

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tanah**

Tanah menurut Braja (1995), tanah didefinisikan dalam pengertian teknis secara umum sebagai bahan yang tersusun atas agregat mineral padat (butir-butir), yang tidak merekat (terikat secara kimiawi) dan bahan-bahan organik yang dapat terdekomposisi (yang merupakan partikel-partikel padat). bersama-sama dengan cairan dan gas yang mengisi rongga antara partikel padat. Tanah menunjukkan kualitas dan sifat yang bervariasi dari satu tanah ke tanah lainnya.

Menurut Dokuchaev (1870) dalam Fauizek dkk (2018), tanah adalah lapisan permukaan bumi dan terdiri dari bahan dasar yang telah diproses oleh pengaruh perubahan alami air, udara dan berbagai organisme hidup dan mati. Luasnya perubahan tercermin dalam komposisi, struktur dan warna hasil pelapukan.

Menurut Hardiyatmo (1992), tanah merupakan ikatan antar butir yang relatif lemah yang dapat disebabkan oleh bahan organik, karbonat atau oksida antar partikel. Ruang antar partikelnya bisa berisi air, udara atau yang lainnya.

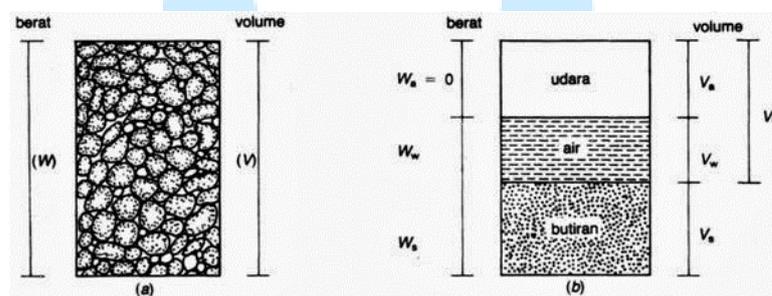
Menurut Bowles (1989) dalam Fauizek dkk (2018), tanah adalah campuran partikel yang terdiri dari salah satu atau semua jenis berikut::

- a. Berangkal (*boulders*), adalah batuan besar, biasanya lebih besar dari 250-300 mm. Antara 150 dan 250 mm, batu-batu ini disebut kerakal (*cobbles*).
- b. Kerikil (*gravel*), merupakan partikel batu dengan dimensi dari 5 mm hingga 150 mm.
- c. Pasir (*sand*), merupakan partikel batuan dengan ukuran mulai dari 0,074 mm sampai 5 mm, dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
- d. Lanau (*silt*), merupakan partikel batuan dengan dimensi dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. Sejumlah besar lumpur dan tanah liat ditemukan dalam endapan di danau atau rawa-rawa sungai pesisir.
- e. Lempung (*clay*), merupakan partikel mineral lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini adalah sumber utama kohesi dalam tanah kohesif.

- f. Koloid (*colloids*), merupakan partikel mineral bersifat “diam” yang berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

### 2.1.1 Berat Volume ( $\gamma$ ) Tanah dan Hubungannya

Tanah terdiri dari tiga komponen yaitu air, udara, dan padatan. Ruang antara tetesan dapat diisi sebagian atau seluruhnya dengan air atau udara. Jika rongga diisi dengan udara dan air, tanah dalam kondisi jenuh sebagian. Tanah kering adalah tanah yang tidak mengandung air sama sekali atau nol untuk kandungan airnya.



Gambar 2. 1 Diagram fase tanah

(Hardiyatmo, 2002)

Dengan :

$W_s$  = Berat butiran padat

$W_w$  = Berat air

$V_s$  = Volume butiran padat

$V_w$  = Volume air

$V_a$  = Volume udara

$V_v$  = Volume Rongga

Berat udara ( $W_a$ ) diasumsikan bernilai sama dengan nol. Rasio volume yang biasa digunakan dalam mekanika tanah adalah kadar air ( $w$ ), angka pori ( $e$ ), porositas ( $n$ ) dan derajat kejenuhan ( $s$ ). Berdasarkan Gambar 2.1 diatas maka diperoleh Persamaan 2.1 adalah sebagai berikut:

$$W_c = W_s + W_w \quad (2.1)$$

Kadar air ( $W_c$ ) dalam tanah merupakan perbandingan antara berat air ( $W_w$ ) dan berat partikel padat tanah ( $W_s$ ) dinyatakan dalam persentase, seperti pada Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (2.2)$$

Berat volume tanah basah ( $\gamma_b$ ), merupakan perbandingan antara berat butiran tanah yang termasuk air dan udara ( $W$ ) dengan volume total ( $V$ ) pada tanah, seperti pada Persamaan 2.3 yaitu sebagai berikut:

$$\gamma_b = \frac{W}{V} \quad (2.3)$$

Sedangkan berat isi tanah kering ( $\gamma_d$ ) merupakan perbandingan antara berat butir ( $W_s$ ) dengan volume tanah total ( $V$ ), seperti pada Persamaan 2.4 yaitu sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.4)$$

Berat volume butiran padat ( $\gamma_s$ ), merupakan perbandingan antara berat butiran rapat ( $W_s$ ) dengan volume butiran rapat ( $V_s$ ), seperti pada Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.5)$$

Berat jenis atau *specific gravity* pada tanah ( $G_s$ ) merupakan perbandingan antara berat volume butiran padat ( $\gamma_s$ ), dengan berat volume air ( $\gamma_w$ ), pada kondisi suhu  $4^\circ C$ , seperti pada Persamaan 2.6 yaitu sebagai berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.6)$$

Jika *specific gravity* pada tanah tidak berdimensi, maka berat jenis tanah dari berbagai jenis yang berbeda bervariasi dengan tanah, berat jenis tanah bervariasi dari 2,65 hingga 2,75. Nilai berat jenis atau *specific gravity* = 2,67 biasanya digunakan untuk tanah non berkoheksi. Pada tanah kohesif tak organik berkisar antara 2,68 hingga 2,72. Nilai-nilai berat jenis yang dihasilkan dari berbagai jenis tanah ditunjukkan dalam Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Berat Jenis Tanah (Hardiyatmo, 2002)

Macam Tanah	Berat Jenis Tanah (Gs)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Anorganik	2,62 – 2,68
Lempung Organik	2,58 – 2,75
Lempung Anorganik	2,68 – 2,75
Humus	2,1 – 2,37
Gambut	1,25 – 1,80

Derajat kejenuhan ( $s$ ), merupakan perbandingan jumlah volume air ( $V_w$ ) dengan volume total rongga pori dalam tanah ( $V_s$ ), biasanya dinyatakan dalam persentase, seperti pada Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.7)$$

Ketika tanah dalam keadaan jenuh dengan air, maka  $S = 1$ . Pada Tabel 2.2. mencantumkan berbagai kelas tanah berdasarkan derajat kejenuhan tanah yaitu sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Derajat Kejenuhan Dan Kondisi Tanah (Hardiyatmo, 2002)

Macam Tanah	Derajat Kejenuhan ( $s$ )
Tanah kering	0
Tanah agak lembab	>0 – 0,25
Tanah lembab	0,26 – 0,50
Tanah sangat lembab	0,51 – 0,75
Tanah basah	0,76 – 0,99
Tanah jenuh air	1

Dari persamaan-persamaan di atas dapat dibentuk hubungan antar masing-masing persamaan, yaitu :

Hubungan nilai angka pori dengan porositas dapat dilihat dengan Persamaan 2.8 dan 2.9 sebagai berikut:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (2.8)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.9)$$

Berat volume tanah basah dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.10 sebagai berikut:

$$\gamma_s = \frac{G_s \times \gamma (1+W)}{1+e} \quad (2.10)$$

Pada saat tanah dalam kondisi jenuh air, dapat menggunakan Persamaan 2.10 diatas menjadi Persamaan 2.11 sebagai berikut:

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w (G_s + e)}{1+e} \quad (2.11)$$

Untuk tanah yang kering sempurna maka menjadi Persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{G_s \times \gamma_w}{1+e} \quad (2.12)$$

Ketika tanah dalam kondisi terendam air, maka berat volume apung atau berat volume efektif dinyatakan sebagai  $\gamma'$ , dengan Persamaan 2.13 dan 2.14 sebagai berikut :

$$\gamma' = \frac{(G_s - 1)}{1 + e} \quad (2.13)$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (2.14)$$

Dimana:

$$\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3 \text{ atau } 9,81 \text{ kN/m}^3$$

Nilai porositas, angka pori dan berat volume berbagai jenis tanah asli yang diusulkan oleh Terzaghi dapat terlihat dalam Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2. 3 Nilai Parameter Tanah Asli di Lapangan (Hardiyatmo, 2002)

Macam Tanah	N (%)	e	W (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )
Pasir seragam tidak padat	46	0,85	32	14,3	18,9
Pasir seragam tidak padat	34	0,51	19	17,5	20,9
Pasir berbutir campuran tidak padat	40	0,67	25	15,9	19,9
Pasir berbutir campuran padat	30	0,43	16	18,9	21,6
Lempung lunak sedikit organic	66	1,90	70	-	15,8
Lempung lunak sangat organic	75	3,00	110	-	14,3

