

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian-peneitian terdahulu

Saputro (2014) menghitung pengaruh kedalaman muka air awal terhadap faktor aman pada lereng, perubahan tekanan air pori pada lereng dan perilaku kestabilan lereng terhadap muka air awal dengan perilaku adanya infiltrasi-rembesan induk Kalibawang dapat diketahui besarnya. Saputro (2014) menyatakan masing-masing jenis tanah tersebut memiliki koefisien permeabilitas jenuh (k_{sat}) yang berbeda-beda. Dalam penelitian ini, tekanan air pori negative (*initial matric suction*) awal pada lereng dibatasi 10 kPa, 23 kPa, 30 kPa, dan 50 kPa masing-masing untuk kerikil-berpasir, kerikil-berlanau, lanau-berpasir, dan lanau. Kemiringan tanah dianggap homogen 150 m panjang dengan tebal 2 m dan sudut kemiringan sebesar 20°, 30° dan 40° .

Untuk memodelkan penelitian ini digunakan analisis numerik dengan SEEP/W dan SIGMA/W yang merupakan perangkat lunak GeoSlope 5.

Dan didapatkan hasil: (1) Pada kondisi hujan 8 hari mengakibatkan adanya infiltrasi-rembesan sehingga menyebabkan permukaan tanah menjadi jenuh air pada kedalaman muka air tanah awal $H_{w(\text{init})} = 1 \text{ m}, 2 \text{ m}, 3 \text{ m}$, sedangkan pada kedalaman muka air tanah awal $H_{w(\text{init})} = 4 \text{ m}, 5 \text{ m}, 8 \text{ m}, 10 \text{ m}$ terjadi penundaan zona pembasahan (*wetting zone*) dan tidak terjadi perubahan muka air tanah. (2) Semakin dekat kedalaman muka air tanah ke permukaan lereng, faktor aman awal yang diperoleh semakin rendah. (3) Posisi muka air tanah yang lebih dekat dengan permukaan lereng menyebabkan penurunan *suction* yang lebih cepat akibat hujan. kedalaman muka air tanah berkisar 4-5 meter atau *suction* sebesar 50 kPa yang merupakan batas *initial suction* yang disarankan di permukaan lereng.

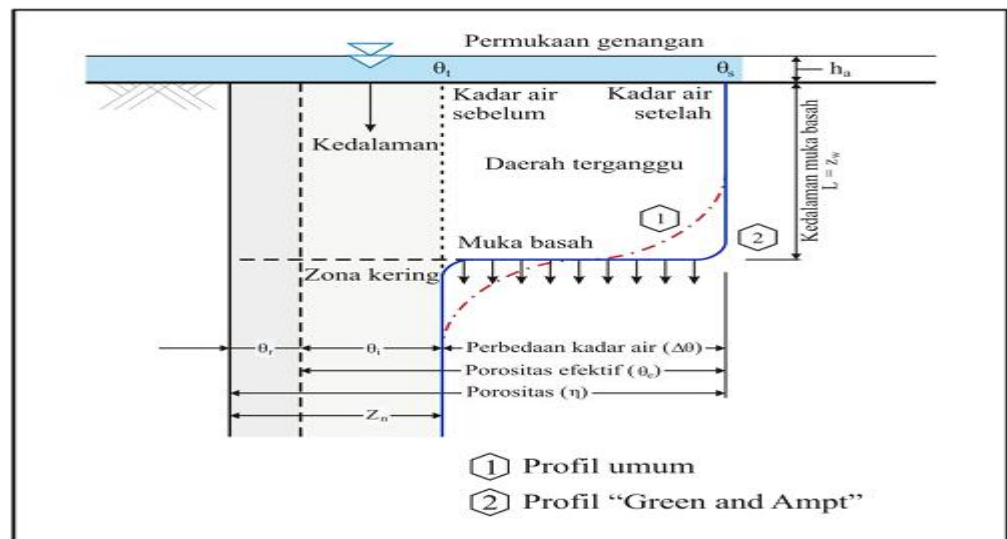
MUNTOHAR & IKHSAN (2015) Curah hujan mengakibatkan tanah longsor beberapa upaya telah dilakukan untuk menganalisa curah hujan dan menginduksi tanah longsor, salah satunya dengan menggunakan analisis kopling antara faktor aman (FS) dan laju Infiltrasi $F(t)$, pada rembesan dan analisis stabilitas lereng. Model umum untuk mengevaluasi stabilitas lereng saat hujan adalah analisis kompleks tentang pemodelan infiltrasi pada tekanan air pori selama hujan Muntohar & Ikhsan (2013). Beberapa peneliti menerapkan pemodelan numerik seperti metode elemen hingga (FEM) untuk menilai curah hujan yang menyebabkan tanah longsor.

