

# PENGARUH KONDISI VEGETASI DAN GEOLOGI TERHADAP GERAKAN TANAH DENGAN PEMICU HUJAN

Dwikorita Karnawati<sup>1</sup>

## ABSTRAK

*The objective of this study was to analyze the role of vegetations in controlling rain-induced landslides. Slope stability analysis based on limit equilibrium concept was adopt to execute such analysis.*

*Numerical model by applying COMBINED HYDROLOGY AND STABILITY MODEL (CHASM) was applied to simulate the changing of slope stability in response to rain infiltration under the control of specific vegetation types. Three different slope models consisting of bedrock of andesitic breccia overlain by clay with various slope inclinations, 15°, 30° dan 45° were selected to be subjected to the various rain intensity of 20 mm/ day, 50 mm/ day, 100 mm/ day dan 160 mm/day.*

*The simulation results showed that bamboo, cassava, paddy (without irrigation) and vetiver significantly prevented the rain-induced landslides only on the gentle slope (being less steep than 45°). In the slope which was steeper than 45° roles of slope inclination and stratigraphy as well as geotechnical properties of rock/ soil forming the slope were more significant than the role of vegetation in controlling slope stability. It was also apparent that paddy with irrigation significantly reduced the slope stability on gentle slope (15°), despite only low rain intensity (20mm/day) applied. Indeed, the rainfall had no important role in inducing landslide on such gentle slope. Those simulation and analysis results were also evaluated by comparing to the real rain-induced landslide cases occurring in several sites in Indonesia.*

## PENDAHULUAN

Sebagian besar wilayah yang rentan gerakan massa tanah di Indonesia merupakan wilayah perbukitan/ pegunungan dengan mata pencaharian pertanian. Berdasarkan kenyataan ini maka perlu dilakukan upaya pengendalian gerakan tanah dengan pendekatan rekayasa vegetatif, selain rekayasa geologi/ geoteknik. Sebagai langkah awal dalam pengembangan rekayasa vegetatif untuk perlindungan ataupun perkuatan lereng, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis pengaruh vegetasi terhadap kestabilan lereng pada kondisi geologi dan hujan tertentu.

## LANDASAN TEORI

Proses gerakan massa tanah/ batuan, yang lebih dikenal sebagai proses longsor pada lereng, terjadi karena kestabilan pada suatu lereng terganggu. Karnawati (1996) menjelaskan bahwa gangguan kestabilan lereng dapat terjadi karena dikontrol oleh interaksi berbagai pengaruh yang berkaitan dengan kondisi iklim, morfologi, geologi, struktur geologi, hidrogeologi dan tata guna lahan. Fakta menunjukkan bahwa lebih dari 70 % kejadian longsor di Indonesia adalah akibat dipicu oleh hujan. Oleh karena itu pembahasan dalam makalah ini lebih ditekankan pada upaya penanggulangan gerakan tanah yang dipicu oleh infiltrasi hujan.

Air hujan yang meresap ke dalam pori-pori antar partikel tanah, mengakibatkan terjadi pengurangan

*suction. Suction* adalah tegangan sedot yang terbentuk akibat tegangan permukaan hasil interaksi antara air yang menyelubungi partikel tanah dengan permukaan partikel tanah tersebut, sehingga *suction* bersifat menguatkan ikatan antar partikel tanah. Infiltrasi hujan juga dapat mengakibatkan peningkatan tekanan air pori dalam rongga antar partikel tanah, sehingga ikatan antar partikel tanah tersebut semakin lemah dan akhirnya massa tanah menjadi runtuh atau bergerak longsor (Gostelow, 1991; Premchit, 1995; dan Karnawati 1996, 1997). Efektifitas hujan dalam memicu keruntuhan massa tanah tergantung besarnya curah hujan dan lamanya hujan, serta tergantung tingkat kelulusan air pada tanah dan kondisi kejenuhan air dalam lereng sebelum hujan.

Vegetasi diduga dapat berperan dalam memperkuat massa tanah pada lereng dalam melawan gerakan. Beberapa penelitian yang mulai menyelidiki pengaruh akar tanaman kayu dalam memperkuat lereng telah dilakukan oleh Wu, et al (1979), CIRIA/Butterworths (1990), Lynch, et al (1997), serta Docker dan Hubble (2001). Selanjutnya Anonim (1993) menjelaskan bahwa akar wangi merupakan salah satu jenis rumput yang dapat mengendalikan erosi dan mencegah longsor dangkal yang terjadi di daerah tropis.

Untuk memahami lebih lanjut peranan vegetasi dalam penanggulangan gerakan tanah, perlu dilakukan suatu analisis numerik yang memperhitungkan secara matematis pengaruh vegetasi dalam mengontrol kondisi hidrologi dan kestabilan massa tanah pada

<sup>1</sup> Ir. Dwikorita Karnawati, M.Sc., Ph.D., Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, UGM

lereng. Konsep pemodelan ini diuraikan lebih lanjut dalam sub bab berikut.

### Pemodelan Kondisi Hidrologi Dan Kestabilan Lereng

*CHASM (Combined Hydrology and Stability Model)* merupakan suatu perangkat lunak yang dikembangkan oleh Anderson, 1990; Anderson dan Lloyd, 1991 yang secara numerik dapat memodelkan pengaruh infiltrasi hujan terhadap kondisi hidrologi dan kestabilan lereng. Model ini dapat diaplikasikan baik dengan Windows ataupun UNIX, dan konsep dasar pemodelan tersebut dapat dijelaskan secara sederhana dengan Gambar 1.

