunak																		
					*) Kelompok tanah utama "butiran kasar" dan "butiran halus" sesuai dengan ISO 14688-1														
					Catatan : Tergantung kondisi tanah (seperti jenis tanah, kondisi muka air tanah) dan desain yang direncanakan, pemilihan metode penyelidikan dapat berbeda dan menyimpang / berbeda dari tabel ini.														

Gambar 2.7 Metode Penyelidikan Tanah Lapangan

Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2017

2.3 Distribusi Tegangan dalam Tanah

Tegangan yang terjadi pada massa tanah disebabkan oleh beban yang bekerja dari permukaan tanah atau berat dari tanah itu sendiri. Tegangan yang berasal dari beban yang bekerja pada permukaan tanah akan berkurang apabila kedalaman tanahnya bertambah, dan juga sebaliknya. Perhitungan tegangan di dalam tanah dianggap bersifat elastis, homogen, isotropik dan ada hubungan linier antara tegangan dan regangan. Distribusi tegangan pada beban trapesium dinyatakan seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Beban Trapesium

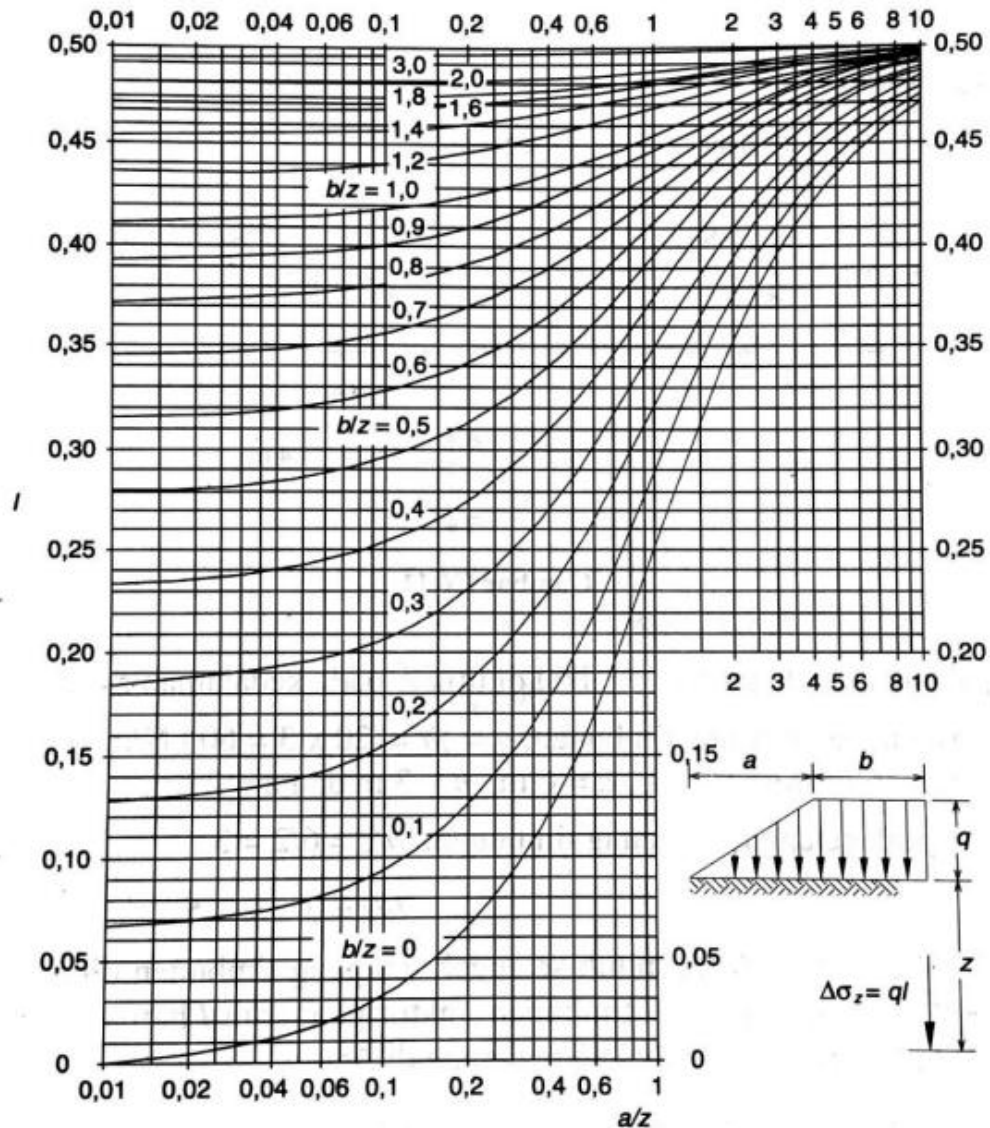
Penentuan berupa penambahan tegangan vertikal yang terjadi akibat beban yang terbagi rata berbentuk trapesium dengan panjang tak terhingga, ditinjau dari titik A yang terletak di dalam tanah yang mengalami pembebanan akibat beban yang terbagi rata. Tegangan pada titik A dapat dihitung dengan beberapa persamaan berikut.

$$\alpha_1 (\text{radians}) = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (2.6)$$

$$\alpha_2 (\text{radians}) = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right) \quad (2.7)$$

$$\Delta \sigma_z = q_0 l \quad (2.8)$$

$$\Delta \sigma_z = \frac{q_0}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] \quad (2.9)$$