## 2.1.2 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah merupakan pembagian jenis tanah yang berbeda ke dalam kelompok-kelompok sesuai dengan karakteristik tanahnya. Sistem klasifikasi ini menjelaskan secara singkat mengenai sifat-sifat umum pada tanah, yang sangat bervariasi tetapi tidak ada yang benar-benar memberikan penjelasan yang jelas mengenai kemungkinan penggunaannya (Das, 1995). Tujuan dari klasifikasi tanah yaitu untuk menentukan kesesuaian untuk penggunaan tertentu dan memberikan informasi tentang kondisi tanah dari satu daerah ke daerah lain dalam bentuk informasi dasar seperti sifat pemadatan, kekuatan tanah, berat satuan, dll. (Bowles, 1989 dalam Adha, 2014). Ada dua sistem klasifikasi umum dalam mekanika tanah. Kedua sistem memperhitungkan distribusi ukuran partikel dan batas Atterberg, sistem tersebut yaitu:

1. Sistem Klasifikasi *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO)

Sistem ini dikembangkan pada tahun 1929 sebagai sistem kelas manajemen jalan. Beberapa perbaikan dilakukan pada sistem ini, yang sekarang diusulkan pada tahun 1945 oleh Komisi Klasifikasi Material Jalan Bawah Tanah dan Granular dari Badan Riset Jalan Raya dalam Standar No. D-3282, AASHTO model M105). Dalam sistem ini, negara dibagi menjadi 8 grup, yaitu A-1 hingga A-8, termasuk subgrup. Setiap kelompok tanah dievaluasi dengan indeks kelompoknya, yang dihitung dengan menggunakan rumus empiris. Analisis saringan dan potongan Atterberg digunakan sebagai pengujian (Hardiyatmo, 2019). Tabel Klasifikasi *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO) disajikan pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 sebagai berikut:

Tabel 2. 4 Sistem Klasifikasi Tanah Metode AASHTO I (Hardiyatmo, 200)

Klasifikasi umum	Material granuler (< 35% lolos saringan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-a		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
	Analisis saringan (% lolos)						
2,00 mm (no. 10)	50 maks	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks
	Sifat fraksi lolos saringan no. 40						
Batas cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (G)	0s		0	0		4 maks	
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir			
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						

Tabel 2. 5 Sistem Klasifikasi Tanah Metode AASHTO II (Hardiyatmo, 2006)

Klasifikasi umum	Tanah-tanah lanau-lempung (< 35% lolos saringan No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5/ A-7-6
Analisis saringan (% lolos)				
2,00 mm (no. 10)	-	-	-	-
0,425 mm (no.40)	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat fraksi lolos saringan no. 40				
Batas cair (LL)	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks plastis (PI)	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks kelompok (G)	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sedang sampai buruk			

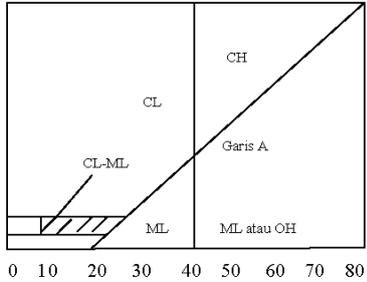
Catatan:

- Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PL)
- Untuk  $PL > 30$ , klasifikasinya A-7-5
- Untuk  $PL < 30$ , klasifikasinya A-7-6
- $N_p$  = Non plastis

## 2. Sistem Klasifikasi Kesatuan Tanah (*Unified soil classification system*)

Sistem ini awalnya diperkenalkan oleh Casagrande (1942) untuk pembangunan landasan pacu oleh *The Army Corps of Engineers*. Dalam sistem *Unified*, tanah diklasifikasikan sebagai tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% sampel lolos saringan 200, dan tanah berbutir halus (lempung/lempung) jika lebih dari 50% sampel lolos. Tanah kemudian dibagi menjadi beberapa kelompok dan sub kelompok. Adapun klasifikasi tanah berdasarkan USCS tertera pada Tabel 2.6 sebagai berikut.

Tabel 2. 6 Klasifikasi Tanah Sistem USCS (Hardiyatmo,2002)

Divisi Utama		Simbol	Nama Umum	Kriteria Klasifikasi	
Tanah berbutir kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan No. 200	Kerikil $50\% \geq$ fraksi kasar tertahan saringan No. 4	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
		Kerikil dengan Butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	
		Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
			SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	
	Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas <i>Atterberg</i> di bawah garis A atau $PI > 7$ Bila batas <i>Atterberg</i> berada didaerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol	
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		
	Tanah berbutir halus $50\%$ atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas <i>Atterberg</i> yang termasuk dalam daerah yang di arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.  Batas Cair LL (%) Garis A : $PI = 0.73 (LL-20)$
			CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" ( <i>lean clays</i> )	
			OL	Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
		Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis	
CH			Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" ( <i>fat clays</i> )		
OH			Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi		
PT			<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> , dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

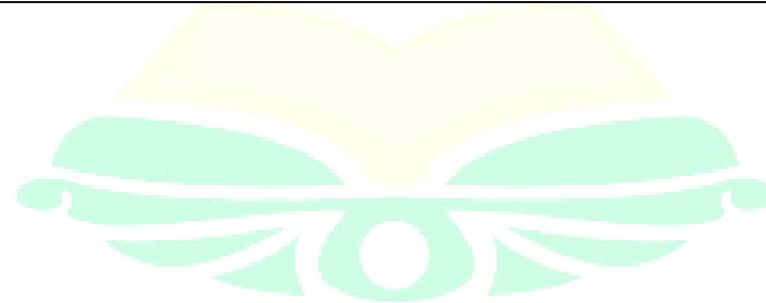
Sumber : Hary Christady, 1996

### 2.1.3 Korelasi Parameter Tanah

Adapun nilai korelasi parameter tanah berdasarkan Biarez dan Favre dimana korelasi jenis tanah sesuai dengan Tabel 2.7 sebagai berikut.

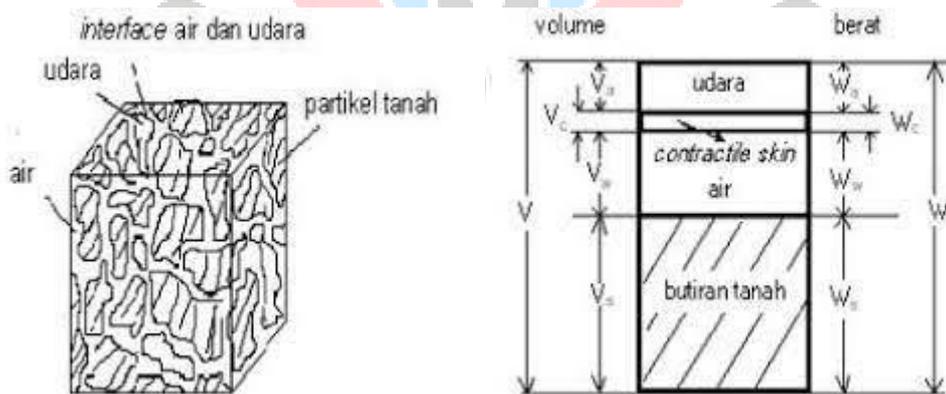
Tabel 2. 7 Korelasi Parameter Tanah (Favre dan Biarez, 2012)

Sifat Tanah	$\gamma_d$		e	n	Wsat	$\gamma_{sat}$	K		Cv		s		mv=I/E		
	gr/cm <sup>3</sup>	Ib cb tf			%	gr/cm <sup>3</sup>	Cm/s	Ft/year	Lugeon	cm <sup>2</sup> /s	ft <sup>2</sup> /year	bars	psi	cm <sup>2</sup> /kg	ft <sup>2</sup> /ton
Lunak	0.5	31.25	4,4	0,8	163	1.31	10 <sup>-9</sup>	1.03 x 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	0.01	0.142	100	97.6	
	0.6	37.5	3,5	0,78	129.6	1.38					0.05	0.71	20	19.5	
	0.7	43.75	2,86	0,74	105.8	1.44	10 <sup>-8</sup>	1.03 x 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	1 x 10 <sup>-4</sup>	3.4	1			
	0.8	50	2,35	0,7	88	1.5				2 x 10 <sup>-4</sup>	6.8	2	1.42	10	9.76
	0.9	56,25	2	0,67	74.1	1.57	10 <sup>-7</sup>	1.03 x 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	3 x 10 <sup>-4</sup>	10.1	3	7.05	2	1.95
Silty, Clay									4 x 10 <sup>-4</sup>	11.1	4	14.2	1	0.976	
	1.0	62.5	1.7	0.63	63	1.63	1 x 10 <sup>-6</sup>	1.03		5 x 10 <sup>-4</sup>	16.9	5	28.4	0,5	0.488
Rata - Rata	1.1	68.75	1.45	0.59	53.9	1.69	2 x 10 <sup>-6</sup>	2.06	10 <sup>-1</sup>	6 x 10 <sup>-4</sup>	20.3	6	42.6	0,33	0.325
	1.2	75	1.35	0.56	46.3	1.76	3 x 10 <sup>-6</sup>	3.10		7 x 10 <sup>-4</sup>	23.6	7	56.9	0,25	0.244
	1.3	81.25	1.08	0.52	39.9	1.82	4 x 10 <sup>-6</sup>	4.13		8 x 10 <sup>-4</sup>	27	8	71.0	0,20	0.195
	1.4	87.5	0.93	0.48	34.4	1.88	5 x 10 <sup>-6</sup>	5.17		9 x 10 <sup>-4</sup>	30.4	9	85.3	0,17	0.163