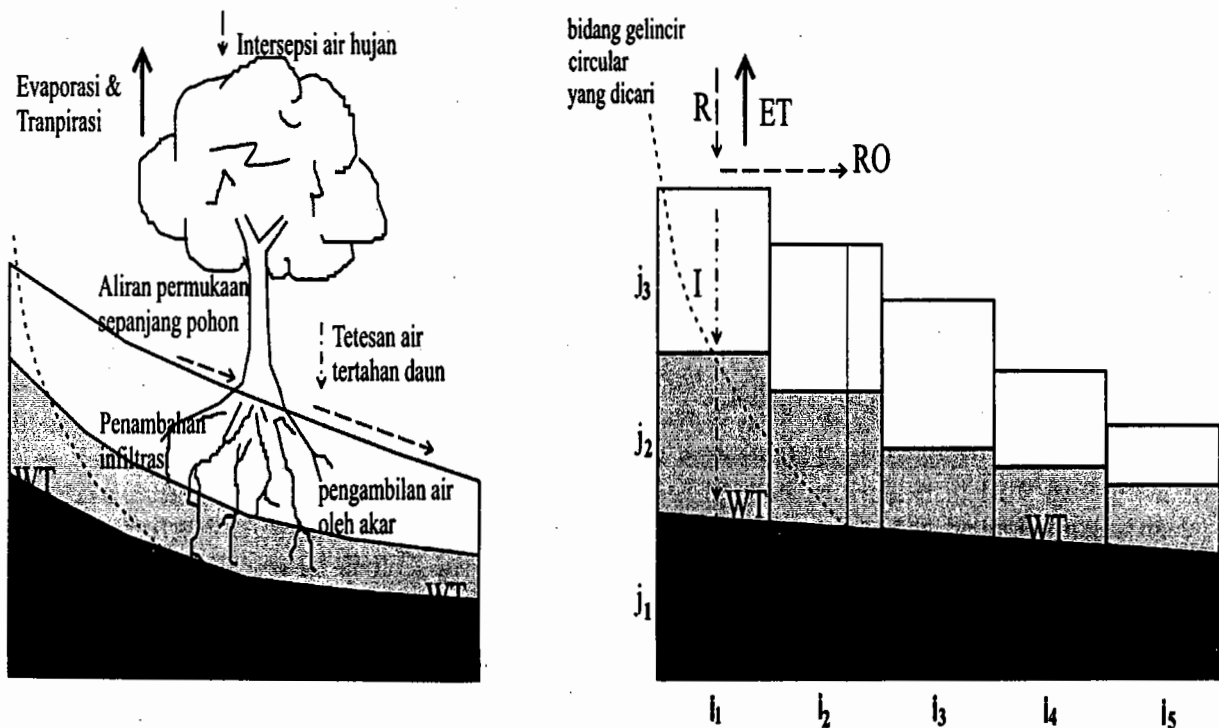
#### a. Pemodelan Kondisi Hidrologi

Dari Gambar 1 terlihat bahwa dengan pendekatan metoda *finite difference*, kondisi hidrologi pada suatu lereng dapat dimodelkan dalam bentuk 2 dimensi dan kondisi hidrologi ini dapat berubah pada setiap satuan waktu tertentu. Proses infiltrasi disimulasikan sebagai aliran vertikal yang melalui tiap

kolom massa tanah pada lereng, dimulai dari sel teratas (di permukaan lereng), menembus zona tidak jenuh air, dan kemudian menuju ke zona jenuh air. Proses infiltrasi oleh hujan dengan intensitas dan lama tertentu dapat diperhitungkan berdasarkan perhitungan perubahan derajat kejenuhan air dan tekanan air pori pada tiap sel di sepanjang kolom vertikal massa tanah. Kemampuan sel teratas (yang terletak pada permukaan lereng) dalam menerima dan melakukan air hujan dikontrol oleh besaran kapasitas infiltrasi tanah pada permukaan lereng. Perhitungan perubahan kejenuhan air pada tiap sel-sel tersebut dilakukan dengan menerapkan persamaan Richard (1931):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1)$$

- $\theta$  = kelembaban air/volumetric moisture content ( $m^3 m^{-3}$ )
- $t$  = waktu/time (s)
- $z$  = kedalaman vertikal/vertical depth (m)
- $D$  = difusivitas hidraulik/hydraulic diffusivity ( $m^2 s^{-1}$ )



Gambar 1. Konsep dasar pemodelan CHASM, memodelkan pengaruh infiltrasi hujan terhadap kondisi hidrologi dan kestabilan lereng

Sedangkan perhitungan nilai kelulusan air di zona tak jenuh ditetapkan dengan rumus Millington Quirk (1959):

$$K_i = \frac{K_s \left( \frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^p \sum_{j=1}^m \left( (2j+1-2i) \psi_j^{-2} \right)}{\sum_{j=1}^m \left( (2j-1) \psi_j^{-2} \right)} \quad (2)$$

- $p$  = interaksi pori/pore interaction term  
 $K_i$  = koefisien kelulusan air pada tanah tidak jenuh/  
*unsaturated conductivity* ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $K_s$  = koefisien kelulusan air pada tanah jenuh/  
*saturated conductivity* ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 $\theta_i$  = kandungan air pada kondisi tidak jenuh/  
*unsaturated moisture content* ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )  
 $\theta_s$  = kandungan air pada kondisi jenuh/*saturated*  
*moisture content* ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )  
 $\psi_j$  = harga suction pada saat kelembaban tidak  
 jenuh terjadi/*suction value at moisture content*  
 $\theta_i$  (m)  
 $m$  angka peningkatan nilai  $\theta$ /*number of equal*  
*increments*  $\theta$  dari  $\theta = 0$  hingga  $\theta = \theta_s$   
 $j, i$  index penjumlahan berdasarkan nomor urut pias  
 (kolom) dan no urut elemen yang terdapat pada  
 tiap kolom /*summation indices*

Setelah air hujan terinfiltrasi melalui tiap kolom massa tanah di zona tak jenuh air dapat mencapai zone jenuh air, maka aliran air disimulasikan secara lateral dengan menerapkan persamaan Darcy.

$$V_i = -K_i \frac{dh_i}{dl_i} \quad (3)$$

- $K_i$  = koefisien kelulusan air pada tanah tidak  
 jenuh/*unsaturated conductivity* ( $\text{ms}^{-1}$ )  
 yang diperoleh dari persamaan 2) di atas.

$\frac{dh_i}{dl_i}$  = gradien hidrolika yang diperoleh dari perbedaan tinggi kolom air pada tiap pias per satuan unit panjang.

Perubahan tekanan air pori pada tiap sel pada tiap satuan waktu, baik berupa tekanan air pori positif ataupun negatif, kemudian ditransfer ke dalam analisis kestabilan lereng untuk memperhitungkan pengaruh perubahan tekanan air pori tersebut terhadap kekuatan geser massa tanah pada tiap sel, yang nantinya berpengaruh terhadap kondisi kestabilan tanah pada lereng pada tiap satuan waktu.