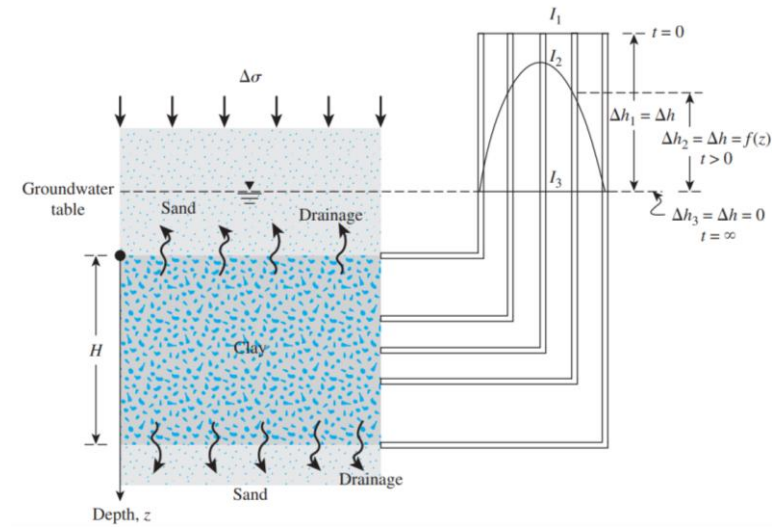


Gambar 2.9 Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan

Sumber: Hardiyatmo, 2018

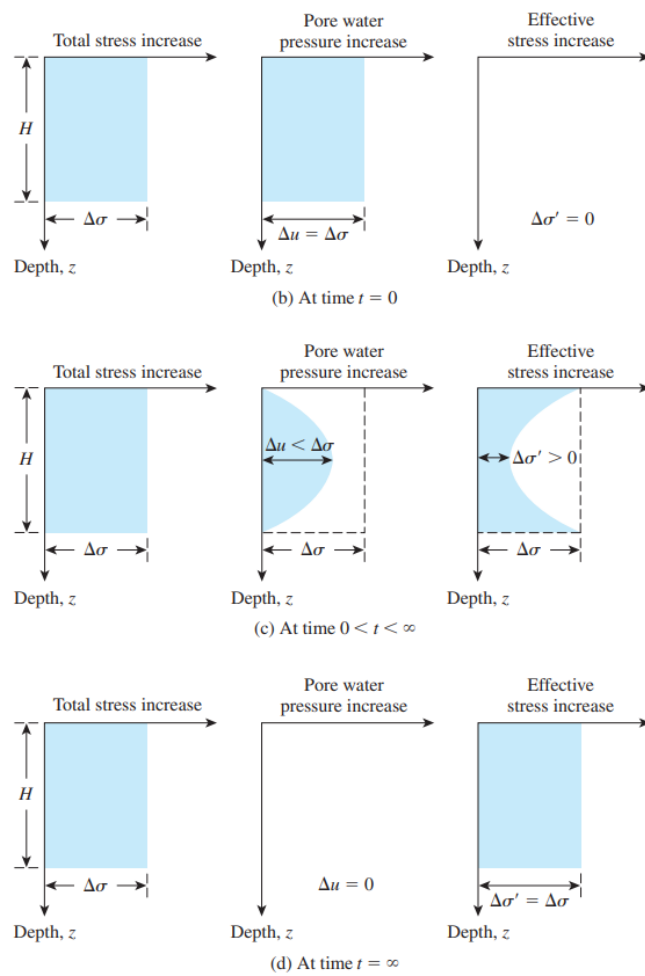
2.4 Konsolidasi Tanah

Proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah jenuh berpermeabilitas rendah akibat pembebanan, prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari tanah, yang sering disebut konsolidasi. Prosesnya dapat dilihat dengan pemasangan piezometer, untuk mencatat perubahan tekanan air pori dengan waktunya. Besarnya turunan diukur pada titik referensi ketinggian pada sebuah tempat (Hardiyatmo, 2018). Adapun ilustrasi terjadinya konsolidasi pada tanah dapat dilihat pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Konsep Konsolidasi Tanah

Sumber: Das & Sobhan, 2014



Gambar 2.11 Variasi Tegangan Total pada saat Konsolidasi Tanah Lempung

Sumber: Das & Sobhan, 2014

Uji konsolidasi satu dimensi di laboratorium pertama dikenalkan oleh Terzaghi. Uji konsolidasi tersebut dilakukan dalam suatu alat konsolidometer. Skema pengujian tanah oleh konsolidometer yaitu tanah diletakkan di dalam cincin logam dengan dua buah batu berpori di atas dan di bawah. Beban kemudian diaplikasikan pada ujung balok datar, kemudian nilai kemampatan tanah di ukur dengan menggunakan skala ukur mikrometer.

Pemberian beban pada saat pengujian dapat diamati terjadinya penurunan pada tanah. Penurunan ini terjadi dikarenakan adanya perubahan susunan tanah ataupun berkurangnya rongga pori atau air dalam tanah. Penurunan akibat beban adalah jumlah total penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Berdasarkan pembebanan yang pernah dialami oleh tanah maka dapat dibagi menjadi:

1. *Normally Consolidated*, kondisi yang terjadi apabila tegangan efektif yang bekerja pada suatu titik di dalam tanah pada waktu sekarang merupakan tegangan maksimumnya/tanah tidak pernah mengalami tekanan yang lebih besar dari tekanan pada waktu sekarang.
2. *Overconsolidated*, kondisi yang terjadi pada proses pengendapan, tanah mengalami konsolidasi penurunan, akibat tanah di atasnya. Kemudian tanah di atasnya akan menghilang akibat proses alam.
3. *Underconsolidated*, biasa terjadi pada tanah yang baru saja terendapkan baik secara geologis maupun oleh manusia. lapisan tanah pada kondisi ini belum seimbang karena beban di atasnya. Tekanan air pori jika diukur pada kondisi ini, maka tekanannya kan melebihi tekanan hidrostatiknya.

Berdasarkan uji konsolidasi ini terdapat parameter yang dapat diketahui dari tanah, diantaranya sebagai berikut:

1. *Overconsolidated Ratio (OCR)*

Nilai banding *overconsolidated* (*Overconsolidation Ratio*, OCR) didefinisikan sebagai nilai banding tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan efektif yang ada. Dinyatakan dalam persamaan (2.10).

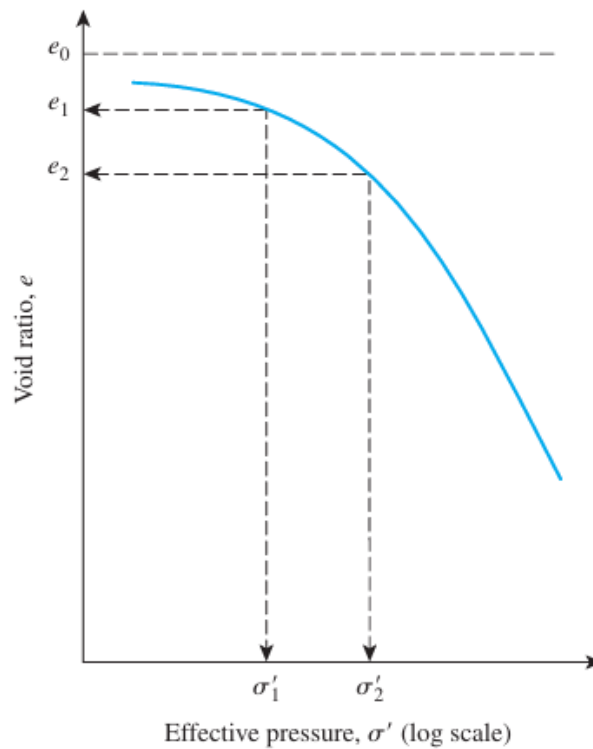
$$OCR = \frac{P'_c}{P'_o} \quad (2.10)$$

Jika didapatkan perbandingan nilai tekanan prakonsolidasi terhadap tegangan efektif yang ada, maka:

- a) Nilai $OCR > 1$, maka *overconsolidated*.
- b) Nilai $OCR = 1$, maka *normally consolidated*.
- c) Nilai $OCR < 1$, maka *underconsolidated*.