Model FEM yang diusulkan telah berhasil memperkirakan infiltrasi dan kemiringan stabilitas lerengnya selama curah hujan berlangsung. Infiltrasi dalam penelitian ini dihitung menggunakan metode *Green Ampt*. Untuk lereng dengan permeabilitas tinggi yang konduktivitas hidrolis tanah jenuh (k_{sat}) lebih besar dari intensitas curah hujan (I_t), $k_{sat} > I_t$, dan infiltrasi yang tetap untuk pola curah hujannya. Tetapi untuk kemiringan lereng yang memiliki permeabilitas rendah, konduktivitas hidrolis tanah jenuh (k_{sat}) lebih rendah dari intensitas curah hujan (I_t), $k_{sat} < I_t$ dan infiltrasi air hujan tergantung pada pola curah hujannya.

Untuk lereng kemiringan 40° , faktor keselamatan terpantau tergantung pada pola curah hujannya. Faktor keselamatan diperoleh dari model yang diusulkan adalah 5% lebih rendah dari hasil yang diperoleh dari perhitungan FEM. Berbeda dengan kemiringan permeabilitas yang tinggi, model yang diusulkan menghasilkan faktor yang lebih rendah dari keamanan untuk lereng permeabilitas yang rendah, jika dibandingkan dengan perhitungan FEM.

B. Model Infiltrasi Green And Ampt

Pada awalnya model infiltrasi Green and Ampt dikembangkan untuk mengetahui tingkah laku infiltrasi air dalam tanah pada permukaan yang horizontal. Chen dan Young (2006) telah melakukan modifikasi terhadap persamaan model infiltrasi Green and Ampt pada permukaan tanah yang memiliki kemiringan tertentu, sehingga model infiltrasi Green and Ampt dapat diterapkan pada lereng (slope).



Gambar 2.1 Profil Green and Ampt (Chow dkk., 1988)

Pada Gambar 2.1 menampilkan gambar sederhana dari model Green dan Ampt, dimana zona pembasahan (z_w) adalah sebuah wilayah yang memiliki kadar air sebelum (θ_i) dan porositas (η) pada kondisi jenuh. Zona pembasahan terus merembes sampai pada kedalaman tertentu (L) dalam waktu (t) sejak infiltrasi dimulai. Air menggenang sampai pada kedalaman yang dangkal (h_o) di atas permukaan tanah.

Modifikasi yang dilakukan Chen dan Young (2006) terhadap persamaan *Green and Ampt* untuk persamaan perhitungan aliran air di bawah permukaan tanah adalah:

- Persamaan model Green Ampt untuk permukaan tanah horisontal:

$$F(t) - (\psi_f \cdot \Delta\theta) \ln\left[1 + \frac{F(t)}{(\psi_f \cdot \Delta\theta)}\right] = k \cdot t \quad 1$$

$$f(t) = k \left[1 + \frac{\psi_f \cdot \Delta\theta}{F(t)}\right] \quad 1a$$

- Persamaan model Green Ampt yang dimodifikasi pada kemiringan permukaan tanah:

$$F(t) - \frac{(\psi_f \cdot \Delta\theta)}{\cos \alpha} \ln\left[1 + \frac{F(t) \cos \alpha}{\psi_f \cdot \Delta\theta}\right] = k \cos \alpha \cdot t \quad 2$$

$$f(t) = k \times \left[\cos \beta + \frac{(\psi_f \times \Delta\theta)}{F(t)}\right] \quad 2a$$