## b. Analisis Kestabilan Lereng

Metoda kesetimbangan terbatas (*the limit equilibrium methods*) diterapkan untuk menganalisis kestabilan lereng, berdasarkan pada perhitungan kekuatan massa tanah dan pengaruh gaya gravitasi pada lereng. Khusus dalam penelitian yang dilakukan ini, diterapkan asumsi bahwa bidang gelincir gerakan massa tanah berbentuk lengkung, sehingga dalam analisis kesetimbangan terbatas dipilih metoda *Bishop's simplified*. Perhitungan ini dilakukan untuk menghitung kestabilan massa tanah yang dibagi menjadi beberapa pias dengan lebar tertentu, dan dirumuskan sebagai berikut (lihat juga Gambar 1).

$$FOS = \frac{\text{Kuat geser (s)}}{\text{Tegangan geser (T)}} \quad (4)$$

$$FOS = \frac{\sum_{i=0}^n (c'l + (P-ul) \tan \Phi')}{\sum_{i=0}^n W \tan \alpha} \quad (5)$$

dan  $P$  serta  $m_\alpha$  dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \left[ W - \frac{1}{FS_0} (c'l \sin \alpha - ul \tan \Phi' \sin \alpha) \right] / m_\alpha \quad (6)$$

dan

$$m_\alpha = \cos \alpha \left( 1 + \tan \alpha \frac{\tan \Phi'}{FS_0} \right) \quad (7)$$

- $n$  = jumlah pias/*number of slices*  
 $FS$  = Faktor keamanan/*factor of safety*  
 $c'$  = Kohesi tanah efektif/*effective soil cohesion*  
 ( $\text{kNm}^{-2}$ )  
 $l$  = panjang pias ke arah lateral/*slice length* (m)  
 $\alpha$  = sudut kemiringan bidang kelincir yang memotong pias terhadap bidang horisontal/  
*slice angle* (degrees)  
 $u$  = tekanan air pori/*porewater pressure* ( $\text{kNm}^{-2}$ )  
 $\Phi'$  = sudut gesekan dalam efektif/*effective angle of internal friction* (degrees)  
 $W$  = berat tanah/*weight of the soil* ( $\text{kNm}^{-2}$ )

Faktor keamanan lereng (*Safety Factor*), yang merupakan rasio antara kuat geser (besar nilai kekuatan massa tanah untuk mempertahankan gerakan) dan tegangan geser (besar tegangan geser penyebab gerakan), ditetapkan dengan memperhitungkan besar nilai kekuatan geser efektif yang terdapat di sepanjang bidang gelincir gerakan di dalam massa tanah. Apabila angka atau nilai Faktor Keamanan lereng lebih dari 1, berarti lereng dalam

kondisi stabil. Namun apabila angka Faktor Keamanan lereng ini sama dengan 1 atau kurang, berarti lereng dalam kondisi kritis atau tidak stabil (bergerak). Gerakan massa tanah pada lereng terjadi apabila terjadi perubahan nilai kuat geser tanah sehingga nilai Faktor Keamanan lereng berkurang menjadi lebih kecil dari nilai 1. Perubahan terjadi karena kenaikan tekanan air pori di zona jenuh air (di bawah muka air tanah) atau penurunan tegangan suction di zona tidak jenuh air (di atas muka air tanah), sebagai akibat kenaikan kandungan air dalam pori-pori tanah yang dipicu oleh infiltrasi air hujan.

Dalam software CHASM perubahan nilai kuat geser pada tiap sel atau pias massa tanah yang dilalui bidang gelincir akhirnya dapat dihitung pada tiap jam. Perubahan kuat geser tersebut diperhitungkan dengan memasukkan nilai kenaikan tekanan air pori pada tiap sel di zona jenuh air, atau memasukkan nilai penurunan tegangan suction (tegangan sedot) pada tiap sel di zona tak jenuh air, yang dilalui oleh bidang gelincir. Perubahan tekanan pori atau tegangan suction tersebut diprediksi berdasarkan simulasi dan analisis pada model hidrologi yang telah diuraikan di atas. Jadi dalam analisis kestabilan lereng ini dapat diperoleh nilai Faktor Keamanan terkecil pada tiap jam, yang bervariasi sesuai dengan variasi perubahan kondisi hidrologi lereng akibat hujan dengan intensitas dan lama tertentu.

### Pemodelan Pengaruh Vegetasi

Peranan vegetasi dalam mengontrol kondisi hidrologi pada lereng terjadi melalui proses :

1. intersepsi antara air hujan dengan vegetasi, yang mengakibatkan berkurangnya jumlah air yang terinfiltrasi.
2. evapotranspirasi oleh daun dan penyerapan air oleh akar tanaman, yang mengakibatkan berkurangnya kejenuhan air di dalam massa tanah.
3. peningkatan permeabilitas tanah karena kehadiran jaringan akar-akar tanaman dalam tanah.

Intersepsi antara air hujan dan vegetasi dimodelkan tergantung pada tipe vegetasi. Struktur kanopi disimulasikan dengan menerapkan koefisien aliran jatuh bebas (*free throughfall coefficient*), koefisien aliran yang melalui batang tanaman (*the stemflow-partitioning*), kapasitas daya tampung kanopi dan cabang-cabang tanaman (*canopy storage capacity and the trunk storage capacity* (Rutter *et al.*, 1971; Valente *et al.*, 1997), dengan melalui perhitungan sebagai berikut.

$$(1 - p - p_t) \int R dt = \int D dt + \int E dt + \Delta C \quad (8)$$

$$P_t \int R dt = S_f + \int E_t dt + \Delta C_t \quad (9)$$

- S = kapasitas daya tampung air pada kanopi/*canopy storage capacity* (m)  
 St = kapasitas daya tampung air pada cabang-cabang tanaman/*trunk storage capacity* (m)  
 p = koefisien aliran jatuh bebas/*free throughfall coefficient*  
 pt = koefisien aliran yang melalui batang tanaman/*stemflow partitioning coefficient*  
 R = intensitas curah hujan kotor/*gross rainfall intensity* (ms<sup>-1</sup>)  
 D = kecepatan drainase air melalui kanopi/*drainage rate from the canopy* (ms<sup>-1</sup>)  
 E = kecepatan evaporasi air yang tertahan oleh kanopi/*evaporation rate of water intercepted by the canopy* (ms<sup>-1</sup>)  
 ΔC = perubahan daya tampung air pada kanopi/*change in canopy storage* (m)  
 Sf = aliran air pada batang pohon/*stemflow* (m)  
 Et = kecepatan evaporasi air yang tertahan oleh cabang-cabang tanaman/*evaporation rate of the water intercepted by the trunks* (ms<sup>-1</sup>)  
 ΔCt = perubahan daya tampung cabang-cabang tanaman/*change in the trunk storage* (m)

$$E_p = \frac{\Delta R_n + \rho c_p VPD / r_a}{\lambda [\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)]} \quad (10)$$

