

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Pengaruh Hujan Terhadap Stabilitas Lereng**

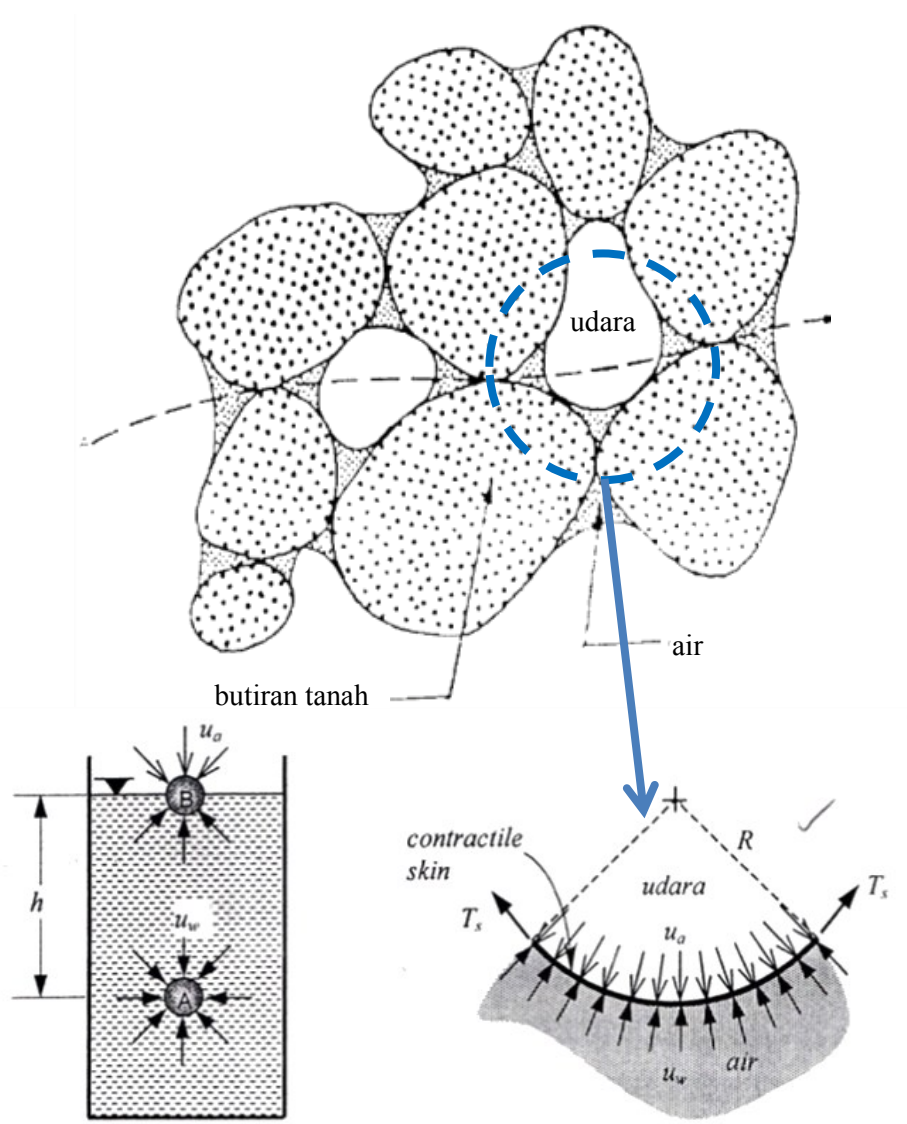
Infiltrasi air hujan ke dalam lapisan tanah pada lereng akan menambah beban pada lereng sebagai akibat peningkatan kandungan air dalam tanah, yang pada akhirnya memicu terjadinya longsoran (Pierson, 1980; Huang dan Lin, 2002). Muntohar dkk. (2013) menjelaskan bahwa infiltrasi pada lereng akan meningkatkan tekanan air pori, dan mengurangi kuat geser tanah. Kondisi ini menyebabkan terjadi keruntuhan lereng. Pada keadaan ini kuat geser tanah ditentukan oleh kuat geser residu (*residual shear strength*). Putra dkk. (2014) juga menyebutkan bahwa semakin tinggi infiltrasi yang terjadi, maka perubahan tekanan air pori akan semakin besar. Infiltrasi akan lebih berpengaruh secara signifikan bila kondisi awal tanah yang kering (memiliki derajat kejenuhan rendah) menuju kondisi basah dari pada tanah yang memiliki derajat kejenuhan yang tinggi.