$F(t)$: Kumulatif infiltrasi pada waktu t (mm)

$f(t)$: Laju potensial infiltrasi pada waktu t (mm/jam)

k : Koefisien permeabilitas (mm/jam)

k_y : $k \cos \beta$ (mm/jam)

t : Satuan waktu (jam)

β : Sudut kemiringan lereng ($^\circ$)

$\Delta\theta$: Perbedaan kadar air sebelum dan ketika hujan (%)

Ψ_f : Tinggi tekanan air pori negatif pada zona pembasahan (mm)

Model Green – Ampt di asumsikan untuk memenuhi kondisi-kondisi sebagai berikut :

- 1) Tekanan air pori negatif (ψ_f) adalah tetap
- 2) Perbedaan kadar air volumetrik ($\Delta\theta$) adalah seragam antara sebelum dan sesudah basah
- 3) Koefisien konduktivitas hidraulik (k) adalah tetap dan sama dengan konduktivitas hidraulik jenuh (k_s)

Mein dan Larson (1973) memberikan sebuah metode untuk menentukan infiltrasi pada kondisi tetap atau intensitas air hujan yang konstan. Akan tetapi penentuan infiltrasi pada kondisi tidak tetap atau intensitas hujan yang

bervariasi juga dapat dilakukan menggunakan metode ini (Bouwer, 1978; Chow et al.1988). Infiltrasi kumulatif dihitung dari curah hujan sebagai fungsi waktu. Potensi infiltrasi dapat dihitung dari infiltrasi komulatif menggunakan persamaan (3) selama hujan berlangsung.

- 1) Kondisi (1): Intensitas hujan $I(t)$ lebih besar dari laju infiltrasi potensial $f(t)$. Permukaan tanah menjadi jenuh pada keseluruhan interval waktu (Δt) . Sehingga jumlah air hujan yang terinfiltrasi dapat dihitung menggunakan persamaan (3)

$$F(t + \Delta t) - F(t) - \Delta\theta\psi f \cdot \ln\left[\frac{F(t + \Delta t) + (\Delta\theta\psi f)}{(F(t) + \Delta\theta\psi f)}\right] = K_s \cdot \Delta t \quad (3)$$

- 2) Kondisi (2) : Intensitas hujan $I(t)$ lebih rendah dibandingkan potensi laju infiltrasi $f(t)$ pada permulaan interval waktu tertentu, tetapi kemudian, menjadi lebih besar dibandingkan dengan potensi laju infiltrasi. Akibatnya permukaan tanah menjadi jenuh air pada interval waktu tersebut (Δt) . Oleh karena itu, jumlah air hujan yang terinfiltrasi dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi jenuh dapat dihitung menggunakan masing – masing persamaan(4) dan (5) yaitu :

$$F(t)_{t=t'p} = \frac{K_s(\Delta\theta\psi f)}{I(t) - K_s} \quad (4)$$

$$t'p = \frac{F|t'p| - F(t)}{I(t)} \quad (5)$$

- 3) Kondisi (3) : Intensitas hujan $I(i)$ lebih kecil dibandingkan dengan laju infiltrasi potensial $f(t)$ selama selang waktu tertentu. Pada kondisi seperti ini, permukaan tanah berada pada kondisi tak jenuh dan semua air hujan terinfiltrasi ketanah. Sehingga jumlah infiltrasi adalah sama dengan intensitas hujan dan hujan terakumulasi.