- E<sub>p</sub> = kecepatan evapotranspirasi potensial/*potential evapotranspiration rate* (ms<sup>-1</sup>)  
 r<sub>w</sub> r<sub>c</sub> = kekuatan dan aerodinamik kanopi/*aerodynamic and canopy resistance, respectively* (sm<sup>-1</sup>)  
 Δ = sudut kurva kejenuhan tekanan uap - suhu/*slope of the saturation vapour pressure-temperature curve* (kgm<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>)  
 VPD = pengurangan tekanan uap/*vapour pressure deficit* (kgm<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup>)  
 c<sub>p</sub> = panas jenis udara/*specific heat of air* (Jkg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)  
 R<sub>n</sub> = radiasi bersih/*net radiation* (Wm<sup>-2</sup>)

Dalam pemodelan ini aliran air hujan yang jatuh bebas dan yang mengalir melalui batang tanaman serta yang hilang menjadi air limpasan disimulasikan berdasarkan input data curah hujan dan data iklim (Gambar 2). Pemodelan peran akar tanaman dalam menambah kuat geser tanah (s) dijabarkan dalam persamaan 11) dan 12). Penambahan kuat geser ini diperhitungkan dengan cara menambah nilai kohesi tanah (Δc) seperti yang dirumuskan dalam persamaan 12). Peran vegetasi ini secara mekanik diperhitungkan

berdasarkan pada kedalaman akar menembus tanah dan beban massa tanaman yang bertumpu pada lereng. Perkuatan oleh akar vegetasi disimulasikan dengan memperhitungkan kuat tarik akar serta perbandingan antara luas penampang akar pada tiap sel massa tanah dengan luas tiap sel massa tanah yang dianalisis (Wu *et al.*, 1979). Kemudian penambahan beban oleh massa tanaman yang bertumpu pada lereng diperhitungkan berdasarkan gaya berat massa tanaman (gaya vertikal) yang bertumpu pada tiap sel massa tanah. Jadi secara umum kuat tarik perakaran dan beban vegetasi berpengaruh terhadap besaran kohesi atau besaran kuat geser tanah dalam melawan gerakan.

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \Phi' \quad (11)$$

$s$  = kuat geser tanah/soil shear strength ( $\text{kNm}^{-2}$ )

$c'$  = kohesi tanah efektif/effective soil cohesion ( $\text{Nm}^{-2}$ )

$\Phi'$  = sudut gesekan dalam efektif/effective angle of internal friction (degrees)

$\sigma$  = tegangan normal total/total normal stress ( $\text{kNm}^{-2}$ )

$u$  = tekanan air pori/porewater pressure ( $\text{kNm}^{-2}$ )

$$\Delta c' = c'_R = t_R (\cos \theta \tan \Phi + \sin \theta) \quad (12)$$

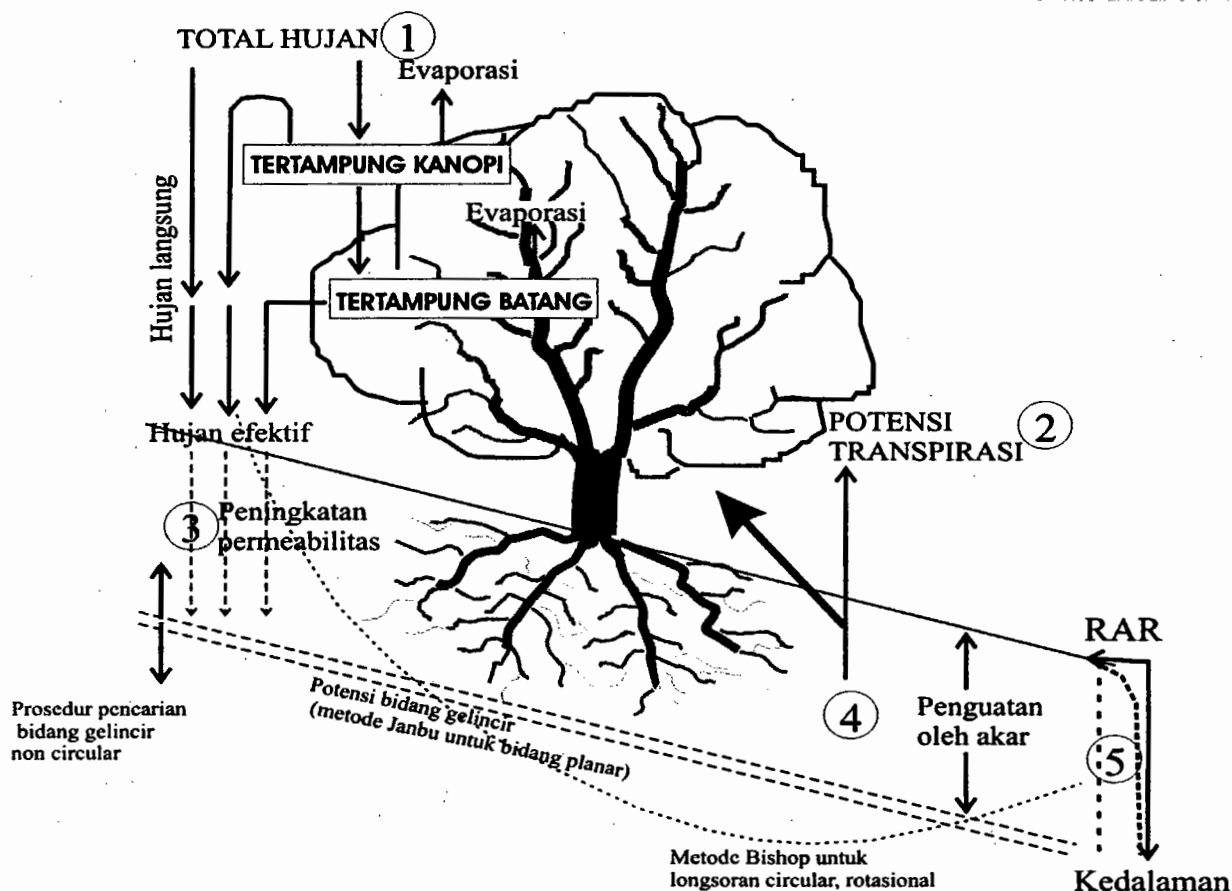
$c'$  = kohesi efektif/effective cohesion ( $\text{kNm}^{-2}$ )