Zhan dkk. (2004) dalam penelitiannya mengkaji pengaruh jenis tanah dan intensitas hujan terhadap stabilitas lereng. Secara umum dijelaskan proses infiltrasi air hujan ke dalam tanah dipengaruhi oleh nilai koefisien permeabilitas tanah jenuh air ( $k_s$ ). Semakin besar nilai  $k_s$  maka semakin cepat laju infiltrasi dan derajat kejenuhan tanah. Kestabilan lereng yang diukur dengan nilai faktor aman menunjukkan perubahan pola mengikuti pola intensitas hujan. Hossain (2013) menjelaskan bahwa pada permukaan lereng tak jenuh, infiltrasi air hujan mengurangi tekanan hisap (*matic suction*) seiring dengan durasi hujan. Intensitas hujan yang kecil namun memiliki durasi yang lama lebih berpengaruh terhadap stabilitas lereng daripada curah hujan dengan intensitas yang tinggi namun memiliki periode yang sebentar.

## B. Tanah Tak Jenuh Air dan Tekanan Hisap

### 1. Kondisi Tanah Tak Jenuh Air

Pada tanah tak jenuh air atau jenuh sebagian, sebagian pori-pori terisi oleh air dan sebagian lagi terisi oleh udara. Saat jenuh, pori-pori pada tanah akan terisi oleh air, sedang saat jenuh sebagian, batas antara air dan udara pori akan membentuk miniskus yang jari-jarinya di pengaruhi oleh ukuran tanah (Muntohar, 2009). Pada kondisi ini tekanan air pori ( $u_w$ ) akan lebih kecil dari tekanan udara pori ( $u_a$ ) akibat adanya tegangan permukaan (lihat pada Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Kondisi tanah pada keadaan tak jenuh sebagian

Tegangan efektif untuk tanah jenuh sebagian seperti dituliskan dalam persamaan 2.1.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.1)$$

dengan,

$\sigma'$  : tegangan efektif;

$\sigma$  : tegangan total;

$u_a$  : tekanan udara;

$u_w$  : tekanan air pori;

$(u_a - u_w)$  : tekanan hisap tanah (*matric suction*);

$\chi$  : parameter yang merupakan fungsi derajat kejenuhan (untuk tanah dalam keadaan jenuh air maka nilai derajat jenuh air  $S_r = 1$ , maka  $\chi = 1$ , dan bila tanah dalam keadaan kering  $S_r = 0$ ,  $\chi = 0$ ).

Mengacu pada kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb, kuat geser tanah pada kondisi jenuh sebagian dituliskan dalam persamaan 2.2.

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

dengan,

$\tau_f$  : kuat geser tanah;

$\sigma'$  : tegangan total;

$c'$  : kohesi tanah ;

$\phi'$  : sudut gesek internal tanah;

Substitusi tegangan efektif dalam persamaan 2.1. kedalam persamaan 2.2, maka :

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a)_f + \chi(u_a - u_w)_f] \tan \phi' \quad (2.3)$$

Vanaapalli dan Fredlund (2000) memberikan hubungan antara parameter tegangan efektif  $\chi$  dengan derajat kejenuhan berdasar parameter hasil uji kuat geser pada tanah lempung, lanau, dan pasir. Hubungan tersebut diberikan persamaan 2.4.

$$\chi = \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^k \quad (2.4)$$

Khalili dan Khabbaz (1998) mengusulkan nilai  $k=1$ , maka :

$$\chi = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (2.5)$$

dengan,

$\theta_w$  : kadar air volumetrik tanah;

$\theta_s$  : kadar air volumetrik tanah jenuh air;

$\theta_r$  : kadar air volumetrik tanah residu;