2. Indeks kompresi, pengembangan, dan pemampatan kembali

Ketiga indeks tersebut dapat diketahui nilainya dengan metode grafis dan menggunakan rumus persamaan. Metode grafis menggunakan grafik hubungan antara angka pori dengan tegangan efektif dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Grafik Hubungan Angka Pori - Tegangan Efektif

Sumber: Das & Sobhan, 2014

Penentuan indeks kompresi (C_c), indeks pengembangan (C_s), dan indeks pemampatan kembali (C_r) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)} \quad (2.11)$$

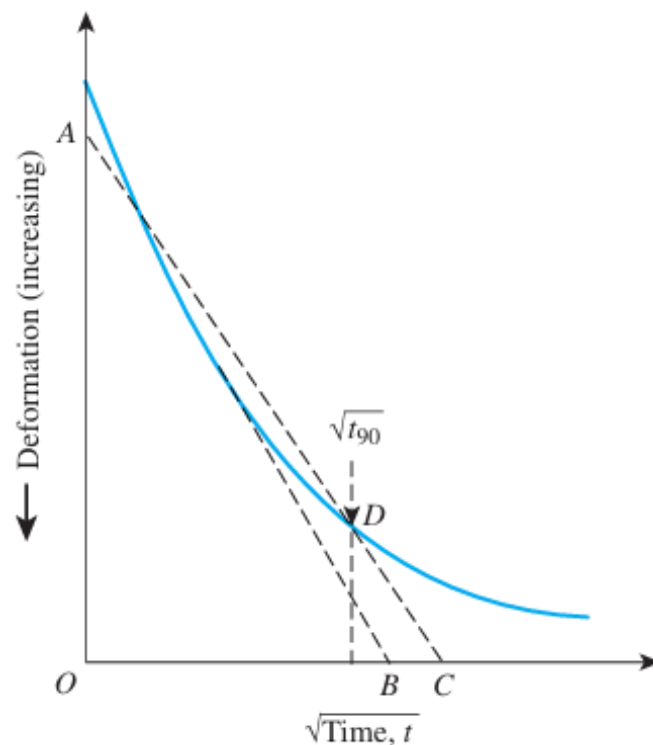
$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \right)} \quad (2.12)$$

- d) Tahap 4: tentukan nilai deformasi pada konsolidasi 50% ($d_{50} = (d_0 + d_{100})/2$). Absis dari titik F adalah waktu 50% konsolidasi atau t_{50} .
- e) Tahap 5: nilai T_v pada derajat konsolidasi 50% adalah 0,197. Sehingga nilai C_v didapatkan dengan persamaan (2.14) dan persamaan (2.15).

$$T_{50} = \frac{C_v \times t_{50}}{H_{dr}^2} \quad (2.14)$$

$$C_v = \frac{0,197 \times H_{dr}^2}{t_{50}} \quad (2.15)$$

Selain menggunakan metode log-waktu, penentuan nilai koefisien konsolidasi vertikal juga dapat diketahui melalui metode akar waktu yang dikemukakan oleh Taylor (1942). Adapun tahapan penentuannya dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Grafik Akar Waktu Konsolidasi

Sumber: Das & Sobhan, 2014

- a) Tahap 1: gambarkan garis AB melalui bagian awal kurva.
- b) Tahap 2: gambarkan garis AC dengan nilai $OC = 1,5OB$. Absis dari tarik

D adalah akar waktu 90% konsolidasi ($\sqrt{t_{90}}$).

- c) Tahap 3: pada konsolidasi 90%, maka nilai T_v yang diketahui sebesar 0,848. Sehingga nilai C_v diketahui menggunakan persamaan (2.16) dan persamaan (2.17).

$$T_{90} = \frac{C_v \times t_{90}}{H_{dr}^2} \quad (2.16)$$

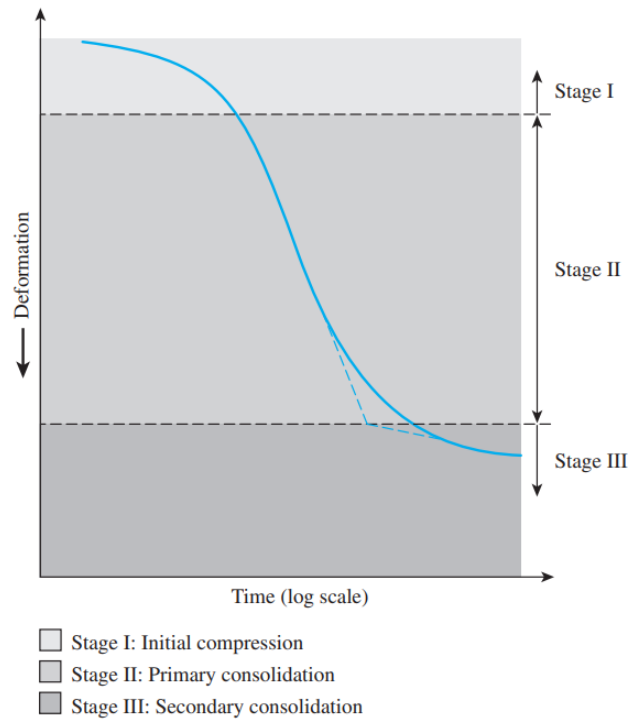
$$C_v = \frac{0,848 \times H_{dr}^2}{t_{90}} \quad (2.17)$$

2.5 Penurunan Tanah

Penurunan atau *settlement* tanah merupakan suatu reaksi dari pembebanan diatas lapisan tanah. Penurunan ini terjadi dikarenakan berubahnya susunan tanah ataupun pengurangan rongga pori atau air dalam tanah. Penurunan akibat beban merupakan jumlah total penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Penurunan yang disebabkan oleh beban ini terdiri atas penurunan segera (*immediate settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*) (Das & Sobhan, 2014).

Penurunan segera, penurunan yang terjadi pada tanah dengan butir kasar dan tanah berbutir halus kering (tidak jenuh) yang terjadi setelah diberikan pembebanan. Penurunan segera ini bersifat elastis, dalam praktiknya perhitungan pada penurunan ini sangat sulit diperkirakan besarnya. Penurunan ini banyak diperhatikan pada fondasi bangunan yang terletak pada tanah granular atau tanah dengan butir kasar.