$c'_R$  = kohesi efektif akibat penambahan kekuatan oleh akar/effective cohesion attributed to the root network ( $\text{kNm}^{-2}$ )

$\theta$  = sudut geser rotasi/angle of shear rotation (degrees)

$\Phi$  = sudut gesekan dalam/angle of internal friction (degrees)

$t_R$  = kuat tarik akar rata-rata pada tiap satuan luas/average tensile strength of the roots per unit area of soil ( $\text{kNm}^{-2}$ )



Gambar 2. Peranan pohon sebagai penguat tanah dan pengatur kejenuhan air pada lereng Keterangan: 1) Air hujan total yang jatuh pada permukaan lereng; 2) sebagian air hujan yang potensi menguap karena transpirasi; 3) kondisi peningkatan permeabilitas tanah akibat adanya air hujan yang efektif terinfiltrasi ke dalam tanah; 4) Penguatan tanah pada lereng oleh akar tanaman; 5) Profil distribusi kejenuhan air dalam tanah pada lereng.

# MODEL LERENG YANG DIANALISIS

## Model Geologi dan Geoteknik

Karnawati, dkk. (2005) menjelaskan bahwa secara umum kondisi lereng yang rentan bergerak dapat dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan besar sudut kemiringan dan kondisi stratigrafi pada lereng rentan tersebut, yaitu lereng dengan kemiringan 15° untuk mewakili lereng landai, dengan kemiringan 30° untuk mewakili lereng curam dan dengan kemiringan 45° untuk mewakili lereng sangat curam. Kondisi stratigrafi lereng yang dimodelkan adalah kondisi lereng di Jawa bagian selatan yang tercatat paling sering mengalami gerakan, yaitu lereng yang tersusun oleh batuan breksi andesit yang telah mengalami pelapukan pada bagian permukaannya. Hasil pelapukan tersebut membentuk tanah lempung pasir yang bersifat lepas dan relatif lebih porus daripada breksi andesit yang mengalasinya. Sifat keteknikan breksi andesit dan tanah lempung pasir ditetapkan dengan uji laboratorium dan ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sifat keteknikan batuan/tanah pada lereng

| Sifat keteknikan              | Breksi andesit (matriks)    | Lempung pasir                     |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| $\rho_s$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 17.00                       | 16.11                             |
| $\rho_d$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 12.90                       | 11.05                             |
| Gs                            | 2.58                        | 2.58                              |
| Void ratio                    | 1.01                        | 1.03                              |
| K (m/s)                       | $3.42 - 5.2 \times 10^{-8}$ | $1.57^{-7} - 6.31 \times 10^{-5}$ |
| C' (kPa)                      | 35.00                       | 12.74                             |
| $\Phi$ (°)                    | 45.00                       | 26.84                             |

## Model Hujan

Beberapa model hujan diterapkan dalam analisis untuk mensimulasikan hujan tidak deras (yaitu hujan rintik-rintik dengan curah 20 mm/ hari dan hujan biasa dengan curah 50 mm/hari), hujan cukup deras dengan curah 100 mm/hari dan hujan sangat deras dengan curah 160 mm/hari. Pemilihan model ini dilakukan

berdasarkan analisis data hujan di wilayah DAS Progo selama periode 10 tahun.

## Model Vegetasi

Jenis vegetasi yang dimodelkan ditetapkan berdasarkan data lapangan. Gerakan tanah sering terjadi pada lereng landai yang jenuh air (umumnya karena ditanami padi dengan irigasi), juga pada lereng curam (sekitar 30°) yang dimanfaatkan untuk ladang dengan tanaman ketela pohon dan atau rumput-rumputan, serta pada lereng sangat curam (sekitar 45°) yang ditanami tanaman kayu-kayuan (misal pinus). Parameter keteknikan untuk tiap jenis vegetasi yang dimodelkan ditunjukkan pada Tabel 2.

## HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi kestabilan lereng (yang diekspresikan dengan faktor keamanan lereng) berubah-ubah sesuai dengan karakteristik curah hujan yang jatuh pada lereng (Gambar 3a s/d 3c). Berdasarkan hasil analisis regresi linear maka hubungan antara curah hujan (mm/hari) dan perubahan nilai faktor keamanan lereng dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

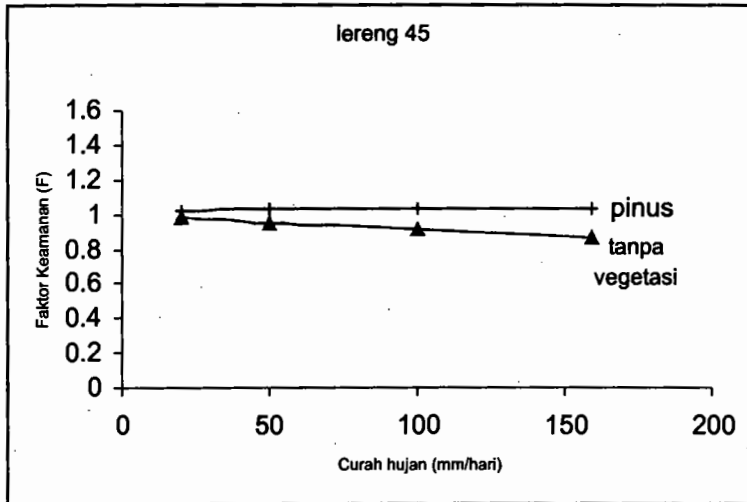
- a) Pada lereng 45°:
  - dengan vegetasi pinus;  $y = 7.10^{-5}x + 1.02$
  - tanpa vegetasi;  $y = -9.10^{-4}x + 0,998$
- b) Pada lereng 30°:
  - dengan vegetasi
    - akar wangi;  $y = 2.10^{-5}x + 1,065$
    - bambu;  $y = -4.10^{-5}x + 1,06$
  - tanpa vegetasi;  $y = -9.10^{-4}x + 1,064$
- c) Pada lereng 15°:
  - dengan vegetasi :
    - ketela;  $y = -3.10^{-5}x + 1,461$
    - padi kering;  $y = 2.10^{-5}x + 1,451$
    - padi basah;  $y = 0,977$
  - tanpa vegetasi;  $y = -1.8.10^{-3}x + 1,439$

dimana x adalah Curah hujan (mm/hari) dan y adalah Faktor keamanan lereng.