## 2.2 Unsaturated Soil

Hujan yang turun akan membasahi permukaan tanah dan mengalami infiltrasi ke bawah permukaan tanah, terbagi menjadi zona jenuh sebagian dan zona jenuh. Zona jenuh sebagian umumnya berada di atas muka air tanah dimana kejadian tersebut menyebabkan pori sebagian diisi dengan air. Disebut juga zona aerasi dan zona ini terbentang dari permukaan tanah turun melalui zona akar utama. Ketebalannya bervariasi sesuai dengan vegetasi dan jenis tanahnya. Di zona ini, ruang antara partikel sebagian diisi dengan air dan sebagiannya udara. Tanah jenuh sebagian berada di atas muka air tanah (m.a.t). Tanah memiliki beberapa fase yaitu fase udara, air dan butiran / tanah, yang akan langsung dengan air dan udara yang dikenal dengan *contractile skin*. Gambaran elemen tanah jenuh sebagian ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai berikut :



Gambar 2. 2 Elemen tanah jenuh sebagian

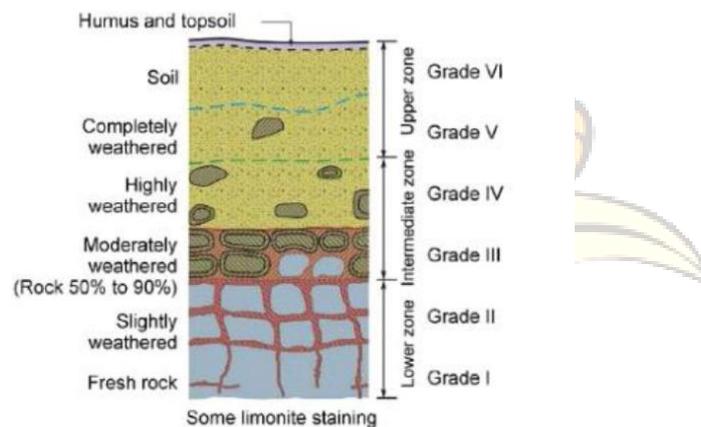
(Fredlund dan Rahardjo, 1993)

*Contractile skin* adalah proses dari tegangan permukaan air didalam tanah (*surface tension*) yang diibaratkan dengan membran elastis (Kaye dan Laby dalam Fredlund dan Rahardjo, 1993). *Contractile skin* diasumsikan sebagai tekanan udara, adanya perbedaan tekanan antara udara dengan air maka akan menyebabkan ( $u_a - u_w$ ).

## 2.3 Tanah Residual

Tanah residual adalah tanah yang terbentuk akibat pelapukan batuan yang kemudian diendapkan di atas batuan dasarnya, sehingga pada tanah residual kuat

geser tanah biasanya meningkat dengan kedalaman tanahnya, karena bagian permukaan tanah telah mengalami pelapukan yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang berada dibawahnya. Kandungan mineral dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain iklim, topografi dan nilai asam basa air yang mengalir di lokasi tersebut (Wesley, 2010). Menurut Little (1969) dalam Hardiyatmo (2006) mengklasifikasikan derajat pelapukan batuan menjadi enam, seperti terlihat pada Gambar 2.3. Dalam rekayasa teknik, pelapukan batuan dan tanah di alam digolongkan sebagai tanah, termasuk kelas pelapukan IV-VI (Dearman dan Irfan, 1978 dan Wesley, 1977). Gambar 2.3 berikut ini menunjukkan lapisan-lapisan dari tanah residual.



Gambar 2. 3 Profil Tanah Residual  
(Hardiyatmo, 2006)

## 2.4 Tanah Longsor

*Mass movement* atau Gerakan tanah memiliki kesamaan dengan tanah longsor (*landslide*). Gerakan tanah adalah gerakan massa tanah atau batuan, atau campuran keduanya, sepanjang bidang kerusakkan kritis dalam arah vertikal, horizontal, atau miring dari keadaan aslinya. Jika volume perpindahan massa tanah atau batuan cukup besar maka disebut tanah longsor. Gerakan tanah terjadi ketika gaya dorong lebih besar dari gaya penahan. Gaya penahan dipengaruhi oleh kekuatan batuan dan kerapatan tanah, sedangkan gaya dorong dipengaruhi oleh kekuatan batuan dan kerapatan tanah, sudut kemiringan, infiltrasi air, beban, dan kerapatan batuan.

Menurut Cruden dan Varnes (1992) dalam Hardiyatmo (2012) karakteristik gerakan tanah pada lereng dapat diklasifikasikan menjadi lima jenis, yaitu longsor (*slide*), jatuhan (*fall*), robohan (*topple*), aliran (*flow*), dan, sebaran (*spread*).

Bencana alam yang sering terjadi di daerah tropis basah salah satunya yaitu tanah longsor. Kerusakan yang diakibatkan oleh pergerakan massa tidak hanya kerusakan langsung seperti kerusakan fasilitas umum, lahan pertanian atau korban jiwa, tetapi juga kerusakan tidak langsung yang melumpuhkan pembangunan dan kegiatan ekonomi di dalam dan sekitar kawasan bencana (Hardiyatmo, 2006).

Banyak faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng yang menyebabkan rawan longsor. Faktor-faktor tersebut antara lain kondisi geologi dan hidrografi, topografi, perubahan iklim dan cuaca. Pada dasarnya tanah longsor terjadi apabila gaya penggerak pada lereng lebih besar dari pada gaya penahannya. Kekuatan tetap biasanya dipengaruhi oleh kekuatan batuan dan kepadatan tanah. Gaya penggerak dipengaruhi oleh ukuran sudut tepian, air, beban, dan kerapatan batu dasar.

## **2.5 Kestabilan Lereng**

Jika permukaan tanah yang tidak mendatar, maka komponen gravitasi cenderung menggerakkan tanah ke bawah, dan Ketika komponen gravitasi begitu besar sehingga tahanan geser yang diberikan tanah pada bidang gelincir terlampaui, maka akan mengakibatkan kelongsoran lereng. Analisis stabilitas pada medan miring ini disebut analisis stabilitas lereng. Analisis ini sering digunakan dalam perancangan bangunan seperti jalan raya, jalan kereta api, bandara, saluran, bendungan urugan tanah, dan lainnya. Secara umum, analisis stabilitas dilakukan untuk memeriksa keamanan dari lereng galian, lereng urugan tanah, dan lereng alami (Hardiyatmo, 2002). Indrawahjuni (2011) menambahkan bahwa komponen gravitasi sangat besar sehingga tahanan geser yang dikembangkan tanah pada bidang gelincir terlampaui dan terjadi gelincir. Dengan kata lain, suatu lereng akan longsor apabila keseimbangan gaya yang bekerja terganggu yaitu gaya pendorong melampaui kekuatan gaya penahannya.

Hardiyatmo (2002) menambahkan bahwa analisis stabilitas lereng tidaklah mudah karena terdapat banyak faktor yang sangat mempengaruhi hasil perhitungan yang diperoleh. Faktor-faktor tersebut antara lain, misalnya kondisi tanah yang

berlapis-lapis, kekuatan geser tanah anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah dan lain-lain. Terzaghi (1950) dalam Hardiyatmo (2002) membagi penyebab gangguan lereng menjadi pengaruh internal dan eksternal. Pengaruh luar adalah pengaruh yang dapat menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya perubahan kekuatan geser pada tanah. Misalnya oleh ulah manusia, pemancangan lereng batu atau penggalian tanah dan erosi sungai. Pengaruh dalam, longsoran yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar atau gempa bumi. Contoh yang sering terjadi dari kondisi ini adalah peningkatan tekanan air pori pada lereng.

Keruntuhan pada lereng alami maupun buatan disebabkan oleh perubahan seperti topografi, gempa bumi, aliran air tanah, kehilangan kekuatan, perubahan pembebanan, dan musim/iklim/cuaca. Gaya eksternal yang bekerja pada material pembentuk timbunan cenderung menyebabkan material pembentuk timbunan longsor. Kekuatan geser material itu sendiri menolak kecenderungan untuk tergelincir ini. Lereng yang telah stabil dalam waktu yang lama dapat menjadi tidak stabil karena berbagai faktor seperti:

1. Jenis dan kondisi lapisan tanah / batuan yang membentuk lereng.
2. Bentuk geometris bagian yang miring (misalnya tinggi dan kemiringan lereng).
3. Penambahan kandungan air dalam tanah (misalnya infiltrasi air).
4. Distribusi beban dan beban.
5. Getaran atau gempa bumi.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng dapat menyebabkan tegangan geser di seluruh massa tanah, pergerakan akan terjadi kecuali jika tahanan geser pada setiap bidang rekahan yang mungkin lebih besar daripada tegangan geser efektif (Bowles, 1991).