Penurunan konsolidasi, banyak terjadi pada tanah dengan butir halus yang terletak di bawah muka air tanah. Penurunan ini membutuhkan waktu yang lama tergantung pada kondisi lapisan tanah. Bila tanah mengalami pembebanan dan berkonsolidasi maka penurunan tanah tersebut berlangsung 3 fase seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Fase Konsolidasi

Sumber: Das & Sobhan, 2014

Adapun tiga fase penurunan yang terjadi pada tanah setelah diaplikasikan beban sebagai berikut:

1. Fase awal. Penurunan terjadi segera setelah beban bekerja, diakibatkan oleh keluarnya udara dari rongga pori. Proporsi penurunan awal dapat diberikan dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva wangku terhadap penurunan dari uji konsolidasi.
2. Fase konsolidasi primer. Penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air pori meninggalkan rongga pori tanah akibat beban. Fase konsolidasi primer ini sangat dipengaruhi oleh sifat fisik tanah.
3. Fase konsolidasi sekunder. Merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer, proses ini berjalan sangat lambat.

Penurunan total pada tanah merupakan gabungan penurunan dari penurunan seketika, penurunan primer, dan penurunan sekunder. Bila dinyatakan dalam persamaan, penurunan total dapat dihitung dengan persamaan (2.18).

$$S_{\text{total}} = S_i + S_p + S_s \quad (2.18)$$

Penurunan yang terjadi pada tanah, dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis penurunan tanah yaitu:

1. Penurunan seketika

Penurunan seketika terjadi saat tanah diberikan pembebanan dimana tanah dibawahnya mengalami kenaikan tegangan, mengakibatkan tanah terkompresi ke arah vertikal dan terjadi penurunan elevasi tanah dasar (*settlement*). Akibat yang ditimbulkan juga berupa perubahan kadar air. Penurunan elastisitas dipengaruhi oleh beban timbunan juga besar dari modulus elastisitas kekakuan pada tanah. Penurunan segera dapat dihitung dengan persamaan (2.19).

$$S_i = \Delta\sigma B \frac{1-\mu^2}{E_s} I_p \quad (2.19)$$

Dimana:

- S_i = penurunan seketika (m)
- $\Delta\sigma$ = Beban timbunan (kN/m^2)
- E_s = Modulus elastisitas (MPa)
- μ = *Poisson's ratio*
- B = Lebar atau diameter timbunan (m)
- I_p = *Nondimensional influence factor*

2. Penurunan primer

Konsolidasi primer terjadi selama keluarnya air pori dalam tanah di saat konsolidasi, penyebabnya yaitu perubahan volume tanah. Air pori yang keluar mengakibatkan tegangan air pori berpindah pada tegangan efektif. Penambahan total tekanan mengakibatkan penambahan tegangan total terbagi yaitu ke tegangan efektif dan tegangan air pori. Korelasinya seperti pada persamaan (2.20).

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u \quad (2.20)$$

Dimana:

- $\Delta\sigma$ = tegangan
- $\Delta\sigma'$ = penambahan tegangan efektif
- Δu = penambahan tegangan air pori

Menurut pembebanannya ada terdapat tiga jenis dalam tahap konsolidasi primer:

- a. *Normally Consolidated*, merupakan tegangan efektif yang merupakan tegangan *overburden* maksimum yang dialami tanah. Adapun persamaan yang digunakan yaitu persamaan (2.21).

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \quad (2.21)$$

- b. *Over Consolidated*, tegangan efektif *overburden* lebih kecil dari tegangan yang pernah dialami sebelumnya. Tegangan *overburden* maksimum yang pernah dialami dinamakan tegangan prakonsolidasi. Adapun persamaan yang digunakan yaitu persamaan (2.22).

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_c'}{\sigma_0'} + \frac{C_s \times H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0' + \Delta\sigma}{\sigma_0'} \quad (2.22)$$

Dimana:

S_c = Penurunan konsolidasi primer

C_c = Indeks pemampatan

C_s = Indeks *swelling*

H = Tebal lapisan tanah

e_0 = Angka pori

σ_0' = Tekanan *overburden*

σ_c' = Tekanan prakonsolidasi

$\Delta\sigma$ = Distribusi tekanan

- c. *Underconsolidated*, tegangan *overburden* belum mencapai maksimum, konsolidasi berlangsung saat sampel tanah diambil.

3. Penurunan sekunder

Penurunan sekunder atau dikenal juga sebagai penurunan rangkak (*creep*) adalah pemampatan yang terjadi setelah hilangnya seluruh tekanan air dan udara dalam pori tanah. Pemampatan ini terjadi akibat relokasi butir-butir yang bersifat plastis pada tanah. Dibutuhkan waktu yang sangat lama pada proses penurunan ini dikarenakan telah terdisipasinya tekanan air pori berlebih juga tegangan efektif tanah tidak terjadinya perubahan. Penurunan konsolidasi sekunder dapat dihitung dengan persamaan (2.23) dan persamaan (2.24).

$$S_s = H \times C'_a \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.23)$$

$$C'_a = \frac{C_a}{1 + e_p} \quad (2.24)$$

Dimana:

S_s = penurunan konsolidasi sekunder

H = tebal lapisan tanah

C_a = indeks pemampatan

$t_1=t_2$ = waktu saat konsolidasi primer selesai

2.6 Stabilitas

Permukaan tanah yang tidak rata atau miring cenderung akan menggerakkan tanah ke bawah dengan bantuan gravitasi. Jika perlawanan geser pada tanah terlampaui maka, akan terjadi kelongsoran lereng. Analisis stabilitas permukaan tanah miring disebut dengan analisis stabilitas lereng. Stabilitas lereng dipengaruhi oleh dua faktor yaitu faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal merupakan faktor yang berasal dari material penyusun lereng, muka air tanah, kemiringan lereng, retakan, pelapukan tanah, dan aktivitas geologi dari lereng pada lereng alami. Faktor eksternal berasal dari faktor luar seperti infiltrasi air hujan, aktivitas manusia, keberadaan vegetasi, rayapan lereng, dan gempa (Hardiyatmo, 2018).

Umumnya analisis stabilitas lereng didasarkan pada kondisi keseimbangan plastis batas. Parameter analisis stabilitas suatu lereng yaitu faktor aman dari bidang longsor yang berpotensi terjadi. Klasifikasi kestabilan lereng dalam nilai faktor aman dapat dilihat dari Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Faktor Keamanan Minimum Stabilitas

Faktor Keamanan	Intensitas Kelongsoran
$FK < 1,07$	Longsoran biasa/sering (kelas labil)
$1,07 < FK < 1,25$	Longsoran pernah terjadi (kelas kritis)
$FK > 1,25$	Longsoran jarang terjadi (kelas stabil)

(Sumber: Bowles, 1986)

Stabilitas suatu lereng dipengaruhi besaran nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam tanah (ϕ). Tanah dengan kondisi kering memiliki faktor aman yang lebih

tinggi dibandingkan dengan tanah kondisi jenuh. Ketidakstabilan lereng disebabkan oleh kenaikan muka air tanah dan tekanan air pori sehingga mengurangi tegangan efektif tanah dan kuat geser dalam tanah. Faktor aman stabilitas lereng didefinisikan sebagai nilai perbandingan antara gaya tahanan tanah dan gaya penggerak. Sehingga dapat dirumuskan dalam persamaan (2.25).