Tabel 2. Parameter vegetasi pada lereng

| Parameter                                       | Cemara          | Akar wangi        | Bambu             | Singkong        | Padi (kering)     |
|---|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Daya rentang akar kNm <sup>-2</sup>             | $\tau_r = 18$   | $\tau_r = 12$     | $\tau_r = 10$     | $\tau_r = 10$   | $\tau_r = 8$      |
| Vegetasi penutup %                              | $v_c = 36.1$    | $v_c = 45$        | $v_c = 30$        | $v_c = 45$      | $v_c = 55$        |
| Indeks luas daun m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> | lai= 13.1       | lai = 1.5         | lai = 0.95        | lai = 5         | lai = 0.95        |
| Kekuatan aerodinamik sm <sup>-1</sup>           | $r_a = 7.5$     | $r_a = 40$        | $r_a = 7.5$       | $r_a = 40$      | $r_a = 40$        |
| Kekuatan kanopi sm <sup>-1</sup>                | $r_c = 70$      | $r_c = 70$        | $r_c = 120$       | $r_c = 80$      | $r_c = 50$        |
| Transpirasi maksimal ms <sup>-1</sup>           | $T = 3.10^{-7}$ | $T = 4.5.10^{-7}$ | $T = 5.5.10^{-7}$ | $T = 3.10^{-7}$ | $T = 5.1.10^{-7}$ |
| Kedalaman akar/penyebaran lateral m             | $R_d = 4$       | $R_d = 3$         | $R_d = 0.5$       | $R_d = 0.40$    | $R_d = 0.3$       |
| Vegetasi tambahan kNm <sup>-2</sup>             | $R_l = 1$       | $R_l = 0.5$       | $R_l = 1$         | $R_l = 0.25$    | $R_l = 0.2$       |
| Vegetasi tambahan kNm <sup>-2</sup>             | $S_w = 3$       | $S_w = 0.25$      | $S_w = 2$         | $S_w = 0.5$     | $S_w = 0.2$       |
| Rasio luas akar %                               | RAR = 30        | RAR = 10          | RAR = 25          | RAR = 15        | RAR = 5           |

a)

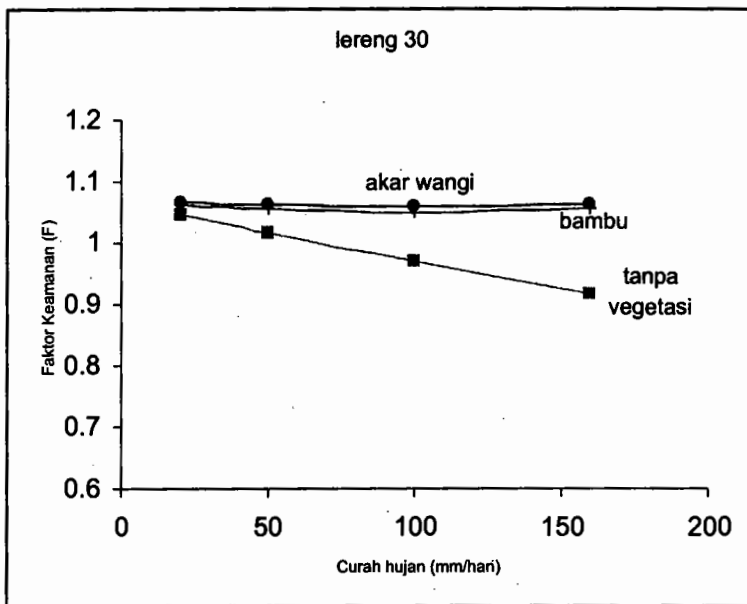


Persamaan regresi :

Pada lereng 45° :

- vegetasi pinus;  
 $y = 7.10^{-5}x + 1.021$
- tanpa vegetasi;  
 $y = -9.10^{-4}x + 0,998$

b)



Persamaan regresi :

Pada lereng 30°

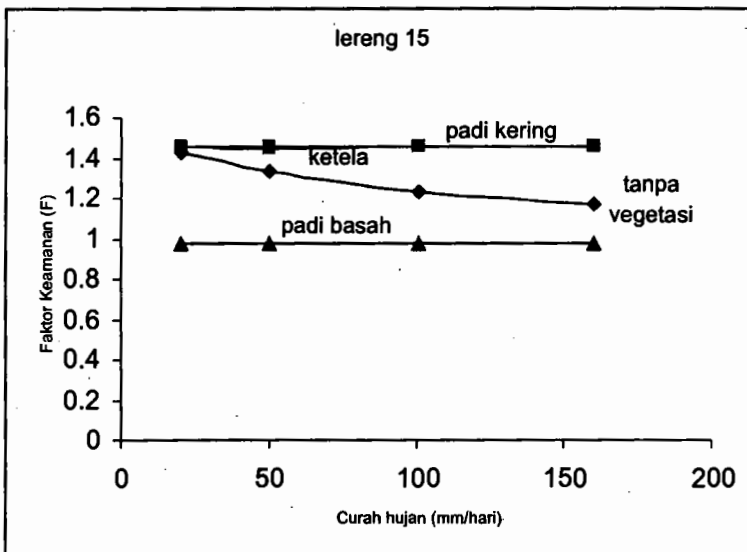
a) dengan vegetasi:

- Akar wangi;  
 $y = 2.10^{-5}x + 1,065$
- Bambu;  
 $y = -4.10^{-5}x + 1,06$

b) tanpa vegetasi;

$$y = -9.10^{-4}x + 1,064$$

c)



Persamaan regresi :

Pada lereng 15°

a) dengan vegetasi:

- Ketela;  
 $y = -3.10^{-5}x + 1,461$
- Padi kering;  
 $y = 2.10^{-5}x + 1,451$
- Padi basah;  $y = 0,977$

b) tanpa vegetasi;

$$y = -1.8.10^{-3}x + 1,439$$

Gambar 3. Variasi perubahan faktor keamanan lereng ( y ) akibat berbagai variasi curah hujan ( x ) dan jenis vegetasi pada lereng dengan kemiringan 15°, 30° dan 45°.