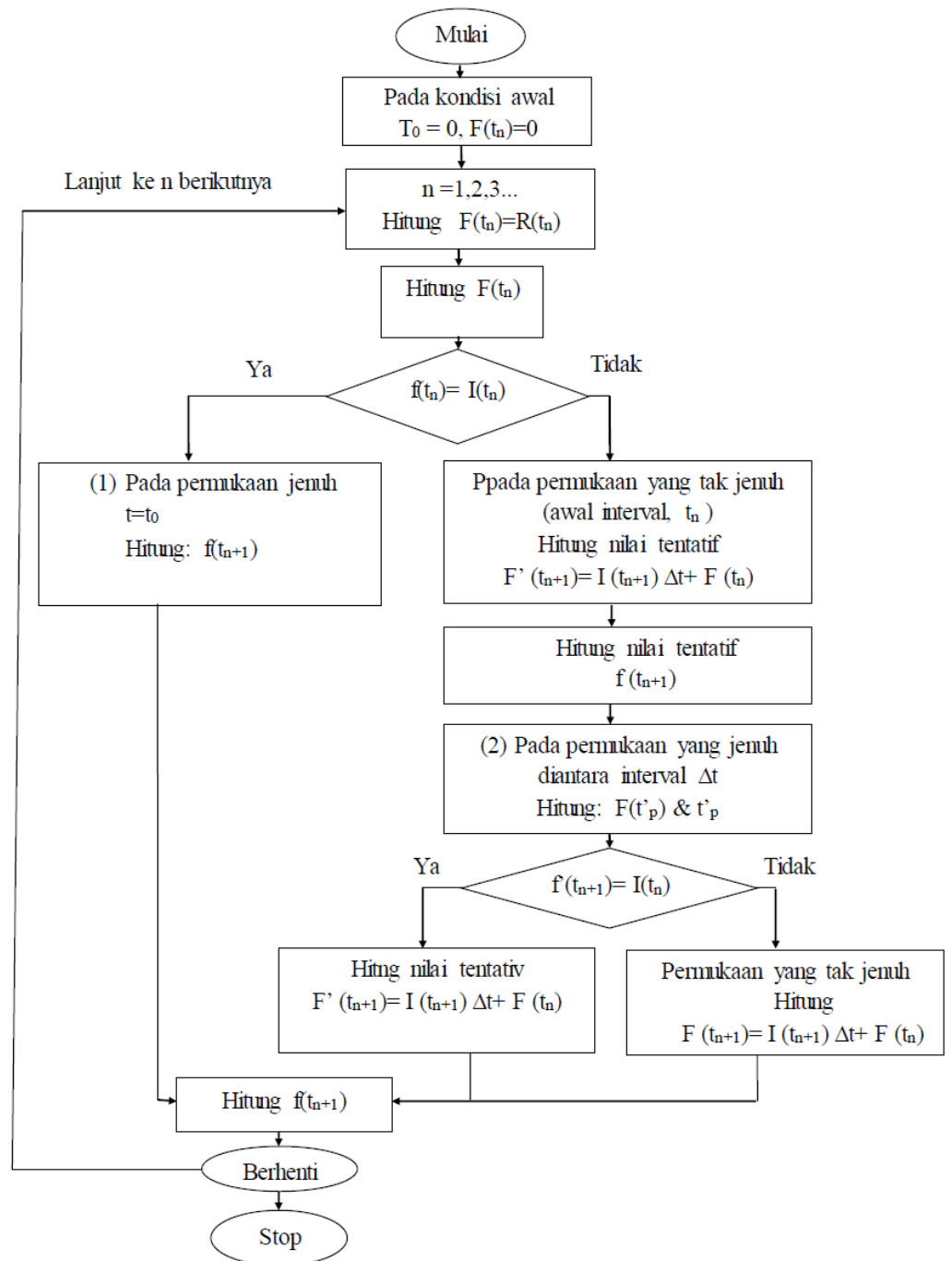
$$F(t) = F(t - \Delta t) + (I(t) \times \Delta t) \quad (6)$$

Notasi persamaan – persamaan diatas :

- $F(t)$ = Infiltrasi komulatif pada saat t ,
- $I(t)$ = Intensitas hujan pada saat t ,
- $f(t)$ = potensi laju infiltrasi pada saat t ,
- $\Delta\theta$ = beda kadar air tanah = $\theta_s - \theta_i$
- Ψf = tinggi tekanan air pori negatif pada bidang pembasahan,
- k_s = koefisien permeabilitas tanah pada kondisi jenuh air,
- Δt = interval waktu hujan
- $t'p$ = waktu terjadinya genangan pada interval waktu Δt
- $F(t'p)$ = infiltrasi komulatif psds saat $t'p$.
- $F(t - \Delta t)$ = Komulatif infiltrasisebelumnya (mm)

Bidang longsor dapat terjadi pada bidang pembasahan. Maka, dalam penelitian ini kedalaman bidang longsor dianggap sama dengan kedalaman bidang pembasahan. Sehingga, $H = Z_w$ yang nilainya ditentukan nilai persamaan (7) yang mana bervariasi dengan waktu.