## 2.6 Teori Analisis Stabilitas Lereng

Teori analisis stabilitas lereng merupakan teori yang digunakan untuk memprediksi kestabilan suatu lereng. Asumsi bentuk longsoran berupa lingkaran dimaksudkan untuk mempermudah perhitungan analisis gravitasi secara komputasional dan dianggap mendekati bentuk longsoran sebenarnya yang sering dijumpai di alam. Kesalahan dalam analisis stabilitas lereng biasanya tidak

disebabkan oleh asumsi bentuk area yang rusak, tetapi kesalahan terutama timbul dari penentuan sifat-sifat tanah dan penentuan kelongsoran kritis. Bentuk model keruntuhan biasanya dapat ditentukan dengan cukup baik, tetapi untuk pusat rotasi mungkin memerlukan beberapa kali percobaan (pusat lingkaran dan jari-jari ditentukan dengan metode coba-coba) untuk mendapatkan kasus terburuk, angka keamanan yang paling minimum yang digunakan (Bowles, 1984).

Faktor keamanan merupakan nilai perbandingan antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakannya, atau sesuai dengan Persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$F = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2.15)$$

Dimana  $\tau$  adalah tahanan geser maksimum (kPa) yang dapat diberikan oleh tanah, dan  $\tau_d$  adalah tegangan geser (kPa) akibat berat tanah longsor, dan  $F$  merupakan nilai faktor keamanan tanah atau *safety factor*.

Berdasarkan teori dari Mohr-Coulomb, tahanan geser ( $\tau$ ) yang dapat diberikan oleh tanah sepanjang bidang gelincirnya dinyatakan dalam Persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.16)$$

Dengan metode yang sama, persamaan tegangan geser ( $\tau_d$ ) yang disebabkan oleh beban tanah dan beban lain pada bidang gelincirnya dapat ditulis sesuai dengan Persamaan 2.17 sebagai berikut.

$$\tau_d = c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d \quad (2.17)$$

Dengan  $c_d$  dan  $\varphi_d$  adalah kohesi (kPa) dan sudut geser dalam ( $^\circ$ ) atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang gelincirnya sesuai dengan Persamaan 2.18 sebagai berikut.

$$F = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \varphi}{c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 diatas dapat juga ditulis dalam bentuk Persamaan 2.19 sebagai berikut.

$$c_d + \sigma \operatorname{tg} \varphi_d = \left(\frac{c}{F}\right) + c_d + \sigma \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{F}\right) \quad (2.19)$$

Untuk memberikan faktor keamanan pada setiap komponen gaya geser, maka faktor keamanan dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.20 dan 2.21 sebagai berikut.

$$F_c = \frac{c}{c_d} \quad (2.20)$$

$$F_\varphi = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_d} \quad (2.21)$$

Dimana:

$F_c$  = Faktor aman pada komponen kohesi.

$F_\varphi$  = Faktor aman pada komponen gesekan, umumnya faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,0.

$C$  = Kohesi tanah.

$C_d$  = Kohesi tanah yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang longsor.

$\varphi$  = Sudut geser dalam tanah.

### 2.6.1 Metode Fellenius

*Ordinary method of slicea* atau biasa disebut dengan metode Fellenius pertama kali diperkenalkan oleh Fellenius (1927,1936) dan didasarkan pada fakta bahwa gaya memiliki sudut kemiringan dengan bagian bawah irisan FK, yang dihitung dengan menyeimbangkan momen. Fellenius berasumsi bahwa massa tanah di atas bidang gelincir terbagi kedalam potongan-potongan bagian vertikal. Lebar dari potongan tersebut dipilih acak, dan tidak harus sama. Untuk alasan praktis, dasar dari setiap potongan harus hanya melalui satu jenis tanah dan lebar potongan yang dipilih sehingga busur dapat disederhanakan menjadi garis lurus. Dengan menggunakan metode ini semua gaya antar irisan diabaikan. Metode Fellenius ini cocok untuk menghitung angka keamanan secara manual.

### 2.6.2 Metode Morgenstern-Price

Dalam menghitung stabilitas lereng, metode ini memperhitungkan semua gaya yang bekerja pada setiap lapisan, yaitu gaya normal dan gaya geser pada irisan. Metode ini cocok untuk analisis kestabilan lereng menggunakan *software* karena akurat dalam perhitungan angka keamanan.

### 2.6.3 Metode Bishop

Metode Bishop perhitungan stabilitas tanah yang paling sering digunakan dan metode perhitungan yang paling lama digunakan. Metode Bishop hampir sama dengan metode Fellenius, tetapi metode ini memperhitungkan gaya antar irisan yang ada yaitu berupa gaya normal saja. Untuk perhitungan angka keamanan, metode Bishop ini menggunakan cara *trial and error*. Perbandingan dari ketiga metode dapat dilihat pada Tabel 2.8 dan Tabel 2.9 sebagai berikut.

Tabel 2. 8 Perbandingan Kesetimbangan Antar Metode (Fianti, 2019)

Metode	Kesetimbangan Gaya		Kesetimbangan Momen
	Vertikal	Horizontal	
Fellenius	Tidak	Tidak	Ya
Bishop	Ya	Tidak	Ya
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya

Adapun perbandingan dari ketiga metode tersebut terhadap gaya antar irisannya dapat dilihat pada Tabel 2.9 sebagai berikut.

Tabel 2. 9 Gaya Antar Irisan Setiap Metode (Fianti, 2019)

Metode	Gaya Antar Irisan	
	Normal	Geser
Fellenius	Tidak	Tidak
Bishop	Ya	Tidak
Morgenstern-Price	Ya	Ya

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam melakukan perhitungan stabilitas lereng dengan menggunakan metode Bishop disederhanakan sesuai dengan Persamaan 2.22 dan 2.23 dibawah ini.

$$SF = \frac{\sum(W_{total}-b.u) \tan\phi' + Cb)x (1/M_i)}{\sum w \sin\alpha_n} \quad (2.22)$$

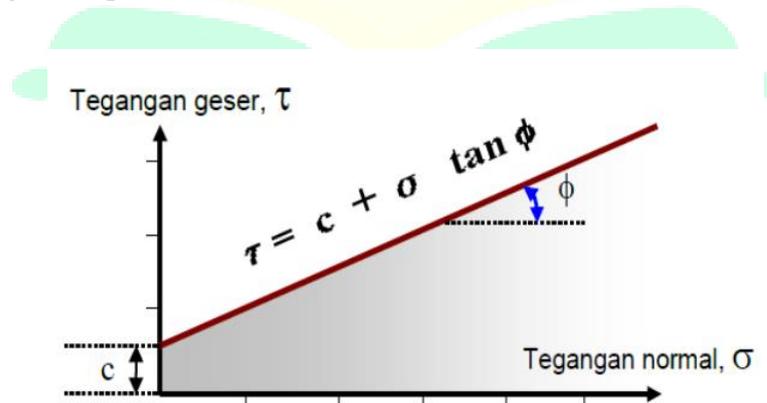
$$SF = \frac{\sum RM}{\sum DM} \quad (2.23)$$

### 2.7 Kuat Geser Tanah

Kekuatan geser tanah adalah kekuatan perlawanan yang diberikan partikel butir tanah terhadap beban. Menurut analisis stabilitas lereng, penentuan kuat geser

tanah merupakan hal yang sangat penting. Keamanan lereng ditentukan oleh hubungan antara kekuatan tanah yang mendukung beban geser dan tegangan yang menyebabkan gerakan. Kekuatan (*strength*) tanah dinyatakan dalam ketahanannya terhadap tekan dan geser. Kekuatan geser tanah adalah bagian tanah yang lemah dalam menahan beban. Ini berarti butiran tanah bergerak dengan longgar daripada dihancurkan di bawah tekanan. Selain itu, tanah merupakan bahan granular yang terpisah satu sama lain, memungkinkan setiap butiran bergerak lebih mudah di bawah tekanan yang lain.