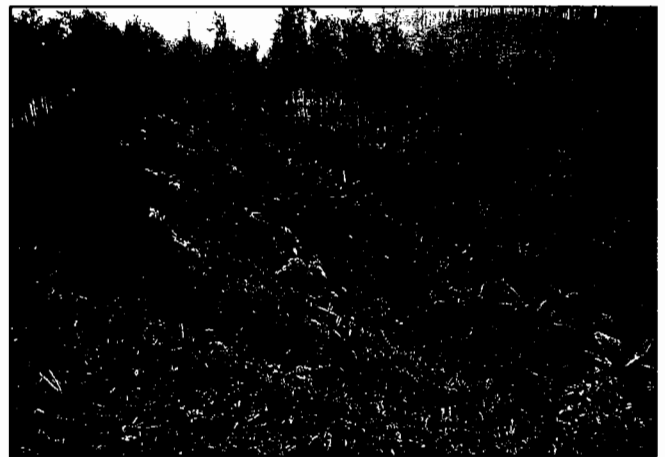
Sementara itu Gambar 3c juga menunjukkan penanaman vegetasi (padi dan ketela pohon) tanpa irigasi, pada lereng landai (dengan kemiringan  $15^\circ$ ) yang tersusun oleh tanah lempung pasir yang menumpang di atas breksi andesit, berperan signifikan dalam meningkatkan kestabilan lereng. Selain oleh vegetasi, kestabilan massa tanah pada lereng tersebut juga dikontrol oleh kondisi kelandaian lereng serta kondisi stratigrafi dan sifat geoteknik massa tanah. Namun curah hujan tidak berperan signifikan dalam menurunkan kestabilan lereng landai tersebut. Fenomena ini terlihat dari hasil analisis yang ditunjukkan oleh angka faktor keamanan lereng yang relatif konstant dalam berbagai kondisi curah hujan (Gambar 3c). Namun sebaliknya, penanaman padi dengan irigasi sangat signifikan menurunkan kestabilan pada lereng landai tersebut.

## EVALUASI

Hasil analisis di atas merupakan hasil pemodelan secara umum terhadap kondisi gerakan tanah di wilayah Jawa bagian selatan, sehingga perlu dievaluasi berdasarkan data kejadian gerakan tanah di lapangan. Dari hasil pemodelan di atas terlihat bahwa vegetasi dapat berperan penting dalam memperkuat lereng landai atau lereng dengan kemiringan kurang dari  $45^\circ$ . Pada lereng curam (kemiringan lebih dari  $45^\circ$ ) peranan vegetasi menjadi kurang berarti dibandingkan peranan kondisi stratigrafi, struktur geologi dan kemiringan lereng. Beberapa kasus di bawah ini juga menunjukkan adanya kemiripan fenomena antara kondisi kestabilan lereng yang dimodelkan dengan kondisi lereng asli di alam.

Bencana gerakan tanah yang berupa longsor yang berkembang menjadi banjir bahan rombakan tanah dan kayu (banjir bandang) di Taman Nasional Leuser merupakan salah satu bukti bahwa kondisi geologi (stratigrafi) dan kecuraman kemiringan lereng lebih berperan dalam mengakibatkan terjadinya gerakan tanah pada lereng curam. Bencana tersebut terjadi di dalam wilayah Sub DAS Bahorok pada tanggal 2 November 2003. Meskipun taman nasional tersebut merupakan kawasan hutan tropis yang lebat, namun terdapat pada lereng dengan kemiringan sekitar  $60^\circ$  atau lebih yang tersusun oleh batubak yang telah rapuh karena terpotong-potong oleh struktur kekar dan patahan. Karena kondisi geologi dan kemiringan lereng, secara alamiah lereng-lereng di kawasan tersebut memang rentan bergerak atau labil, dan gerakan tanah di kawasan tersebut dapat terjadi meskipun hanya dipicu oleh curah hujan yang sangat rendah.

Selain itu terjadi pula gerakan tanah berupa longsor di Lereng Gunung Pawinihan, (Kabupaten Banjarnegara pada tanggal 4 Januari 2006) dan longsor yang berkembang menjadi banjir bahan rombakan di lereng gunung Argopuro bagian selatan (Kabupaten Jember) pada tanggal 2 Januari 2006. Bencana tersebut juga merupakan contoh kasus bahwa kondisi kemiringan dan stratigrafi lereng sangat penting dalam mengontrol gerakan tanah. Kedua longsor tersebut terjadi pada lereng curam (kemiringan lebih dari  $45^\circ$ ) yang tersusun oleh hasil pelapukan breksi andesit yang telah membentuk tanah lempung pasir. Pada lereng yang longsor di kedua lokasi tersebut terdapat vegetasi kebun, namun terbukti peranan vegetasi dalam menahan gerakan tanah terkalahkan dengan peranan kondisi geologi dan kemiringan lereng dalam melemahkan kekuatan massa tanah melawan gerakan.



Gambar 5. Lereng yang telah terbuka (tanpa vegetasi) yang terdapat di lereng Gunung Welirang di Kabupaten Mojokerto, mulai menunjukkan gejala gerakan yang ditandai dengan kemunculan retakan tanah berbentuk lengkung seperti tapal kuda (Karnawati 2002, 2005).

Sebaliknya pada lereng yang lebih landai dengan kemiringan kurang dari  $45^\circ$  dan tersusun oleh breksi andesit lapuk peranan vegetasi terbukti cukup penting dalam melindungi lereng dari potensi gerakan, seperti yang terdapat di lereng Gunung Welirang di Kabupaten Mojokerto (Gambar 5). Pada gambar tersebut terlihat bahwa lereng yang telah terbuka (tanpa vegetasi) mulai menunjukkan gejala gerakan yang ditandai dengan kemunculan retakan tanah. Pada latar belakang zona yang akan bergerak terlihat bahwa lereng dengan kemiringan dan kondisi stratigrafi yang sama namun ditanami oleh tanaman pinus, tampak



masih stabil (tidak menunjukkan gejala gerakan). Fenomena sejenis terjadi di wilayah Perbukitan Menoreh (Kabupaten Magelang) dan Perbukitan Kulon Progo (Kabupaten Kulon Progo) yang juga merupakan wilayah rentan gerakan tanah. Namun sebagian besar lereng curam (lebih dari 30°) di wilayah tersebut masih tetap stabil karena kondisi batuan yang masih kokoh (merupakan breksi andesit segar hingga lapuk rendah) ataupun karena lereng di sana masih tertutup vegetasi baik berupa kebun ataupun ladang.

Selanjutnya Karnawati (2005) menjelaskan selama musim hujan di bulan November 2000 hingga April 2006, 113 titik longsor telah teridentifikasi di Perbukitan Menoreh. Titik-titik longsor tersebut terutama terjadi pada lereng curam yang justru tanamannya terlalu lebat. Pemotongan kaki lereng untuk lahan pemukiman atau jalan juga merupakan salah satu faktor pemicu longsor di wilayah tersebut.