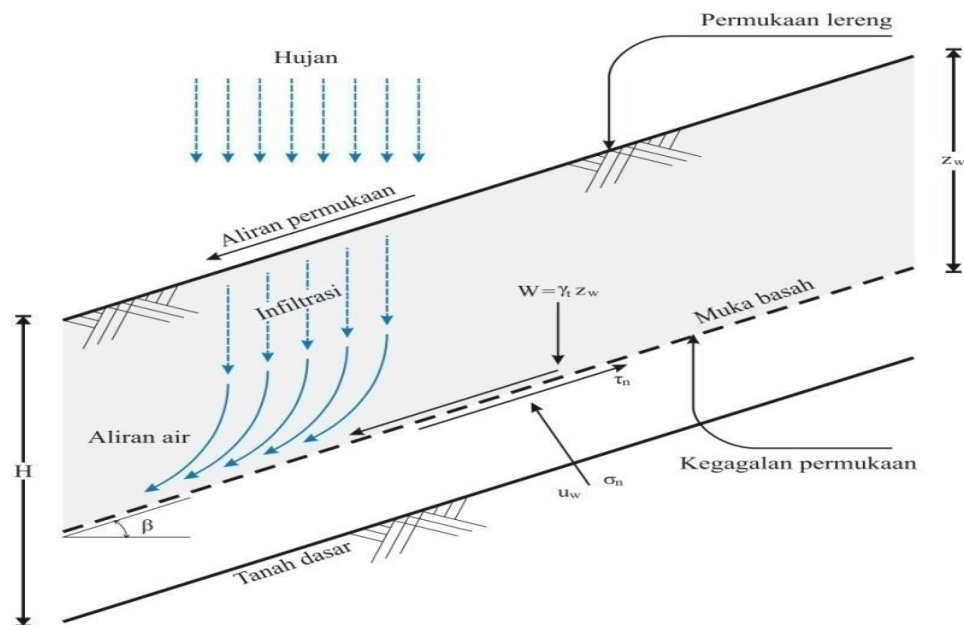
$$Z_w(t) = \frac{F(t)}{\Delta\theta} \quad (7)$$



Gambar 2.2. bagan alir perhitungan filtrasi
(Muntohar dkk 2013)

C. Model Stabilitas Lereng

Saat terjadi hujan, air hujan akan terinfiltrasi ke dalam permukaan tanah secara terus-menerus pada daerah yang tidak jenuh air di bagian atas. Proses ini menghasilkan zona pembasahan di daerah dengan kedalaman tertentu di sekitar permukaan tanah dan mungkin menyebabkan kegagalan lereng selama periode hujan. Kegagalan lereng dianggap terjadi dalam bentuk longsoran atau gelinciran berbentuk paralel terhadap permukaan lereng. Karena itu analisis selanjutnya akan menggunakan model lereng tak terhingga (*infinite slope model*) yang ditunjukkan oleh gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Model Lereng Tak Terhingga (*Infinite Slope Model*)
(Muntohar dan Liao, 2008)**

Pada analisis lereng menggunakan model lereng tak terhingga (*infinite slope model*) diharapkan dapat mengetahui nilai faktor keamanan (*safety factor*). Dimana faktor keamanan merupakan nilai perbandingan antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan. Sebuah lereng dapat dikatakan stabil jika nilai faktor keamanan > 1 dan tidak stabil faktor keamanan suatu lereng jika ≤ 1 .

Berdasarkan tingkah laku dari tanah yang tidak jenuh air, faktor keamanan (*safety factor*) terhadap kelongsoran lereng akan diperkirakan menggunakan kriteria dari *Mohr-Coulumb failure* (Fredlund dkk., 1978).