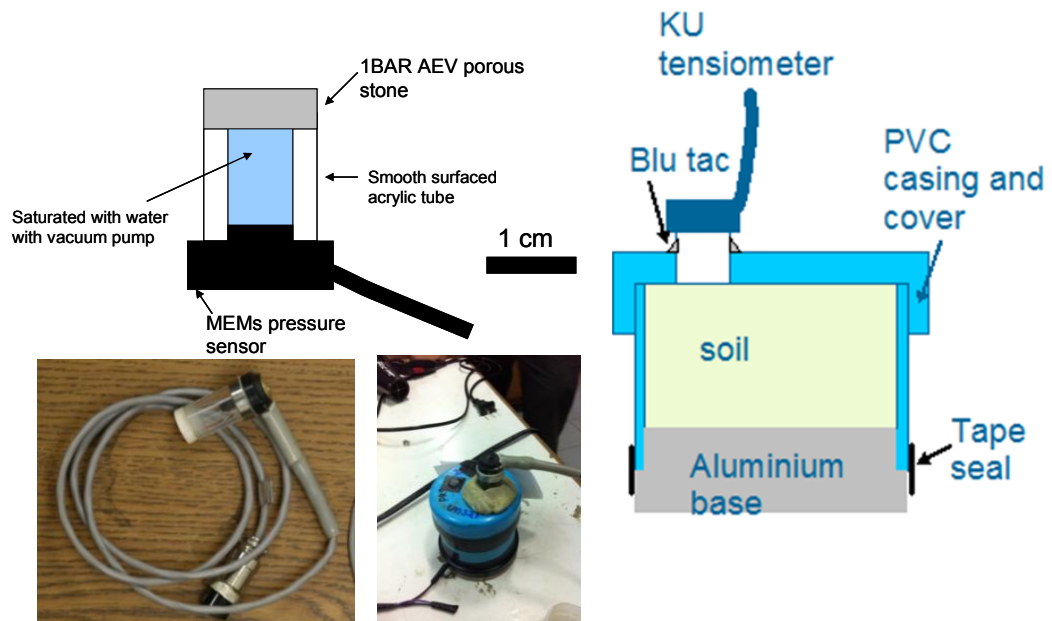
$S$  : derajat jenuh air pada nilai  $\theta_w$ ;

$\frac{S - S_r}{1 - S_r}$  : derajat kejenuhan efektif ( $S_e$ )

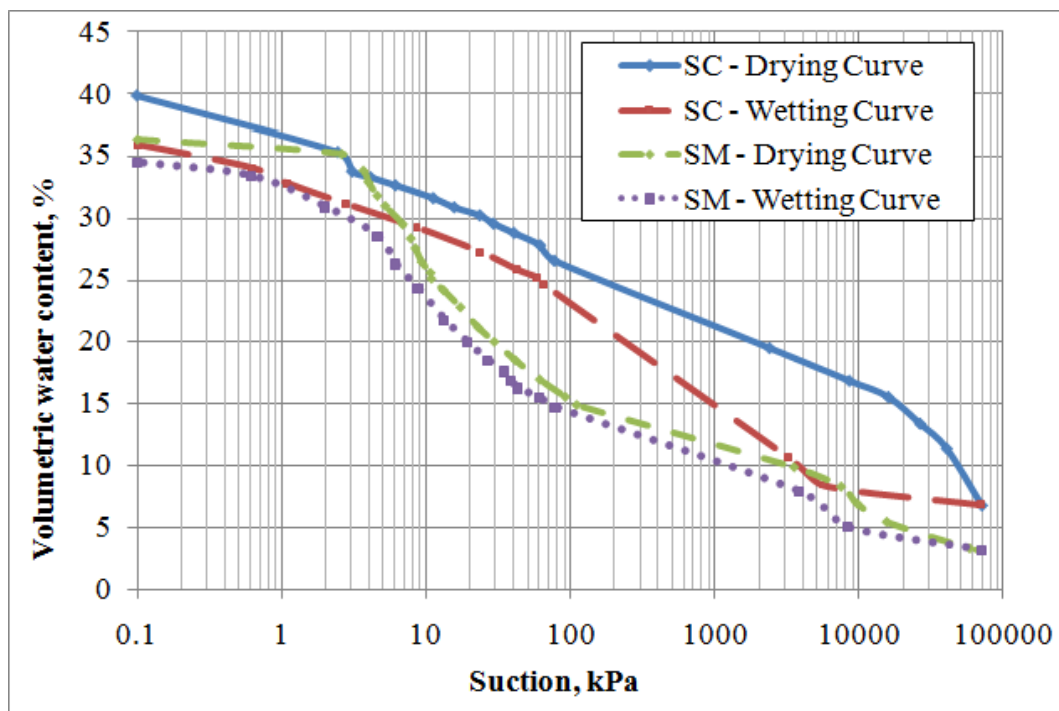
Persamaan-persamaan tersebut menunjukkan bahwa jika terjadi hujan pada tanah tak jenuh air, maka derajat kejenuhan air ( $S_r$ ) akan meningkat yang mana akan meningkatkan tekanan air pori ( $u_w$ ) sehingga  $(u_a - u_w)$  akan berkurang dan memperkecil kuat geser tanah, akibat selanjutnya, bila terjadi pada lereng adalah longsor pada lereng.