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

Stabilitas pada oprit jembatan dapat dilakukan analisis berdasarkan jenis konstruksi oprit jembatan yang dipakai. Nilai kestabilan oprit jembatan memenuhi syarat mengacu pada SNI 8640:2017 dengan ketentuan pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Kriteria Perancangan Gempa Berdasarkan Infrastruktur

Peruntukan	Umur Rencana (Tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode Ulang (Tahun)	Kriteria Keamanan	Referensi
Bangunan gedung dan non gedung	50	2	2500	-	SNI 1726:2012
Jembatan konvensional	75	7	1000	-	SNI 2833 : 201x dan AASHTO 2012
Dinding penahan tanah Abutment	75	7	1000	FK>1,5 (terhadap geser saat mengalami statis), FK>2 (terhadap guling saat mengalami beban statis), dan FK>1,1 (terhadap beban pseudostatik)	WSDOT DHWA-NJ-2005-002
Timbunan oprit				FK>1,1	
Bendungan	100	1	10.000, <i>Safety Evaluation</i>	- Tidak terjadi aliran air tidak terkendali	ICOLD No. 148, 2016

Peruntukan	Umur Rencana (Tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode Ulang (Tahun)	Kriteria Keamanan	Referensi
	100	50	<i>Earthquake</i> (SEE) 145 <i>Operating Basis Earthquake</i> (OBE)	- Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan - Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter - <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana - Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	
Bangunan pelengkap bendungan	5	2	2500	-	
Terowongan	100	100	1000	-	

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Metode analitik untuk penentuan stabilitas lereng terdapat beberapa metode yang umum digunakan diantaranya *ordinary method of slice* (Fellenius 1936), metode Bishop (1955), dan metode Janbu (1954). Analisis stabilitas dengan metode Fellenius (1936) mengasumsikan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi kanan dan kiri dari sembarang irisan mempunyai resultan gaya sama dengan nol pada arah tegak lurus bidang longsor. Metode Fellenius dapat dilihat pada Gambar 2.16.

ΣM_d = jumlah momen dari berat massa tanah yang longsor

Momen yang menahan tanah akan longsor didefinisikan sebagai persamaan (2.31).

$$\Sigma M_r = R \sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \tan \phi) \quad (2.31)$$

Sehingga persamaan untuk faktor keamanan didapatkan menjadi persamaan (2.32).

$$F = \frac{\Sigma M_r}{\Sigma M_d} = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} (ca_i + N_i \tan \phi)}{R \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (2.32)$$

2.7 Geof foam

Geof foam merupakan material dari polimer berbentuk balok atau planar kaku yang digunakan dalam rekayasa geoteknik (Koerner, 2005). *Geof foam* dibagi menjadi dua macam yaitu EPS (*Expanded Polystyrene*) dan XPS (*Extruded Polystyrene*).

2.7.1 Karakteristik *Geof foam*

Material *geof foam* memiliki karakteristik berupa densitas yang sangat ringan yaitu sekitar 1 – 3% dari densitas tanah. Material EPS menjadi bahan yang umum digunakan pada proses pembuatan *geof foam*. Pembuatan *geof foam* dilakukan dalam dua tahapan yaitu *pre-expansion* dan *molding*. Tahap *pre-expansion* butiran polimer dimasukkan pada kontainer kemudian dipanaskan dengan uap. Penguapan ini menyebabkan butiran polisterin mengembang hingga 50 kali dari volume awalnya. Pada tahapan ini EPS dikenal dengan *pre-puff* dengan volume *pre-puff* ini adalah 98% udara dengan bentuk seperti bola.

Tahapan *molding* yaitu pencetakan *pre-puff* ke dalam cetakan blok. Pada tahap *molding* ini dilakukan kembali pemanasan sehingga *pre-puff* dapat mengalami pengembangan dan membentuk polihedral. Polihedral inilah yang memiliki fungsi untuk mengisi ruang kosong dalam cetakan. Pendinginan dilakukan hingga mencapai kondisi suhu dan properti kimianya stabil.

Geof foam memiliki beberapa parameter atau karakteristik yang perlu diketahui. Adapun karakteristik dari *geof foam* adalah sebagai berikut:

1. Dimensi *geof foam*

Dimensi pada *geof foam* meliputi panjang, lebar, dan tinggi. Dimensi

geofoam disesuaikan kembali dengan kebutuhan dan prefabrikasi yang umum digunakan. Adapun dimensi yang umum dijumpai dapat dilihat pada Tabel 2.15.

Tabel 2.15 Dimensi *Geofoam*

Dimensi (mm)	Tipe	
	EPS <i>Geofoam</i>	XPS <i>Geofoam</i>
Lebar	305 – 1219	406 – 1219
Panjang	1219 – 4877	1219 – 1743
Tinggi	25 – 1219	25 – 102

(Sumber: ASTM D6817, 2021)

2. Berat jenis *geofoam*

Pengukuran berat jenis *geofoam* didasarkan pada ASTM C578, dari hasil pengujian nilai minimum berat jenis *geofoam* sebesar 11 kg/m³ sampai 48 kg/m³ (Koerner, 2005). Dengan berat jenisnya yang ringan sehingga banyak material *geofoam* digunakan sebagai timbunan ringan. Adapun parameter fisik yang dimiliki oleh *geofoam* berdasarkan dapat dilihat pada Tabel 2.16 dan Tabel 2.17.

Tabel 2.16 Parameter Fisik EPS *Geofoam*

Type	EPS12	EPS15	EPS19	EPS22	EPS29	EPS39	EPS46
Density, min., kg/m ³ [lb/ft ³]	11,2 [0,70]	14,4 [0,90]	18,4 [1,15]	21,6 [1,35]	28,8 [1,80]	38,4 [2,40]	45,7 [2,85]
Compressive resistance, min., kPa [psi] at 1% strain	15 [2,2]	25 [3,6]	40 [5,8]	50 [7,3]	75 [10,9]	103 [15,0]	128 [18,6]
Flextural strength, min., kPa [psi]	69 [10,0]	172 [25,0]	207 [30,0]	240 [35]	345 [50,0]	414 [60,0]	517 [75,0]
Oxygen indeks, min., volume %	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0

^AFor product that have an external skin, testing shall be undertaken with skins intact.