Gerakan tanah (tipe rayapan) pada lereng landai (kemiringan 15°) yang terusan oleh tanah lempung pasir atau lanau lempungan juga telah terjadi di Desa Ngelo, Kecamatan Kajoran, Kabupaten Magelang; di Desa Seling, Kecamatan Sadang, Kabupaten Kebumen; serta di sepanjang Saluran Irigasi Kalibawang, Kabupaten Kulon Progo, Jawa Tengah. Kondisi stratigrafi lereng yang tersusun oleh tanah lempung montmorillonite yang sensitif untuk mengembang serta penggunaan lahan sebagai lahan sawah beririgasi merupakan penyebab utama terjadinya rayapan tanah (Anwar 2003 dan Karnawati 2004, 2005).

## KESIMPULAN

Berdasarkan analisis kestabilan lereng secara numerik dengan menerapkan CHASM, terbukti bahwa gerakan tanah pada lereng dengan kemiringan  $\geq 45^\circ$  yang tersusun oleh tanah lempung yang menumpang di atas breksi andesit terjadi karena didominasi oleh kontrol kondisi geologi, khususnya kondisi stratigrafi lereng, dan sifat geoteknik tanah/ batuan penyusun lereng. Vegetasi (khususnya bambu dan akar wangi) hanya berperan signifikan dalam memperkuat massa tanah/ batuan dalam melawan gerakan yang dipicu oleh hujan pada lereng dengan kemiringan kurang dari 45°. Namun pada lereng tanah lempung yang landai (kemiringan 15°), penanaman padi dengan irigasi terbukti signifikan menurunkan kestabilan lereng meskipun hanya terjadi hujan dengan curah sangat rendah (20mm/hari). Hasil analisis juga menunjukkan bahwa hujan tidak berperan penting dalam memicu gerakan pada lereng landai tersebut.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Institute for Advanced Study, Bristol University, UK yang telah bekerjasama untuk melaksanakan penelitian ini dengan *scheme: Leverhulme Proffessorship Award*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, M.G., 1990, A Feasibility Study in Mathematical Modelling of Slope Hydrology and Stability, *Geotechnical Control Office Civil Engineering Services Department, Hong Kong, Report CE 23/90*
- Anderson, M.G. and Lloyd. D.M., 1991, Using a combined slope hydrology-stability model to develop cut slope design charts, *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, 91(2), pp. 705-718.
- Anonim, 1993, *Vetiver Grass, The Hedge against Erosion*, The World Bank, Washington D.C., fourth ed., 78p.
- Anwar, 2004, Model Mitigasi Bencana Gerakan Tanah di Pulau Jawa Berbasis Pada Usaha Pemberdayaan Masyarakat. *Laporan Akhir Riset Unggulan Terpadu X Bidang Kebumihan, Kelautan dan Kedirgantaraan*, , Kementrian Riset dan Teknologi RI, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, 86 hal.
- CIRIA/Butterworth's, 1990, *Journal of Construction and Design*.
- Docker, B.B. & Hubble, T.C.T., 2001, Earth reinforcement potential of four tree species as determined by root system architecture, *Geotechnical Engineering, Ho & Li (Eds)*. Swets and Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 250 X, pp.741-744.
- Docker, B.B. dan Hubble, T.C.T., 2001, Strength and distribution of Casuarina glauca roots in relation to slope stability, *Geotechnical Engineering, Ho & Li (Eds)*. Swets and Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 250 X, pp.745-749.
- Gostelow, T.P. 1991; Rainfall and Landslides. *Prevention and control of landslides and other mass movement*, eds. Almeida-Taxeira M.E. et al, pp. 39-161. Commission of the European Communities. Report EUR 12918 EN.
- Hencher, S.R. dan Masey, E.W., 1984. Landslides in South East Asia; State of the art report. *Proc. Of the 4th Int. Symposium on Landslides*, Toronto, pp. 631-637.
- Karnawati, D., 1996, *Mechanism of rain-induce landslide in allophonic and halloysitic soil in*

- Java, Ph.D. Thesis, Dept. of Earth Sciences, Leeds University, UK.
- Karnawati, D., 1997, Natural slope failure on the weathered Andesitic Breccia in Samigaluh Area, Indonesia, *The 4th International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Canberra, Australia.
- Karnawati, D., 2004, Bencana gerakan massa tanah/batuan di Indonesia; evaluasi dan rekomendasi, *Permasalahan, Kebijakan Dan Penanggulangan Bencana Tanah Longsor Di Indonesia*, BPPT, Jakarta, hal. 9 – 38.
- Karnawati, D., I. Ibriam, Anderson, M.G., Holcombe, E. A., Mummery, G.T., Renaud, J-P, and Wang, Y., 2005, An initial approach to identifying slope stability controls in Southern Java and to providing community-based landslide warning information, *Landslide Hazard and Risk*, eds. Thomas Glade, M.G. Anderson and Michael J. Crozier, John Wiley and Sons, ISBN 0-471-48663-9, pp. 733-763.
- Lynch, J.P., Nielsen, K.L., Davis, R.D, & Jablokow, A.G., 1997, Sim Root : Modelling and visualization of root systems, *Plant and Soil* 188. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp.139-151
- Millington, R.J. and Quirk, J.P., 1959, Permeability of porous media, *Nature*, 183, 387-388.
- O'Loughlin, C.L., 1974, A study of tree root strength deterioration following clear felling, *Canadian Journal of Forest Research*, 4 (1); pp. 107 – 113.
- Premchit, J. 1995; Landslides. Asian Institute of Technology, South East Asian Geotechnical Society, Bangkok, 21 pp.
- Richard, L.A., 1931, Capillary conduction of liquids in porous mediums, *Physics*, 1, pp. 318-333.
- Rutter, A.J., Kershaw, K.A. & Robins, P.C., 1971, A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observation in plantation of corsican pine, *Agricultural Meteorology*, 9, pp. 367-384.
- Valente, F., David, J.S. & Gash, J.H.C., 1997, Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models, *Journal of Hydrology*, 190, pp. 141-162.
- Wu, T.H., McKinnell III, W.P. & Swanston, D.N., 1979, Strength of tree roots and landslide on Prince of Wales Island, Alaska, *Canadian Geotechnical Journal*, 16(1), pp. 19-33.