Faktanya, selain terjadi pergeseran antar butir tanah, juga terjadi tekanan pada butir itu sendiri, namun karena beban yang bekerja maka tahanan geser antar butir tanah biasanya terlampaui sebelum butir tersebut hancur tertekan di bawah tekanan. Oleh karena itu, mekanika tanah cenderung menggunakan sifat geser tanah untuk menyatakan ketahanan tanah terhadap beban yang diterapkan. Tahanan geser tanah merupakan nilai tegangan geser tanah ( $\tau$ ), yang merupakan penjumlahan dari sifat rekat tanah ( $c$  = kohesi) dikalikan dengan koefisien geser tanah ( $\tan \phi$ ) dengan tegangan normal yang bekerja ( $\sigma$ ). Jika diplot pada bidang tegangan normal–tegangan geser, ini adalah persamaan garis lurus yang dapat ditetapkan sebagai garis batas keruntuhan (*failure line/envelope*). Nama lain dari garis ini yaitu garis Mohr-Coulomb. Akan tetapi, sudah menjadi hal yang umum dalam bidang mekanika tanah bahwa koefisien geser tanah tidak diberikan secara langsung, melainkan sudut yang dibuat oleh garis patahan dengan bidang horizontal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut:



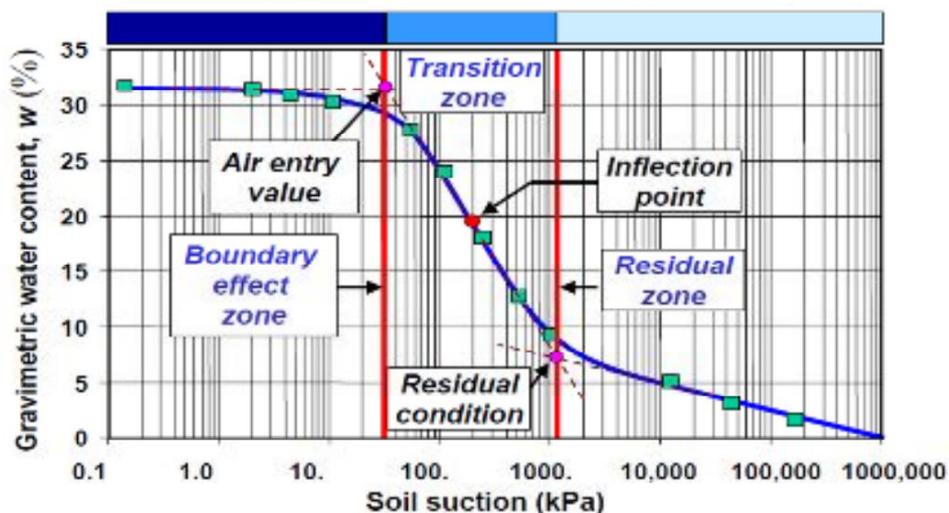
Gambar 2. 4 Garis Keruntuhan di Bidang Tegangan Normal-Geser

(Hakam, 2008)

Garis patahan pada Gambar 2.4 dapat digambarkan sebagai batas dari tegangan gabungan (tegangan geser dan tegangan normal) yang bekerja di dalam tanah. Kombinasi tegangan antara garis keruntuhan dan sumbu tegangan normal (diarsir pada gambar) terus menopang tanah (atau tidak terjadi kerusakan geser). Ini adalah kombinasi dari tekanan sepanjang garis patahan yang mengakibatkan kerusakan (geser) tanah. Pada saat yang sama, kombinasi tegangan geser dan garis normal melintasi garis rekahan dan sumbu tegangan geser secara teoritis tidak mungkin karena kekuatan geser tanah telah terlampaui sebelumnya.

## 2.8 Soil Water Characteristic Curve (SWCC)

*Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara jumlah air yang ada di dalam tanah dan suction. Jumlah air dalam bentuk tersebut dapat berupa *Volumetric Water Content* (VWC) ( $\theta$ ) atau derajat kejenuhan ( $S$ ), dan kadar air *Gravimetric Water Content* (GWC) ( $w$ ), (Vanapilli, 1996). *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC), sering juga disebut *Soil Water Retention Curve* (SWRC) yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air. *Volumetric water content function* menggambarkan volume rongga yang tersisa sebagai aliran tanah yang terisi air yang terisi air seperti terlihat pada Gambar 6 2. 5 sebagai berikut.



Gambar 2. 5 Fungsi *Volumetric water content*  
(Fredlund, et al., 1996)

Adapun nilai parameter tipikal model van Genuchten untuk kelas tekstur dengan jenis tanah yang berbeda yaitu sebagai berikut:

Tabel 2. 10 Nilai Parameter Tipikal Model Van Genuchten Untuk Kelas Tekstur Dengan Jenis Tanah (Genuchten, 1996)

<i>Soil Texture</i>	<i>Saturated Water Content</i>	<i>Residual Water Content</i>	<i>Empirical Constant alpha (cm<sup>-1</sup>)</i>	<i>Empirical Constant n</i>	<i>Saturated Conductivity (cm hr<sup>-1</sup>)</i>
<i>Sand</i>	0,43	0,045	0,145	2,68	29,7
<i>Loamy sand</i>	0,41	0,057	0,124	2,28	14,6
<i>Sandy loam</i>	0,41	0,065	0,075	1,89	4,42
<i>Loam</i>	0,43	0,078	0,036	1,56	1,04
<i>Silt</i>	0,46	0,034	0,016	1,37	0,25
<i>Silt loam</i>	0,45	0,067	0,020	1,41	0,45
<i>Sandy clay loam</i>	0,39	0,100	0,059	1,48	1,31
<i>Clay loam</i>	0,41	0,095	0,019	1,31	0,26
<i>Silty clay loam</i>	0,43	0,089	0,010	1,23	0,07
<i>Sandy clay</i>	0,38	0,100	0,027	1,23	0,12
<i>Silty clay</i>	0,36	0,070	0,005	1,09	0,02
<i>Clay</i>	0,38	0,068	0,008	1,09	0,20

## 2.9 Klasifikasi Lereng

Dalam konteks geologi, kelerengan suatu daerah dapat dihitung dari aspek morfometrinya seperti tinggi lereng, kemiringan lereng, panjang lereng, dan kekerasan tanah. Berikut adalah bagaimana hubungan kelas lereng menurut Van Zuidam (1985) tertera pada Tabel 2. 11 sebagai berikut.

Tabel 2. 11 Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng (Zuidam, 1985)

<b>Kelas</b>	<b>Slope (% / °)</b>	<b>Klasifikasi Morfologi</b>
1	0-2 % , 0-2 °	Pedataran
2	2-7 % , 2-4 °	Perbukitan Landai
3	8-13 % , 4-8 °	Perbukitan Bergelombang
4	14-20 % , 8-16 °	Perbukitan Bergelombang Curam
5	21-55 % , 16-35 °	Perbukitan Curam
6	55-140% , 35-55 °	Perbukitan Sangat Curam
7	>140%, 55 °	Perbukitan Tegak/Terjal

## 2.10 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan suatu lereng merupakan perbandingan rasio rata-rata kekuatan geser tanah/batuan sepanjang bidang keruntuhan kritis terhadap beban yang diserap oleh sepanjang bidang gelincir lereng. Nilai faktor keamanan juga harus memperhitungkan akibatnya dapat berupa korban jiwa atau kerugian ekonomi. Pada Tabel 2.12 menunjukkan mengenai nilai faktor keamanan yang direkomendasikan dengan mempertimbangkan adanya korban jiwa dan kerugian finansial dalam aspek ekonomi yaitu sebagai berikut.

Tabel 2. 12 Rekomendasi Nilai SF untuk Lereng (Pd T-09-2005-B)

		Resiko terhadap nyawa manusia	Rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan nyawa manusia		
			Tak diperhatikan	Rendah	Tinggi
Resiko Ekonomis					
Rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan secara ekonomis	Diabaikan		1.1	1.2	1.5
	Rendah		1.2	1.2	1.5
	Tinggi		1.4	1.4	1.5
Catatan :					
<ol style="list-style-type: none"> <li>Meskipun nilai faktor keamanan lerengnya 1,4, jika beresiko tinggi terhadap keselamatan orang-orang disekitarnya maka harus diubah menjadi 1.1 berdasarkan hasil prediksi kondisi air tanah terburuk.</li> <li>Faktor keamanan yang tercantum di dalam tabel ini adalah nilai-nilai yang direkomendasikan. Faktor keamanan yang lebih tinggi atau lebih rendah mungkin saja terjamin keamanannya pada situasi-situasi khusus dalam hubungannya dengan resiko kehilangan secara ekonomis.</li> </ol>					

Pada Tabel 2.12 di atas, terdapat tiga kategori resiko untuk setiap kasus, yaitu dapat diabaikan, rendah dan tinggi. Ketiga kategori ini mencerminkan perkiraan kerugian/kehilangan yang dapat terjadi pada setiap peristiwa keruntuhan lereng. Kategori resiko ekonomi menjelaskan mengenai perkiraan tingkat kerusakan finansial yang disebabkan oleh keruntuhan lereng.