(Sumber: ASTM D6817, 2021)

Tabel 2.17 Parameter Fisik XPS *Geofoam*

Type	XPS20	XPS21	XPS26	XPS29	XPS36	XPS48
Density, min., kg/m ³ [lb/ft ³]	19,2 [1,30]	20,8 [1,30]	25,6 [1,60]	28,8 [1,80]	35,2 [2,20]	48,0 [3,00]
Compressive resistance, min.,	20 [2,9]	35 [5,1]	75 [10,9]	105 [15,2]	160 [23,2]	280 [40,6]

Type	XPS20	XPS21	XPS26	XPS29	XPS36	XPS48
kPa [psi] at 1% strain						
Flextural strength, min., kPa [psi]	276 [40,0]	276 [40,0]	345 [50,0]	414 [60,0]	517 [75,0]	689 [100,0]
Oxygen indeks, min., volume %	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
^A For product that have an external skin, testing shall be undertaken with skins intact.						

(Sumber: ASTM D6817, 2021)

3. Kemampuan menyerap kelembaban

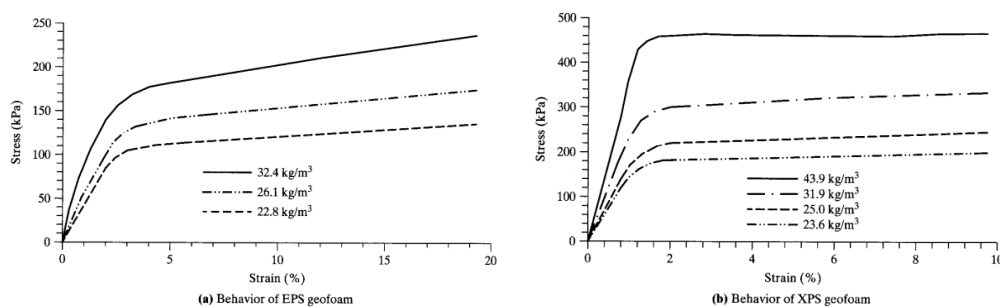
Berdasarkan hasil pembuatannya *geofoam* dirancang memiliki permeabilitas rendah. Tetapi kemampuan penyerapan *geofoam* perlu diperhatikan. Pengaplikasian untuk *thermal insulation*, kemampuan penyerapan maksimum sebesar 0,3% dari volume *geofoam* itu sendiri.

4. Indeks oksigen (OI)

Sifat *geofoam* yang mudah terbakar maka, uji indeks oksigen perlu dilakukan. *Geofoam* dengan $OI \leq 21\%$ akan mudah terbakar di udara terbuka yang mengandung oksigen 21%. EPS mampu tahan api pada kadar OI minimum sebesar 24%.

5. Compression behavior

Kuat tekan *geofoam* diuji menggunakan standar ASTM C165 dan D1621 dengan dimensi benda uji 50 mm. Dengan gerak sebesar $5,0 \pm 0,5$ mm/menit sama dengan regangan 10% per menit. Adapun karakteristik *compression* dari *geofoam* dapat dilihat pada Gambar 2.17.

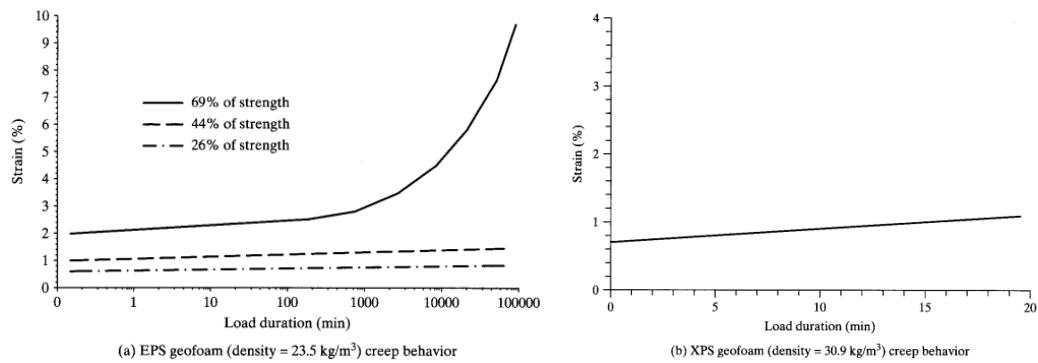


Gambar 2.17 Grafik *Compression Behavior* terhadap *Density*

Sumber: Koerner, 2005

6. Compression creep behavior

Beban tekan berkelanjutan yang terus diaplikasikan pada *geofoam* menghasilkan perilaku tertentu. Kemampuan menahan *compression creep* pada *geofoam* sebanding dengan berat jenis *geofoam* itu sendiri. Adapun karakteristik *compression creep behavior* dari *geofoam* dapat dilihat pada Gambar 2.18.

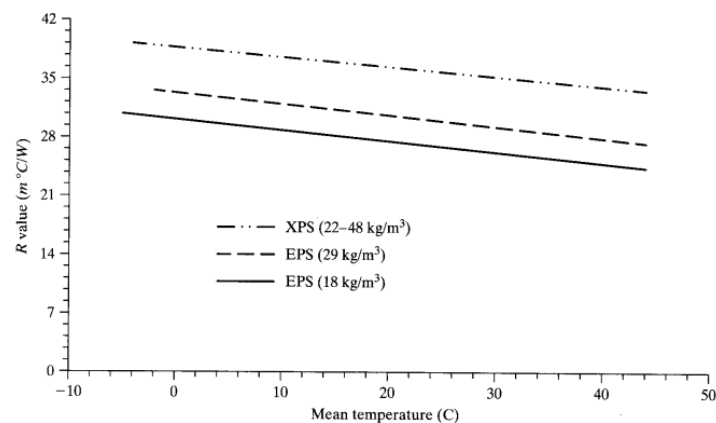


Gambar 2.18 Grafik *Compression Creep Behavior*

Sumber: Koerner, 2005

7. Parameter termal *geofoam*

Ketahanan termal *geofoam* diukur untuk mendapatkan nilai R , dimana kemampuan untuk menahan aliran panas per satuan lebar *geofoam*. *Thermal cycling* menghasilkan nilai R yang fluktuatif sehingga penggunaan nilai konservatif dalam desain sangat diperlukan. Adapun parameter termal dari *geofoam* dapat dilihat pada Gambar 2.19.

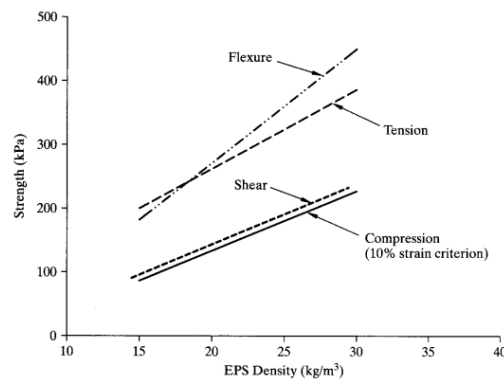


Gambar 2.19 Nilai R *Geofoam*

Sumber: Koerner, 2005

8. Kuat tarik, lentur, dan geser *geofoam*

Kuat tarik *geofoam* sebanding dengan berat isi dari *geofoam* itu sendiri. Pengujian kuat tarik dilakukan untuk mengetahui kualitas fusi *prepuffs* dari bahan EPS yang digunakan. Tegangan maksimum yang dihitung mengasumsikan bahwa bahan bersifat elastis linier sampai dengan keruntuhan. Kuat tarik dan kuat lentur ini digunakan sebagai kontrol kualitas yang dapat dilihat pada Gambar 2.20.