## 2. **Kurva Retensi Air-Tanah**

Menurut Jotisankasa dan Mairaing (2010) kurva retensi air-tanah (*soil – water retention curve*, SWRC) adalah fungsi yang mendiskripsikan hubungan antara *suction* ( $\psi$ ) atau hisapan dengan kadar air volumetrik ( $\theta$ ). Kondisi tanah basah dapat dinyatakan melalui derajat kejenuhan  $S_r$ , kadar air  $w$ , dan kadar air volumetrik  $\theta$ . SWRC ditentukan dengan pengujian di laboratorium menggunakan tensiometer pada beberapa kondisi kadar air tanah hingga mencapai jenuh air sempurna. Jotisankasa dkk. (2007) menggunakan miniature tensiometer untuk memperoleh SWRC. Model *miniature tensiometer* seperti disajikan pada Gambar 2.2. Tipikal SWRC hasil dari pengujian *miniature tensiometer* disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 2 Miniature tensiometer (Jotisankasa dkk., 2007)



Gambar 2. 3 Tipikal SWRC hasil pengujian miniature tensiometer (Jotisankasa dkk., 2007)

Untuk analisis numerik, Muntohar (2015) menyebutkan bahwa pengukuran SWRC dapat dimodelkan dengan persamaan-persamaan matematika seperti

model van Genuchten pada persamaan 2.6. SWRC dengan model persamaan *van Gunechten* memiliki parameter seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

$$\frac{\theta - \theta_a}{\theta_s - \theta_a} = \left[ 1 + |\alpha \psi|^n \right]^{-m} \quad (2.6)$$

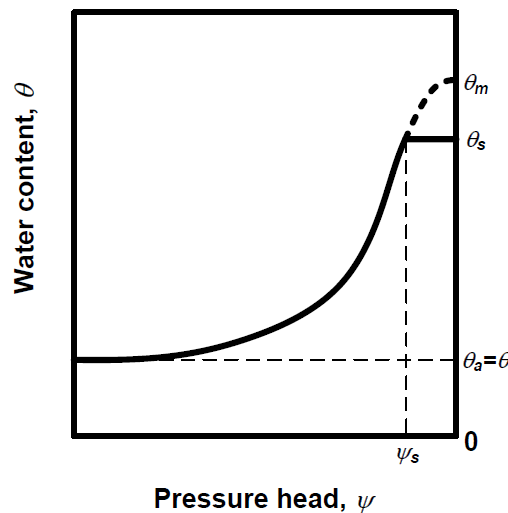
dimana

$$S_e = \left[ \frac{\theta - \theta_a}{\theta_s - \theta_a} \right] \quad (2.7)$$

dan,

$$m = 1 - 1/n \quad (2.8)$$

Persamaan diatas mengandung empat independen yaitu  $\theta_a = \theta_r, \theta_s, \alpha, n$ . Nilai  $\alpha$  dan  $n$  adalah parameter yang diperoleh dari kurva.