Perlu ditekankan bahwa faktor keamanan terhadap resiko kerugian secara finansial atau ekonomi dan contoh tipikal dari keruntuhan lereng dalam setiap resiko kerugian finansial atau ekonomi hanya bersifat indikatif. Peristiwa keruntuhan ini hanyalah pernyataan umum dan tidak mencakup semua peristiwa keruntuhan lereng. Penting bagi perancang untuk menemukan keseimbangan yang dapat diterima antara kemungkinan kerugian finansial pada lereng jika terjadi kegagalan dan tingkat biaya konstruksi yang diperlukan untuk mencapai faktor

keamanan yang lebih tinggi. Namun berdasarkan Bowles (1979), kestabilan lereng ditentukan berdasarkan klasifikasi faktor keamanan yang ditunjukkan pada Tabel 2.13 sebagai berikut:

Tabel 2. 13 Klasifikasi Faktor Keamanan (Bowles, 1979)

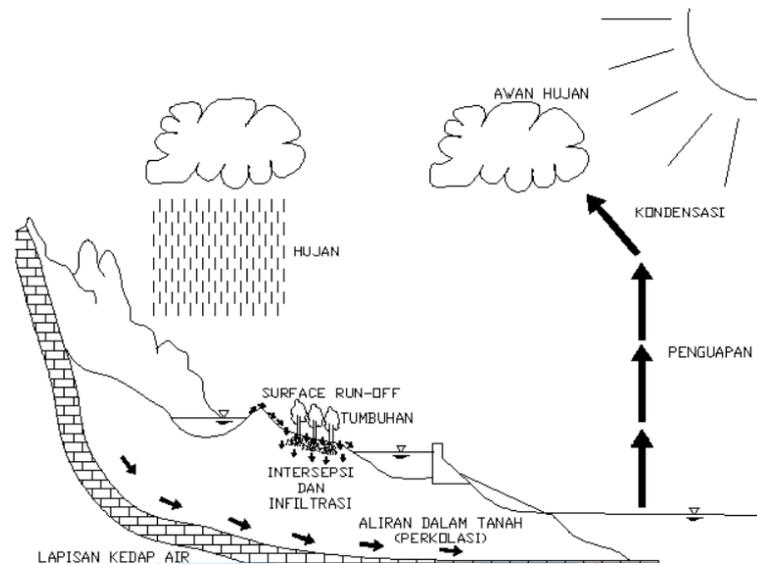
Faktor Keamanan (SF)	Kondisi Lereng
$SF > 1,25$	Stabil
$1,07 < SF < 1,25$	Kritis
$SF < 1,07$	Tidak stabil

## 2.11 Hidrologi

Hidrologi yaitu ilmu yang mempelajari tentang air di bumi, meliputi keberadaannya, sifat fisika dan kimianya, bentuk persebarannya, dan siklus air di bumi. Ilmu hidrologi dapat membantu memecahkan masalah yang berhubungan dengan air seperti perencanaan irigasi, pengelolaan daerah aliran sungai, degradasi lahan dan sedimentasi. Siklus air di Bumi tidak pernah berhenti, air atmosfer kembali ke atmosfer. Siklus ini selanjutnya disebut sebagai siklus hidrologi (Salsabila dan Nugraheni, 2020).

## 2.12 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi adalah proses perpindahan air yang terus menerus dari tanah ke atmosfer dan kemudian kembali ke tanah (Triatmodjo, 2008). Siklus hidrologi memiliki beberapa fase, yaitu kondensasi, presipitasi, evaporasi, intersepsi, perkolasi dan infiltrasi. Pertama, air di permukaan tanah dan laut menguap, uap air tersebut masuk ke atmosfer dan mengembun, yang kemudian membentuk awan hujan. Kemudian hujan turun, sebagian hujan diserap oleh tumbuhan (absorpsi), sebagian meresap ke dalam tanah (infiltrasi) dan sebagian lagi mengalir di atas permukaan bumi (mengalir) dan mengisi cekungan-cekungan tanah, danau, mengisi sungai, mengalir ke laut, dan sebagian mengalir ke dalam tanah (perkolasi) untuk mengisi kembali air tanah, yang kemudian ada sebagai air tanah. Proses ini berlangsung terus menerus dan disebut siklus hidrologi seperti terlihat pada Gambar 2.6 sebagai berikut:



Gambar 2. 6 Siklus hidrologi  
(Triatmodjo, 2008)

### 2.13 Presipitasi

Presipitasi yaitu salah satu bentuk air yang jatuh dari atmosfer. Presipitasi dapat mengambil banyak bentuk tergantung pada kondisi di mana air jatuh dari atmosfer. Adapun beberapa bentuk presipitasi diantaranya yaitu sebagai berikut :

1. Gerimis : tetesan air berdiameter  $< 0,5$  mm; dengan intensitas  $< 1$  mm/jam.
2. Hujan : tetesan air dengan berdiameter  $> 0,5$  mm; dengan intensitas  $> 1,25$  mm/jam.
3. Salju : kristal es putih menyatu dalam bentuk serpihan.
4. Batu es hujan : bola es dengan diameter  $> 5$ mm; butir es dengan diameter  $< 5$ mm.
5. Vigna : partikel air atau es jatuh dari awan tetapi menguap sebelum mencapai permukaan bumi.
6. Kabut : awan seperti kabut yang terdiri dari tetesan air kecil yang melayang di udara.
7. Embun : air mengembun pada benda yang berada di dekat tanah yang temperaturnya di atas titik beku namun di bawah suhu titik embunnya. Ketika air mengembun di bawah titik bekunya, itu disebut embun beku.

Presipitasi memainkan peran yang sangat penting dalam siklus air. Peran hujan adalah input atau input. Presipitasi yang turun mengalami proses interaksi

dengan tutupan lahan, permukaan tanah, hingga lapisan tanah di bawahnya dan mengalir ke tempat yang paling dalam seperti danau, waduk, telaga atau laut dan menguap kembali membentuk titik-titik air di atmosfer. Air yang mengalir dari hulu ke hilir memiliki berbagai proses dan kegunaan, baik bagi flora dan fauna maupun bagi manusia dalam aktivitasnya. Di sisi lain, presipitasi juga dapat merusak. Hal ini terjadi dalam keadaan tertentu, termasuk:

1. Terjadi presipitasi yang ekstrim
2. Kondisi tutupan lahan dan kondisi permukaan tanah tidak dapat menahan presipitasi yang turun

Bencana yang berkaitan dengan kejadian presipitasi dapat disebut sebagai bencana hidrometeorologis.

## **2.14 Hujan**

Hujan adalah bentuk presipitasi dari uap air yang terjadi secara alami di atmosfer. Bentuk presipitasi lainnya adalah salju dan es. Hujan diciptakan oleh uap air di atmosfer, sehingga bentuk dan jumlahnya dipengaruhi oleh faktor iklim seperti angin, suhu, dan tekanan udara. Uap air naik ke atmosfer, di mana ia mendingin dan mengembun, membentuk tetesan air dan kristal es yang akhirnya jatuh sebagai hujan (Triatmojo, 1998).

Jumlah air yang jatuh di permukaan bumi dapat diukur dengan alat pengukur hujan. Distribusi curah hujan dalam ruangan dapat ditentukan dengan mengukur curah hujan di beberapa titik di area pengamatan, sedangkan distribusi temporal dapat ditentukan dengan mengukur curah hujan dari waktu ke waktu. Curah hujan selalu dinyatakan dalam milimeter atau inci, tetapi di Indonesia satuan curah hujan adalah milimeter (mm). Curah hujan adalah jumlah air hujan yang terkumpul pada permukaan datar, tidak menguap, tidak mengalir, dan tidak mengalir. Curah hujan 1 (satu) milimeter berarti pada permukaan yang datar, satu milimeter air atau satu liter air muat untuk satu meter persegi. Intensitas curah hujan adalah jumlah hujan per satuan waktu. Ketika kita berbicara tentang intensitas tinggi, itu berarti hujan lebat. Kondisi ini sangat berbahaya karena dapat menyebabkan banjir, tanah longsor, dan dampak negatif bagi tanaman.

### 2.14.1 Klasifikasi Hujan

Hujan dapat diklasifikasikan menjadi 4 (empat) jenis. Klasifikasi ini didasarkan pada faktor-faktor penyebab hujan

1. Hujan Orografi

Hujan orografi merupakan hujan yang disebabkan oleh adanya penghalang topografi, udara terdorong ke atas kemudian mengembang, mendingin dan mengembun lebih lanjut dan selanjutnya dapat jatuh sebagai hujan. Bagian lereng yang menghadap angin lebih deras daripada bagian lereng belakang. Curah hujan bervariasi dengan ketinggian, biasanya tempat yang lebih tinggi memiliki curah hujan yang lebih tinggi hingga ketinggian tertentu.

2. Hujan Konvektif

Hujan konvektif merupakan hujan yang paling sering terjadi di daerah tropis. Panas yang menyebabkan udara naik, mengembang, dan mendingin secara dinamis mengembun dan turun sebagai hujan. Proses ini tipikal badai petir siang hari yang menghasilkan hujan lebat di area sempit. Petir lebih sering terjadi di lautan daripada di darat.

3. Hujan Frontal

Hujan frontal merupakan hujan yang terjadi karena front yang hangat. Awan yang terbentuk kebanyakan adalah awan alutan, dimana biasanya hujannya ringan dan sedikit. Awan cumulus dan cumulonimbus, di sisi lain, biasanya terjadi di bagian depan yang dingin di mana hujan turun dengan deras dan cuacanya sangat buruk. Hujan ini tidak terjadi di Indonesia karena tidak ada front di Indonesia.

4. Hujan Siklon Tropis

Hujan Siklon tropis merupakan hujan yang hanya dapat timbul di daerah tropis antara garis lintang  $0^{\circ}$  dan  $10^{\circ}$  LU dan LS, hujan ini tidak terkait dengan front, karena siklon ini terkait dengan sistem tekanan rendah. Sirkulasi tropis dapat terjadi di lautan yang hangat karena energi utama diperoleh dari panas laten yang terkandung dalam uap air. Siklon tropis menyebabkan cuaca buruk dan hujan lebat di daerah yang dilaluinya.