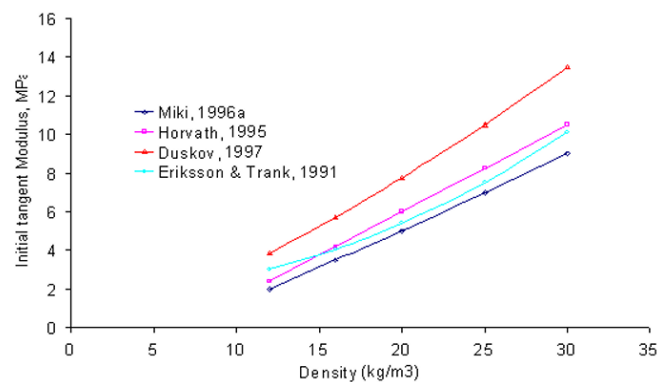


Gambar 2.20 Variasi Kekuatan EPS terhadap Berat Jenis

Sumber: Koerner, 2005

9. Modulus elastisitas *geofoam*

Nilai modulus elastisitas *geofoam* didapatkan dari bagian linier awal kurva regangan-tegangan. Modulus elastisitas merupakan fungsi dari kepadatan. Beberapa peneliti berpendapat untuk kepadatan 20 kg/m^3 , nilai modulus elastisitas *geofoam* yang dimiliki berkisar antara 5000 – 7750 kPa (Elragi, 2006). Hubungan *density* dan modulus elastisitas *geofoam* dari beberapa peneliti dapat dilihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Grafik Modulus Elastisitas EPS *Geofoam*

Sumber: Elragi, 2006

10. Angka *poisson's geofoam*

Angka *poisson's* pada *geofoam* merupakan indeks tekanan lateral terhadap struktur yang berdekatan setelah diaplikasikannya beban vertikal pada *geofoam*. Rentang nilai angka *poisson's geofoam* berkisar antara 0,05 – 0,5 dapat dilihat pada Tabel 2.18.

Tabel 2.18 Referensi Nilai Angka *Poisson's Geofoam*

Referensi	Yamanaka <i>et al.</i> (1991)	Nugessey & Sun (1996)	GeoTech (1999)	Duskov <i>et al.</i> (1998)	Ooe, <i>et al.</i> (1996)	Sanders (1996)	Momoi & Kokusyo (1996)
Angka <i>poisson's</i>	0,075	0,09 and 0,33	0,05	0,1	0,08	0,05 up to 0,2	0,5

(Sumber: Elragi, 2006)

2.7.2 Kelebihan dan Kekurangan *Geofoam*

Kelebihan utama dari *geofoam* adalah berat jenis yang sangat ringan dibandingkan dengan material timbunan lain. Berat jenis *geofoam* yang sangat ringan dapat mengurangi penurunan yang terjadi pada tanah dasar. Material *geofoam* juga memiliki kestabilan yang baik. Material *geofoam* tidak mudah membusuk dan hancur dalam tanah akibat beban yang dipikul. Kemudahan dalam pemasangan dan pengangkutan material.

Di samping keunggulan yang ditawarkan *geofoam* juga memiliki beberapa kekurangan. *Geofoam* memiliki beberapa kekurangan diantaranya material penyusun *geofoam* mudah terbakar, mudah larut jika terkena cairan khusus yang dapat melemahkan indeks propertinya dan memiliki kecenderungan mengalami gaya angkat air.

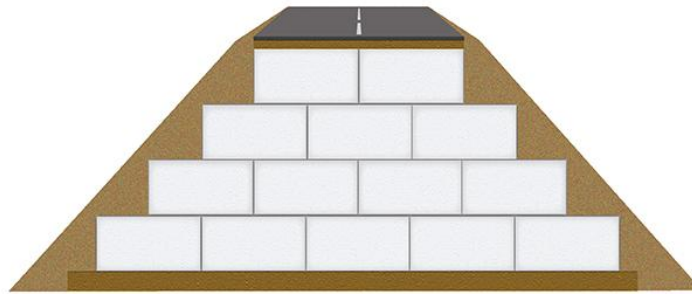
2.7.3 Pengaplikasian *Geofoam*

Geofoam banyak diaplikasikan dalam rekayasa geoteknik. Adapun pengaplikasian *geofoam* yang banyak dijumpai adalah sebagai berikut:

1. Timbunan ringan

Geofoam memiliki berat isi yang sangat ringan dibandingkan dengan tanah. Penggunaan *geofoam* sebagai material timbunan dapat meminimalisasi terjadinya penurunan akibat beban timbunan. *Geofoam* sebagai material timbunan berbentuk

balok-balok dengan dimensi tertentu. Adapun contoh pengaplikasian *geofoam* sebagai material timbunan ringan dapat dilihat pada Gambar 2.22.

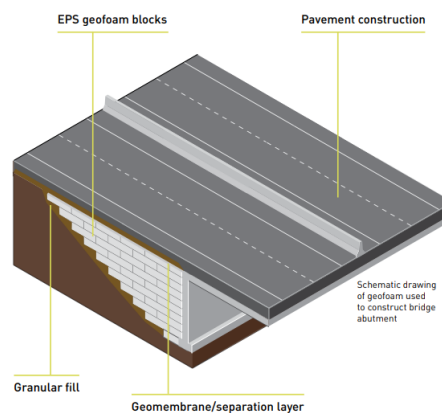


Gambar 2.22 *Geofoam* sebagai Material Timbunan Ringan

Sumber: AFM Corporation, 2023

2. Abutment jembatan

Timbunan di belakang abutment jembatan sering disebut dengan *approach* yang biasanya di isi dengan material timbunan berupa urugan tanah yang di padatkan diatas tanah dasar. Timbunan *approach* dengan material tanah sering kali menimbulkan berbagai masalah dikarenakan beban yang bekerja di atasnya dan beban tanah yang relatif besar sehingga mengakibatkan terjadinya *sliding* karena tekanan tanah aktif di belakang abutment dan terjadinya penurunan. Maka, penggantian material tanah dengan *geofoam* akan sangat berpengaruh besar dalam mereduksi besarnya penurunan maupun gaya lateral yang terjadi. Adapun contoh pengaplikasian *geofoam* sebagai material timbunan oprit jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.23.