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a) \times \tan \phi' + (u_a - u_w) \times \tan \phi^b}{\gamma_t \times z_w \times \sin \beta \times \cos \beta} \quad (7)$$

FS : Faktor keamanan

c' : Kohesi tanah efektif (kPa)

σ_n : Tegangan normal (kPa)

u_a : Tekanan udara normal (kPa)

ϕ' : Sudut gesek internal antar butiran pada kondisi jenuh ($^\circ$)

u_w : Tekanan air pori (kPa)

ϕ^b : Sudut gesek internal antar butiran pada kondisi kering ($^\circ$)

γ_t : Berat volume tanah total (kN/m^3)

z_w : Kedalaman muka basah (mm)

β : Sudut kemiringan lereng ($^\circ$)

Seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (7), matrik tekanan menurun berdasarkan peningkatan kadar air dan menjadi 0 ketika tanah jenuh air. Nilai dari ϕ^b berhubungan dengan matrik tekanan ϕ^b ; hampir sama dengan sudut gesek internal antar butiran ϕ' dari tanah dengan tekanan rendah (Fredlund dkk., 1978). Dalam kasus ini, ϕ^b diasumsikan memiliki kesamaan dengan ϕ' , u_a adalah tekanan atmosfer dan $(u_a - u_w) = \Psi_f \gamma_t$. Tegangan normal, $\sigma_n = \gamma_t z_w \cos^2 \beta$, sehingga persamaan (7) akan menjadi:

$$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + \frac{c' + \Psi_f \times \gamma_t \times \tan \phi'}{\gamma_t \times z_w \times \sin \beta \times \cos \beta} \quad (8)$$

- FS : Faktor keamanan
 ϕ' : Sudut gesek internal antar butiran pada kondisi jenuh ($^{\circ}$)
 β : Sudut kemiringan lereng ($^{\circ}$)
 C' : Kohesi tanah efektif (kPa)
 Ψ_f : Tinggi tekanan air pori negatif pada muka basah (mm)
 γ_t : Berat volume tanah total (kN/m^3)
 z_w : Kedalaman muka basah (mm)

Proses infiltrasi lapisan tanah di dangkal pada permukaan lereng dapat menyebabkan keruntuhan lereng selama hujan terjadi. Jenis keruntuhan lereng biasanya terjadi dalam bentuk sliding atau tergelincir yang sejajar dengan permukaan lereng, sehingga dapat dianalisis sebagai model kemiringan tak terbatas. Model kemiringan tak terbatas juga praktis untuk menilai longsor dangkal Muntohar dan Liao (2009). Konsep ini umumnya berlaku untuk kasus longsor dengan kedalaman dangkal. Faktor keselamatan, FS , dari kemiringannya dan persamaannya sebagai berikut:

$$FS = \frac{c' + (\gamma_t z_w \cos^2 \alpha + \psi_f \cdot \gamma_w) \tan \phi'}{\gamma_t z_w \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{untuk } z_w < H \quad (9a)$$

$$FS = \frac{c' + (\gamma_t H \cos^2 \alpha - \psi_f \cdot \gamma_w) \tan \phi'}{\gamma_t H \cos \alpha \sin \alpha} \quad \text{untuk } z_w \geq H \quad (9b)$$

- FS : Faktor keamanan
 c' : Kohesi tanah efektif (kPa)
 γ_t : Berat volume tanah total (kN/m^3)
 z_w : Kedalaman muka basah (mm)
 ϕ' : Sudut gesek internal antar butiran pada kondisi jenuh ($^{\circ}$)
 α : Sudut kemiringan lereng ($^{\circ}$)

Analisis infiltrasi 1D dan stabilitas lereng dilakukan berdasarkan model infiltrasi Green – Ampt sebagaimana telah diuraikan sebelumnya. Penyelesaian model infiltrasi, tekanan air pori, dan stabilitas lereng. Digunakan perangkat lunak MATLAB version 7.6.0.324 R2008a digunakan untuk perhitungan stabilitas lerengnya.