### 2.14.2 Curah Hujan

Curah hujan adalah banyaknya air hujan yang jatuh pada permukaan yang datar, dengan syarat air hujan tersebut tidak meresap, mengalir atau menguap. Hujan 1 milimeter adalah air hujan sampai dengan 1 milimeter, dengan asumsi tidak terjadi penguapan, aliran, atau penyerapan, maka hujan turun (mengumpul) pada suatu bidang datar seluas 1 meter persegi. Pulau-pulau Indonesia yang berlokasi di daerah tropis memiliki nilai curah hujan yang lebih tinggi pertahunnya, dan curah hujan yang lebih tinggi pada daerah pegunungan. (Mulyono, 2014)

Curah hujan yang tinggi pada daerah tropis biasanya berasal dari proses konvektif dan terbentuknya awan hujan panas. Hujan pada dasarnya disebabkan oleh pergerakan massa kelembaban ke atas. Supaya terjadi pergerakan ke atas tersebut atmosfer harus pada keadaan tidak stabil. Saat udara naik, kelembaban dan laju aliran udara ambien berada di antara laju lintasan adiabatik kering dan adiabatik jenuh, terjadi keadaan tidak stabil. Sebab itu, kestabilan pada udara bergantung pada kondisi kelembaban. Maka dari itu, curah hujan tahunan, durasi, intensitas, distribusi dan frekuensi dari waktu ke waktu sangat bervariasi. Terjadinya proses konvektif mengakibatkan intensitas curah hujan pada daerah tropis biasanya tergolong tinggi. Sementara itu di Indonesia persentase curah hujan berkisar dari 8% sampai dengan 37% dengan rata-rata 22%. Sebaliknya, curah hujan yang tertinggi di Bayern, Jerman adalah 3,7%. (Mulyono, 2014). Intensitas curah hujan adalah total air hujan per satuan waktu sepanjang periode hujan berjalan. Pengukuran intensitas curah hujan mengikuti rumus sebagai berikut:

$$I = \frac{R}{t} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana

- I = Intensitas curah hujan (mm/s)
- R = Presipitasi/jumlah curah hujan yang terukur (mm)
- t = Waktu (s)

Hal ini membuktikan bahwa terjadinya curah hujan akan mengakibatkan curah hujan yang berintensitas tinggi untuk jangka waktu tertentu. Air hujan biasanya dibagi menjadi 5 level sesuai dengan intensitas yang diukur, seperti terlihat pada tabel Klasifikasi curah hujan sesuai dengan standar internasional

World Meteorological Organization (WMO) (2008) dan tertera dalam Tabel 2.14 berikut ini.

Tabel 2. 14 Tingkatan Hujan Berdasarkan Intensitasnya (Sosrodarsno, 2003)

Keadaan Curah Hujan	Intensitas Curah Hujan (mm)	
	1 jam	24 jam
Sangat Ringan	<1	<5
Ringan	1 – 5	5 – 20
Sedang	5 – 10	20 – 50
Lebat	10 – 20	50 – 100
Sangat Lebat	>20	>100

## 2.15 Durasi Curah Hujan

Durasi hujan adalah waktu dari awal hujan sampai berakhirnya, biasanya dinyatakan dalam jam. Durasi hujan juga dapat dinyatakan dalam kejadian hujan (menit, jam, hari) yang diperoleh terutama dari hasil pencatatan alat pengukur hujan otomatis (*rain gauge*). Menurut Sri Harto (1993) terdapat dua jenis alat pengukur hujan yaitu alat penakar hujan biasa (*manual rain gauge*), dan alat penakar hujan otomatis (*automatic rain gauge*). Alat-alat tersebut harus dipasang sesuai dengan aturan yang ditetapkan oleh WMO (*World Meteorological Organization*) atau aturan yang disepakati secara nasional suatu negara.

## 2.16 Pengaruh Infiltrasi terhadap Stabilitas Lereng

Infiltrasi mengubah keadaan tanah dari jenuh sebagian (*unsaturated*) menjadi jenuh (*saturated*), menyebabkan tekanan air pori negatif (*suction*) turun menjadi nol ketika tanah benar-benar jenuh, menjadi tekanan air pori positif dalam tanah yang berada di bawah muka air tanah. Dengan meningkatnya tekanan air pori maka tegangan normal tanah menurun dan menyebabkan penurunan kuat geser tanah sehingga menurunkan stabilitas tanah (Hardiyatmo, 2006).

Menurut Hasrullah (2009), infiltrasi air hujan meningkatkan kadar air pada tanah, derajat kejenuhan tanah dan angka pori, dimana semakin lama hujan maka semakin besar peningkatannya. Keruntuhan lereng biasanya disebabkan oleh peningkatan regangan geser atau penurunan tegangan geser pada tanah.

Peningkatan kadar air yang disebabkan oleh hujan mengurangi daya hisap tanah (*Suction*) dan meningkatkan berat tanah. Infiltrasi curah hujan menyebabkan air masuk ke lereng, yang meningkatkan berat isi tanah (meningkatkan beban massa tanah), menurunkan atau menghilangkan tegangan hisap (*Suction*) di zona tak jenuh, meningkatkan tekanan air pori tanah, erosi internal, dan alterasi tanah. kandungan mineral penyusun massa tanah di dalam tanah dan lereng (Karnawati, 2006).

## 2.17 Aplikasi GeoStudio

Geostudio adalah rangkaian aplikasi pemodelan geoteknik dan geokologi. Yang terintegrasi sedemikian rupa sehingga hasil dari satu produk dapat digunakan untuk produk lainnya. Fiturnya yang unik dan kuat sangat memperluas jumlah masalah yang dapat dianalisis dan memberikan fleksibilitas dalam penyediaan modul untuk berbagai proyek sesuai kebutuhan. Terdapat beberapa versi Geostudio yang dapat digunakan, pada penelitian ini digunakan program bantu Geostudio dengan versi 2012.

### 2.17.1 SLOPE/W

Program komputer *SLOPE/W* merupakan bagian dari Geostudio yang bertugas untuk menganalisa SF (*safety factor*) lereng. Geostudio berasal dari Kanada dan dikembangkan oleh perusahaan swasta. *SLOPE/W* adalah program untuk menganalisis tingkat keparahan lereng, baik di tanah maupun di batuan, termasuk galian dan lereng. *SLOPE/W* dapat memodelkan dengan kondisi seperti berikut:

- Lapisan tanah yang kompleks.
- Kondisi tekanan air pori yang sangat tidak teratur.
- Beberapa model kekuatan geser tanah, Mohr- Coulomb, Anisotropic, dll
- Parameter Kuat geser pada kondisi tidak jenuh.
- Pendekatan dengan menggunakan bentuk bidang gelincir dengan atau tanpa tension crack.
- Beban terdistribusi merata, dan beban seismic.
- Perkuatan menggunakan struktur.

Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung faktor keamanan setiap potongan, sebaik perhitungan faktor keamanan seluruh longsoran. Dengan model kuat geser Mohr-Coulomb, *input* yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas lereng yaitu kohesi ( $\text{Kn/m}^3$ ), dan berat isi tanah ( $\text{Kn/m}^3$ ).

### **2.17.2 SEEP/W**

*SEEP/W* adalah program untuk analisis aliran rembesan air. Pemanfaatan bendungan meliputi perkolasi melalui badan dan pondasi bendungan, dan resapan melalui drainase dan sumur injeksi. Misalnya, *SEEP/W* dapat memodelkan kondisi berikut:

- Analisis rembesan dengan menggunakan *steady* dan *transient*.
- Tampilan 2 dimensi, *axisymmetric*, dan *plan*.
- Dapat menggunakan *Infinite element*.
- Kondisi batas berupa tekanan atau jumlah aliran air.
- Kondisi batas yang berubah dari waktu ke waktu.
- Penampilan garis phreatik dengan kondisi tidak jenuh di atasnya.
- Penginputan Infiltrasi akibat hujan.

Untuk melakukan analisis rembesan kondisi *steady* pada kasus bendungan urugan dengan *SEEP/W* masukkan yang dibutuhkan yaitu koefisien permeabilitas ( $\text{m/s}$ ), *total head* ( $\text{m}$ ), unit flux ( $\text{m/s}$ ). Hasil keluaran *SEEP/W* dapat dilihat dalam bentuk kontur, yaitu kontur *total head*, *pressure*, *pressure head*, *X-Velocity*, *Y-Velocity*, *X-Gradient*, *Y-Gradient*, *XY-Gradient*, *X-Conductivity*, *Y-Conductivity*, *Vol. Water Content*.