Gambar 2. 4 Estimasi SWRC model van Genuchten - Mualem

### C. Hubungan Antara Fasa Tanah

]Hubungan fasa tanah berkaitan dengan berat yaitu kadar air dan berat volume tanah. Kadar air ( $w$ ) atau jumlah kandungan air tanah didefinisikan sebagai perbandingan berat air dengan berat butiran tanah untuk suatu volume tanah, sedangkan berat volume tanah adalah berat total tanah per satuan volume total.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.9)$$

dengan,

$W_w$  : Berat air

$W_s$  : Berat butiran tanah

Berat volume tanah dalam keadaan basah ( $\gamma$  atau  $\gamma_t$ ) dinyatakan sebagai perbandingan berat tanah total (berat butiran dan air) terhadap volume total tanah. Persamaan 2.10 memberikan hubungan berat volume tanah.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.10)$$

Untuk suatu keadaan kadar air  $w$ , berat volume tanah dapat dinyatakan dalam berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ ) seperti dituliskan dalam persamaan 2.11.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.11)$$

Hubungan berat volume tanah dengan volume tanah dapat dinyatakan dalam angka pori ( $e$ ) dan porositas ( $n$ ) seperti dalam persamaan 2.12 dan 2.13.

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

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.13)$$

Dengan,

$G_s$  : berat jenis;

$\gamma_w$  : berat volume air.

Hubungan antar volume tanah dari angka pori terhadap derajat jenuh air ( $S_r$ ) dapat dituliskan dalam persamaan 2.14.

$$S_r = \frac{G_s \cdot w}{e} \quad (2.14)$$

#### D. Kuat Geser Tanah

Teori kuat geser yang lazim digunakan dalam analisis keruntuhan tanah adalah teori keruntuhan Mohr – Coulomb (Muntohar, 2009). Keruntuhan dalam suatu bahan dapat terjadi akibat kombinasi dari tegangan normal dan tegangan geser kritis, bukan salah satu dari tegangan normal maksimum atau tegangan

geser maksimum. Hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya dinyatakan menurut persamaan :

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.15)$$

dengan  $\tau$  adalah tegangan geser saat pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan dan  $\sigma$  adalah tegangan normal pada saat kondisi tersebut.

Coloumb (1776) menyebutkan bahwa bila tanah mengalami pembebanan akan di tahan oleh :

1. Kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tetapi jika tergantung dari tegangan vertikal yang bekerja pada bidang gesernya.
2. Gesekan antara butir butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan vertical pada bidang gesernya.

Atau dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2.16)$$

Dengan,

$\tau$  : kuat geser tanah

$\sigma$  : tegangan normal

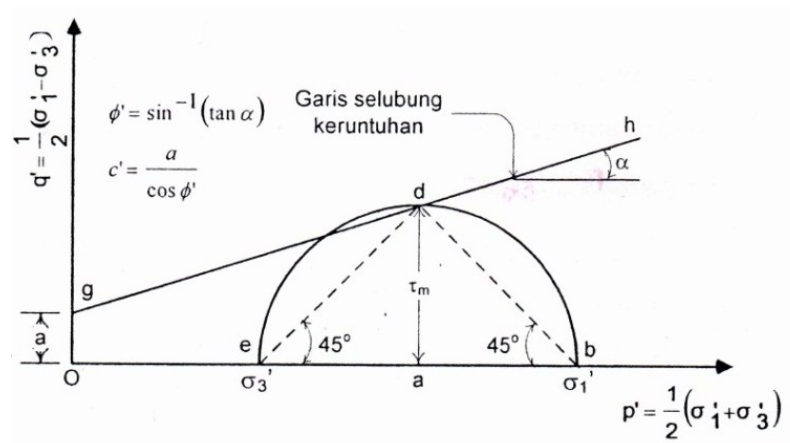
$\phi$  : kohesi tanah dalam definisi tegangan normal

Dalam kriteria keruntuhan mohr-columb, keruntuhan akan terjadi di setiap titik dalam tanah sebagai akibat adanya kombinasi antara tegangan normal dan tegangan geser. Untuk menggambarkan kondisi tegangan dapat juga di gambarkan dalam koordinat  $p'$  dan  $q'$  seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5, dimana  $p'$  merupakan tegangan geser dan  $q'$  adalah rata-rata dari tegangan-tegangan utama yang dinyatakan sebagai :

$$p' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad (2.17)$$

$$q' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad (2.18)$$





Gambar 2. 5 Modifikasi Lingkaran Mohr-Coloumb

Tegangan-tegangan utama yang ada dalam lingkaran mohr adalah tegangan utama mayor ( $\sigma_1$ ) dan tegangan minor ( $\sigma_3$ ) yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