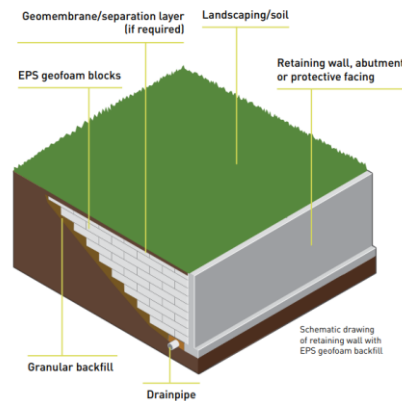


Gambar 2.23 Timbunan Oprit Jembatan dengan Material *Geofoam*

Sumber: AFM Corporation, 2023

3. Material timbunan dinding penahan tanah

Geofoam dapat digunakan sebagai material urugan di belakang dinding penahan tanah. Hal tersebut dapat mengurangi pengaruh tekanan horizontal pada dinding penahan tanah. Pengaplikasian *geofoam* sebagai material urugan dinding penahan tanah dapat dilihat pada Gambar 2.24.

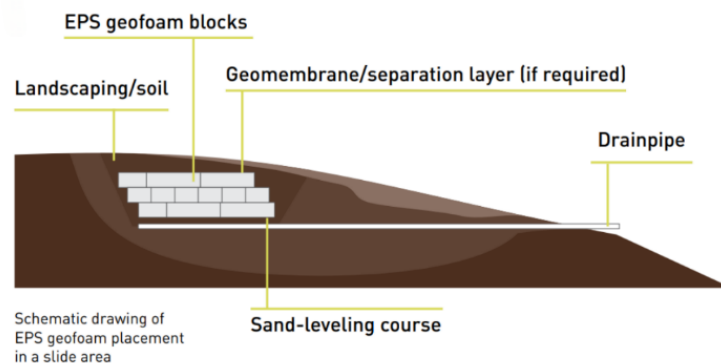


Gambar 2.24 Material Urugan Dinding Penahan Tanah

Sumber: AFM Corporation, 2023

4. Slope stabilization

Penggunaan *geofoam* untuk mengatasi stabilitas lereng dengan membuang tanah eksisting dan menggantinya dengan material *geofoam*. Dengan penggantian material tanah menjadi *geofoam* tidak mengharuskan untuk membuang massa tanah secara keseluruhan sehingga nilai faktor keamanan dapat tercapai dengan waktu yang cepat. *Geofoam* sebagai material timbunan stabilitas lereng dapat dilihat pada Gambar 2.25.

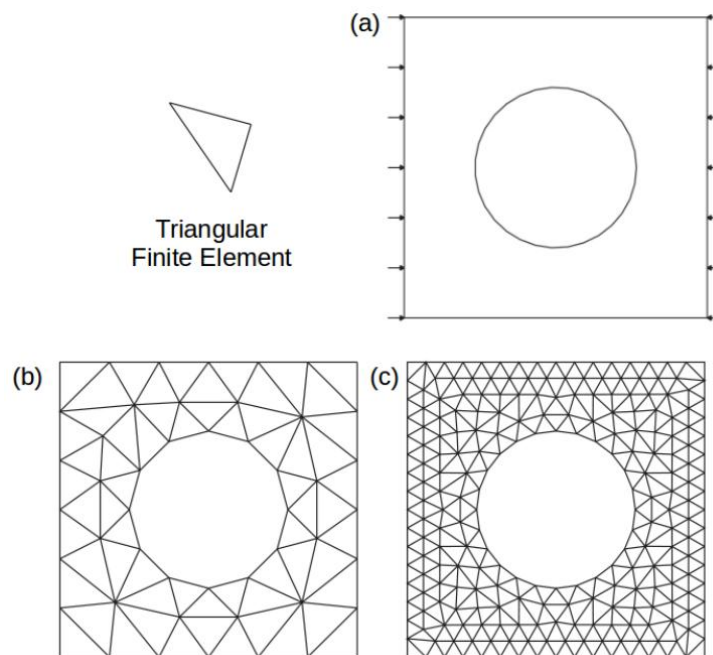


Gambar 2.25 Material Stabilitas Lereng

Sumber: AFM Corporation, 2023

2.8 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan suatu prosedur perhitungan numerik untuk memecahkan suatu permasalahan dalam mekanika kontinum dengan ketelitian yang dapat diterima oleh rekayasawan (Cook, 1981). Hal pertama dalam metode elemen hingga adalah memodelkan struktur sebagai suatu rakitan dari bagian-bagian yang lebih kecil dengan bentuk sederhana. Bagian kecil ini yang merupakan elemen hingga. Elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan oleh satu titik yang disebut dengan noda (*node*). Pembagian model struktur kontinum menjadi bagian-bagian kecil dilakukan dengan proses diskretisasi (*meshing*), sehingga model yang tadinya kontinu menjadi model diskrit dapat dilihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2.26 Metode Elemen Hingga

Sumber: Maginador, 2019

PLAXIS merupakan suatu program dengan menggunakan metode *finite element* yang digunakan untuk melakukan pemodelan tanah dalam geoteknik untuk mengetahui perilaku dari tanah yang disimulasikan (Bokko et al., 2019). Analisis deformasi dan stabilitas dapat dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS. Pemodelan dalam PLAXIS dapat dimodelkan dalam regangan bidang maupun

secara axi-simetri. Tahapan analisis dalam program PLAXIS dilakukan dalam tiga tahapan yaitu:

1. Masukan data, berupa memodelkan atau memodifikasi geometri elemen hingga yang di sesuaikan dengan kondisi aslinya. Dalam pemodelan ini dilakukan dalam tiga tahapan yaitu pemodelan, elemen, dan parameter properti.
2. Tahap perhitungan.
3. Hasil dari analisis, dapat berupa total perpindahan baik itu arah horizontal maupun vertikal, tegangan dan regangan, faktor keamanan, *bending* momen, dan gaya gesernya (Thurton, 2009).

Tipe kalkulasi atau perhitungan yang digunakan dalam penentuan faktor keamanan (FK) menggunakan metode *phi/c reduction*. Pada pendekatan faktor keamanan ini menggunakan parameter kuat geser berupa $\tan \phi$ dan c dari tanah yang terus diturunkan secara berkelanjutan hingga terjadinya kegagalan struktur. Adapun total perhitungan untuk faktor keamanan (ΣM_{sf}) untuk menentukan kekuatan tanah menggunakan persamaan (2.33).

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (2.33)$$

Parameter *input* atau masukan mengacu pada sifat parameter yang telah dimasukkan pada saat *input materials* dan parameter reduksi mengacu pada nilai yang tereduksi yang digunakan saat analisis berlangsung. ΣM_{sf} di atur pada nilai 1,0 pada saat awal kalkulasi dengan tujuan semua nilai kekuatan material sama dengan nilai *input*-nya (Bentley, 2020).