### **2.18 Penelitian Terdahulu**

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dan gambaran terkait metode, variabel, dan hasil yang sesuai dengan penelitian yang akan dilakukan:

Tabel 2. 15 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Hasil
1.	Muntaha dkk, (2018)	“Karakteristik Fisik Dan Mekanik Tanah Residual Balikpapan Utara Akibat Pengaruh Variasi Kadar Air”	<p><b>Metode</b> Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Tanah, Analisis tanah menggunakan <i>SLOPE/W</i></p> <p><b>Variabel</b> Sifat Fisik dan Mekanik Tanah</p> <p><b>Hasil</b> 1. Diperoleh hasil sifat fisik dan mekanik tanah pada kondisi inisial dan setelah pembasahan. 2. Perubahan kadar air mempengaruhi kohesi (c) dan berat volume (<math>\gamma</math>) tanah, ketika berat volumetrik tanah saat basah lebih tinggi dan kohesi menurun dan sebaliknya. 3. Perubahan kadar air mempengaruhi angka pori (e), Biasanya, ketiga tanah residu menunjukkan pola yang sama selama pengeringan, sedangkan angka pori meningkat selama</p>
2.	Pontoh, (2021).	“The effect of rainfall on the slope stability with numerical simulation on Tawaeli-Toboli road, Central Sulawesi”	<p><b>Metode</b> 1. Matrik <i>Suction</i> menggunakan grafik (SWCC). 2. Perubahan tekanan air pori dianalisis menggunakan program <i>SEEP/W</i>, analisis kestabilan lereng menggunakan program <i>SLOPE/W</i>. 3. Curah hujan maksimum dilakukan analisis frekuensi dengan bantuan software HAVARA, sedangkan durasi hujan dominan dianalisis menggunakan WindRose</p> <p><b>Variabel</b> Jenis tanah, Sudut Geser, Kohesi, Berat Jenis, Kadar air, porositas, konduktivitas hidrolis, Volume kandungan air, Derajat kejenuhan.</p> <p><b>Hasil</b></p>

No	Penulis	Judul	Hasil
			<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Durasi dan intensitas hujan mempengaruhi perubahan tekanan air pori.</li> <li>2. Lereng bagian barat merupakan penurunan keamanan yang paling signifikan, terutama pada saat hujan, karena nilai konduktivitas hidrolik tanah cukup besar untuk meningkatkan kecepatan infiltrasi.</li> </ol>
			<p><b>Metode</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uji hihap matric atau pengujian matric suction yang dilakukan di laboratorium menggunakan metode kertas saring. Hasil dari pengujian ini adalah penyesuaian parameter SWCC dengan <i>SoilVision</i>.</li> <li>2. Analisis curah hujan dengan program <i>WindRose</i>.</li> <li>3. Pemodelan curah hujan dalam analisis kapasitas infiltrasi menggunakan <i>Green Ampt infiltration method</i></li> </ol>
3.	Putra, dkk (2017)	<p>“Pengaruh Infiltrasi terhadap Parameter Tanah Jenuh Sebagian dalam Analisis Stabilitas Lereng”</p>	<p><b>Variabel</b> Kohesi (c), <math>\phi</math> (<math>\varphi</math>)</p> <p><b>Hasil</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hujan rata-rata dengan durasi lama adalah hujan yang paling besar pengaruhnya terhadap jumlah infiltrasi yang terjadi, sedangkan hujan rata-rata dan hujan lebat dengan durasi yang sama menghasilkan limpasan kumulatif yang relatif sama. Semakin besar infiltrasi, semakin besar perubahan tekanan air pori.</li> <li>2. Perubahan tekanan air pori mempengaruhi parameter kuat geser tanah, semakin tinggi tekanan air maka kohesi akan semakin rendah, sedangkan pada sudut gesek internal</li> </ol>

No	Penulis	Judul	Hasil
			relatif terhadap <i>matric suction</i> akan semakin tinggi.
			<p><b>Metode</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pengujian sifat fisik dan mekanik pada tanah, serta data curah hujan yang diperoleh dari stasiun terdekat dari lokasi penelitian.</li> <li>2. Analisis Rembesan (<i>SEEP/W</i>) dan Soil Water Characteristic Curve (<i>SWCC</i>)</li> <li>3. Analisis Kestabilan Lereng menggunakan program bantu <i>SLOPE/W</i></li> </ol> <p><b>Variabel</b></p> <p><math>\gamma_s</math> (<math>\text{g/cm}^3</math>), <math>\gamma_d</math> (<math>\text{g/cm}^3</math>), Berat Jenis (Gs), Vol Water Content, Ksat, Jenis Tanah, Kohesi (<math>\text{kg/cm}^2</math>), Sudut Geser Dalam, Intensitas Curah Hujan, Durasi Hujan</p> <p><b>Hasil</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Berdasarkan hasil simulasi tentang kestabilan lereng L1 memiliki nilai faktor keamanan <math>&gt; 1.25</math> yang dikategorikan dalam kategori aman, sedangkan pada lereng L2 memiliki nilai faktor keamanan antara 1.07-1.25 yang dikategorikan dalam kategori lereng kritis</li> <li>2. Peningkatan tekanan air pori permukaan yang diikuti dengan penurunan faktor keamanan simulasi pada lereng L1 mengakibatkan ketidakstabilan lereng yang tercermin dari penurunan nilai faktor keamanan hingga 30,6%, sedangkan fluktuasi variasi curah hujan simulasi pada L2 lereng hanya menghasilkan. dalam pengurangan 2% faktor keamanan.</li> </ol>
4.	Darajaat (2020)	“Pengaruh Intensitas Dan Durasi Hujan Terhadap Kestabilan Lereng Tanah Residual Vulkanik di Jalur Liwa-Kemuning, Lampung Barat”	
5.	Wibowo, Y. S. (2011)	Perilaku Sifat Fisik Dan Keteknikan Tanah	<p><b>Metode</b></p> <p>Uji lapangan : pengambilan contoh tanah dan uji CPT, sedangkan di laboratorium : Uji sifat fisik dan keteknikan tanah.</p>

No	Penulis	Judul	Hasil
		Residual Batuan Volkanik Kuarter Di Daerah Cikijing, Majalengka, Jawa Barat	<p><b>Variabel</b></p> <p>Nilai tekanan ujung konus (<math>qc</math>) dan friction ratio (<math>fr</math>). Dari nilai <math>qc</math> dan <math>fr</math> dapat diidentifikasi tipe tanah dan profil/stratifikasi tanah.</p> <p><b>Hasil</b></p> <p>Tanah residual pelapukan batuan breksi mempunyai ketebalan 1-1,6 m; dengan susunan tanah lempung, lanauan, pasir kasar dan batuan induk (breksi volkanik), yang termasuk kedalam tanah anorganik, dengan plastisitas rendah. Didominasi oleh mineral kaolinit yang bersifat tidak ekspansif dan tingkat pengembangan yang rendah.</p>

Pada penelitian ini akan menganalisis mengenai pengaruh intensitas dan durasi hujan terhadap stabilitas lereng pada tanah residual Balikpapan Utara, kondisi lereng diperoleh dari sampel pengujian tanah di Balikpapan Utara berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan referensi yang relevan dengan penelitian ini. Terdapat tiga lokasi sampel tanah residual Balikpapan Utara yang digunakan yaitu berada di kampus Institut Teknologi Kalimantan (ITK), perumahan Pondok Joang Indah (PJI) Balikpapan Utara, serta jalan Sei Wain Karang Joang Km.15. Data yang diperoleh kemudian diinputkan ke dalam program bantu *SLOPE/W* untuk mendapatkan angka keamanan pada lereng dengan kondisi inisial, dilakukan juga perhitungan secara manual menggunakan metode Bishop yang disederhanakan untuk memastikan nilai *output* dari program bantu *SLOPE/W* telah sesuai pada ketiga lokasi tanah residual tersebut. Setelah itu dilanjutkan dengan simulasi numerik menggunakan program bantu *SEEP/W* untuk memasukkan variasi intensitas dan durasi hujan yang ada terhadap permodelan yang telah dibuat sebelumnya. Data curah hujan yang digunakan diperoleh dari data curah hujan harian selama 20 tahun terakhir pada stasiun hujan Balikpapan berupa data hasil pengamatan BMKG. Selanjutnya dilakukan penentuan variabel intensitas hujan dengan melakukan analisis variasi intensitas hujan yang terjadi di Balikpapan. Sedangkan pada variabel durasi hujan diperoleh dari pengumpulan data 10 tahun

terakhir data klimatologi presipitasi yang terjadi di Balikpapan Utara. Pada simulasi numerik ini didapatkan perubahan tekanan air pori pada setiap model yang dibuat. Kemudian dilakukan analisis kembali menggunakan program bantu *SLOPE/W* dan didapatkan nilai angka aman pada lereng dengan kondisi setelah hujan pada ketiga lokasi tanah residual di Balikpapan Utara. Data tersebut dapat digunakan sebagai informasi kepada pembaca mengenai pengaruh intensitas hujan dan durasi hujan terhadap stabilitas lereng pada tanah residual Balikpapan Utara.

## 2.19 Posisi Penelitian

Posisi penelitian yang dilakukan terhadap penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.16 sebagai berikut:

Tabel 2. 16 Posisi Penelitian

Uraian	Muntaha dkk, (2018)	Pontoh, (2021).	Putra, dkk (2017)	Darajaat (2020)	Wibowo, (2011)	Penelitian yang dilakukan
Intensitas Hujan		√	√	√		√
Durasi Hujan		√	√	√		√
Tanah Residual	√			√	√	√
Indeks Properties Tanah	√	√	√	√		√
Kuat Geser Tanah	√	√	√	√	√	√
SF Kondisi Inisial ( <i>SLOPE/W</i> )	√	√	√	√		√
Tekanan Air Pori ( <i>SEEP/W</i> )		√	√	√		√
SF setelah Hujan		√	√	√		√



*"Halaman ini sengaja dikosongkan"*

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)