Tegangan utama minor = tegangan utama sel = ( $\sigma_3$ )

Tegangan utama mayor, ( $\sigma_1$ ) =  $\Delta\sigma + \sigma_3$

Tegangan pada titik d berada pada suatu garis lurus yang merupakan kurva selubung keruntuhan yang telah dimodifikasi yang mana dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} = a + \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \tan \alpha \quad (2.20)$$

Dengan  $a$  dan  $\alpha$  adalah parameter kuat geser tanah modifikasi. Untuk itu parameter kuat geser tanah  $c'$  dan  $\phi'$  ditentukan dengan persamaan :

$$\phi' = \sin^{-1}(\tan \alpha) \quad (2.21)$$

$$c' = \frac{a}{\cos \phi'} \quad (2.22)$$

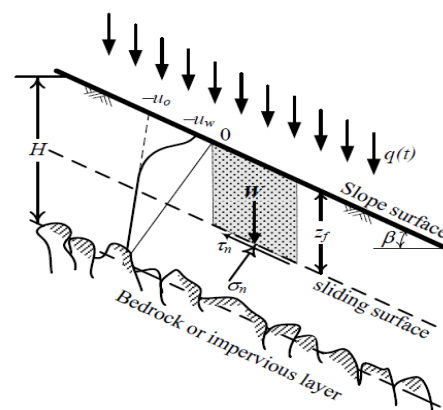
### E. Uji Triaksial Tak Terkonsolidasi – Tak Terdrainase

Uji triaksial merupakan jenis pengujian kuat geser tanah yang banyak digunakan dan sesuai untuk tanah kohesif dan tanah granuler serta batuan (Muntohar,

2009). Pada uji triaksial, tegangan-tegangan yang bekerja pada benda uji berada pada kondisi *axial-symmetry*. Pengujian triaksial pada kondisi tak terkonsolidasi-tak terdrainase atau unconsolidated-undrained (UU) pada prinsipnya pengujian ini serupa dengan pengujian CU namun benda uji tak perlu dilakukan proses konsolidasi selama penerapan tegangan sel  $\sigma_3$  dan tidak diperbolehkan terjadinya proses drainase air pori. Pada uji triaksial UU, tegangan deviator sama dengan beban aksial yang diberikan kepada benda uji yang dibagi dengan luas penampang yang sudah dikoreksi. Tegangan deviator diberikan pada benda uji hingga mencapai keruntuhan geser tanpa diperbolehkan terjadinya drainase. Tekanan air pori menjadi meningkat lagi yaitu  $\Delta_{ud}$  akibat penerapan tegangan deviator.

#### F. Analisis Stabilitas Lereng Tak Hingga

Metode analisis stabilitas lereng dengan model lereng tak-hingga dan pengaruh infiltrasi dapat memperhitungkan pengaruh perubahan tekanan air pori selama proses infiltrasi (Gambar 2.6). Mengacu pada kriteria Mohr-Coloumb untuk tanah tak jenuh air yang dituliskan dalam Fredlund *et al.* (1978), maka faktor aman lereng dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.26.



Gambar 2.6 Skema lereng tak hingga dan batas antara tanah tak jenuh

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi^b}{\gamma_t \cdot z_f \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (2.26)$$

Dengan,

$\gamma_t$  : berat volume tanah ;

$c'$  : sudut kohesi efektif tanah (kPa);

$\phi'$  : sudut gesek internal tanah (derajat)

$Z_f$  : kedalaman bidang keruntuhan (m),

$\beta$  : sudut kemiringan lereng (derajat),

$u_a$  : tekanan udara pori (kPa)

$u_w$  : tekanan air pori (kPa)

$u_a - u_w$  : *matric suction* (kPa)

$\sigma_n$  : tegangan normal total (kPa)

$\phi^b$  : sudut gesek terkait dengan kuat geser tanah akibat *matric suction*

Untuk model kuat geser tanah dalam kondisi tak jenuh air, Vanapalli dkk. (1996) mengusulkan hubungan antara kuat geser dan *suction* dengan memperhitungkan fungsi hidraulika tanah. Maka persamaan 2.26 dapat dituliskan kembali seperti pada Persamaan 2.27.

$$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot Z_f \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \left[ 1 + \frac{\psi \cdot \Theta}{\gamma \cdot Z_f \cdot \cos^2 \beta} \right] \quad (2.27)$$

Dimana,  $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$

Dengan  $\theta_r$  dan  $\theta_s$  masing-masing adalah kadar air volumetrik residu dan saat tanah jenuh air.