D. Analisis Realiabilitas Stabilitas Lereng

Keandalan atau reabilitas (realibility) adalah probabilitas (probability) suatu obyek atau sistem yang unjuk kerjanya memenuhi fungsi yang sesuai untuk suatu kondisi dan periode waktu tertentu (Harr, 1989). Dengan demikian dalam hal ini, reabilitas suatu lereng merupakan probabilitas yang menyatakan kondisi lereng tetap stabil dibawah kondisi tertentu. Dalam analisis reabilitas, fungsi unjuk kerja $G(X)$ pada lereng dapat dinyatakan dengan persamaan faktor aman seperti pada persamaan (10)

$$G(X) = \frac{c' + (\gamma t \cdot Zw \cdot \cos^2 a - uw) \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot Zw \cdot \sin a \cdot \cos a} \quad (10)$$

Variabel $X = \{x_1 \dots x_n\}$ terdiri atas n variabel acak sebagai parameter masukan dalam analisis stabilitas lereng. Variabel – variabel tersebut adalah $X_i = \{\alpha_i, C_i', \Phi_i', \gamma t, i, Hb, i, Ks, i, \Psi f, i, \Delta \Theta_i\}$. Fungsi $G(X, t)$ menyatakan unjuk kerja atau kondisi dari lereng yang merupakan fungsi dari waktu t . Suatu lereng dinyatakan stabil apabila $G(X, t) > 0$, sebaliknya dinyatakan tidak stabil atau mengalami keruntuhan apabila $G(X, t) < 1$, dan berada pada kondisi batas jika $G(X, t) = 1$, yang mana disebut kondisi lereng.

Index reabilitas β terhadap stabilitas lereng dapat dinyatakan dalam persamaan (11) apabila distribusi probabilitas dari faktor aman berupa fungsi distribusi normal. Sedangkan apabila distribusi probabilitas dari faktor aman berupa fungsi distribusi lognormal, nilai β diberikan oleh persamaan (12).

$$\beta = \frac{\mu_{F_s(X, t)}^{-1}}{\sigma_{F_s(X, t)}} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\ln[\mu_{F_s(X,t)} / \sqrt{1 - (\sigma_{F_s(X,t)} / \mu_{F_s(X,t)})^2}]}{\sqrt{\ln[1 + (\sigma_{F_s(X,t)})^2]}} \quad (12)$$

dengan $\mu_{F_s(X,t)}$ dan $\sigma_{F_s(X,t)}$ adalah nilai rata – rata dan deviasi standar dari faktor aman hasil simulasi Monte Carlo. Kemudian, probabilitas keruntuhan dapat dihitung dari nilai indeks reabilitas yang telah diperoleh dari persamaan (9) atau (12) dengan menggunakan persamaan (13) probabilitas keruntuhan didefinisikan sebagai probabilitas untuk faktor aman minimum kurang dari satu yaitu $Pf = P(F_s < 1)$

$$Pf = 1 - \sigma(\beta) \quad (13)$$

Dengan $\Phi(\beta)$ adalah fungsi distribusi kumulatif untuk masing – masing jenis distribusi probabilitas (*normal* atau *lognormal PDF*) dari nilai β .

U.S.Army Corps of Engineers (1997) memberikan suatu paduan umum untuk mengukur suatu tingkat kerja dari suatu komponen dan sistem geoteknik berdasarkan nilai indeks reabilitas β dan probabilitas keruntuhan Pf seperti disajikan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hubungan antara reabilitas dan probabilitas keruntuhan (U.S. Army Corps of Engineers, 1997)

Indek Reliabilitas, β	Probabilitas keruntuhan $Pf = \Phi(-\beta)$	Tingkat Unjuk Kerja Sistem
1,0	0,16	Bahaya (<i>hazardous</i>)
1,5	0,07	Tidak Memuaskan (<i>Unsatisfactory</i>)
2,0	0,023	Buruk (<i>poor</i>)
2,5	0,006	Dibawah rata-rata (<i>Below Average</i>)
3,0	0,001	Diatas rata-rata (<i>Above Average</i>)
0,4	0,00003	Baik (<i>Good</i>)
0,5	0,0000003	Tinggi (<i>High</i>)