### G. Analisis infiltrasi menggunakan HYDRUS 1D

Hydrus 1D merupakan paket perangkat lunak untuk simulasi gerakan air, panas dan cairan dalam berbagai media jenuh yang dikembangkan oleh Department Of Environmental Sciences, University of California Riverside. Perangkat lunak terdiri atas program komputer HYDRUS dan grafik interaktif HYDRUS 1D. HYDRUS 1D dapat diterapkan untuk mensimulasikan aliran air dalam tanah pada kondisi tidak jenuh satu dimensi (Ma dkk., 2010).

Model infiltrasi satu dimensi didasarkan pada persamaan diferensial Richards (Persamaan 2.5) untuk mensimulasikan pergerakan air dalam media yang jenuh air. Persamaan ini diselesaikan dengan menggunakan metode numerik (Šimůnek *dkk.*, 2005). Persamaan dasar infiltrasi satu dimensi adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial \theta(\psi, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.28)$$

dimana  $\psi$  adalah tinggi tekaanan air porosi (*soil water pressure head*),  $\theta(\psi)$  merupakan kadar air volumetrik tanah (*volumetric water content*),  $t$  adalah waktu,  $z$  adalah koordinat vertikal dari permukaan tanah (bernilai positif bila ke atas), dan  $K(\psi)$  adalah koefisien permeabilitas tak jenuh air. Sifat-sifat hidraulika tanah tak jenuh air,  $\theta(\psi)$  dan  $K(\psi)$ , dalam Persamaan (2.4) merupakan fungsi non-linier terhadap tinggi tekanan air pori. Sifat-sifat hidraulika tanah dapat disajikan dalam bentuk model analitik seperti diusulkan oleh Brooks dan Corey, van Genuchten, Vogel and Císlerová, dan Kosugi.

## H. Laju Infiltrasi

Hubungan antara laju infiltrasi dan waktu digambarkan dalam suatu grafik untuk mendapatkan kapasitas infiltrasi. Hasil pengukuran laju infiltrasi tanah di lapangan dianalisis untuk mendapatkan laju infiltrasi tanah berdasarkan persamaan model Horton (1941) yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-Kt} \quad (2.29)$$

dengan :

$f(t)$  = laju infiltrasi pada waktu ke- $t$  (cm/jam),

$f_c$  = kapasitas infiltrasi konstan (cm/jam),

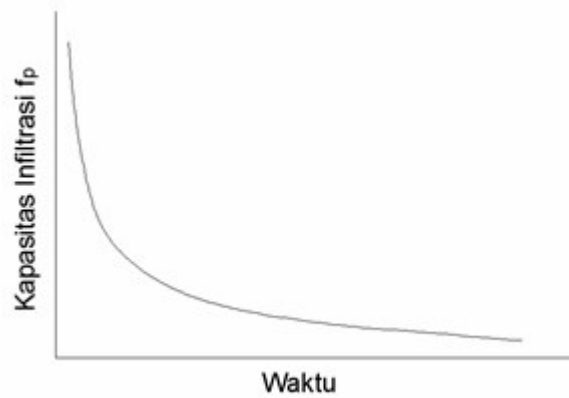
$f_o$  = kapasitas infiltrasi awal (cm/jam),

$t$  = waktu (jam).

Parameter  $f_c$ ,  $f_o$ , dan  $k$ , dalam persamaan 2.29 dapat ditentukan dengan regresi fungsi *exponential* dalam persamaan 2.30.

$$y = y_o + ae^{-bt} \quad (2.30)$$

dengan,  $f(t) = y$ ,  $(f_0 - f_c) = a$ ,  $f_0 = y_0$ , dan  $K = b$ . Metode kuadrat terkecil digunakan untuk menentukan koefisien regresi  $y_0$ ,  $a$ , dan  $b$ . Analisis regresi dapat dilakukan menggunakan *software* SigmaPlot.



**Gambar 2.7** Grafik hubungan antara waktu dengan kapasitas infiltrasi