

Analisis Kelongsoran Lereng Akibat Pengaruh Tekanan Air Pori di Saluran Induk Kalibawang Kulonprogo

(Slope Stability Analysis Due to the Effect of Pore Water Pressure at Kalibawang Irrigation Channel of Kulonprogo District)

HESTI SUBIYANTI, AHMAD RIFA'I, RACHMAD JAYADI

ABSTRACT

During rainy seasons, landslide occurs every year in Talang Bawong, Kalibawang Irrigation Channel that can damage houses, school building, bridge and the channel. Considering this fact, a numerical analysis by modeling the slope at the site was conducted. The objectives of this research were to identify the rain characteristic in the research site and to recognize its influence towards the change of water pressure in soil as well as the slope failure. The input data of this analysis were slope topography, physical and mechanical properties of soil applied. Groundwater flow in the slope model was numerically simulated by using SEEP/W software. Designed rainfall with appropriate return period was determined by analyzing the maximum daily rainfall data with the aid of HAVARA software, while rainfall depth distribution was completed by applying frequency analysis. The historical daily rainfall data (1985 – 2004) were obtained from Kalibawang rain station. Six rainfall models, as follow: initial condition (no rain) (model I), heavy rain in a short duration (model II), normal rain 25 mm and 40 mm in a long duration (model III), normal rain 20 mm in a long duration (model IV), heavy rain followed by normal rain 20 mm (model V), and normal rain 20 mm followed by heavy rain (model VI) were analyzed. The output of the simulation was water pressure distribution data, which in turn being used as input data in analyzing slope stability using the SLOPE/W software. The result of the research showed that the highest rainfall with 2-year-return period was 114 mm while the dominant duration was 4 hours/day, and it was applied in the model II. The result showed that, a normal rain in a long duration is more severely influenced the change in water pressure than a heavy rain in a short duration. The safety factors are 1,444 for no rain condition, 1,418 for 114 mm rain for 4 hours, 1,208 for 25 mm and 40 mm rains, 0,982 for 20 mm rain, 1,397 for heavy rain followed by normal rain, and 1,402 for normal rain followed by heavy rain. In addition, a 20 mm normal rain on the 61st day resulted in the most severe influence on the slope failure.

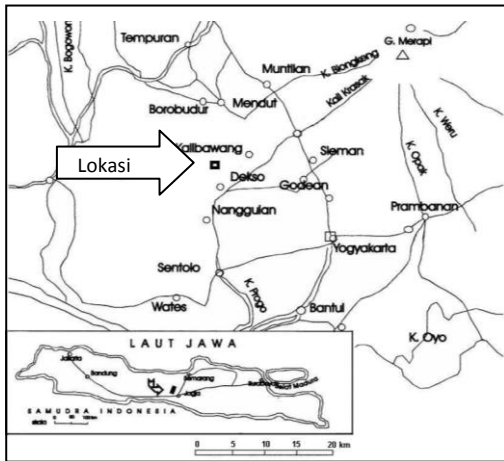
Keywords : landslide, pore water pressure, suction, numerical simulation

PENDAHULUAN

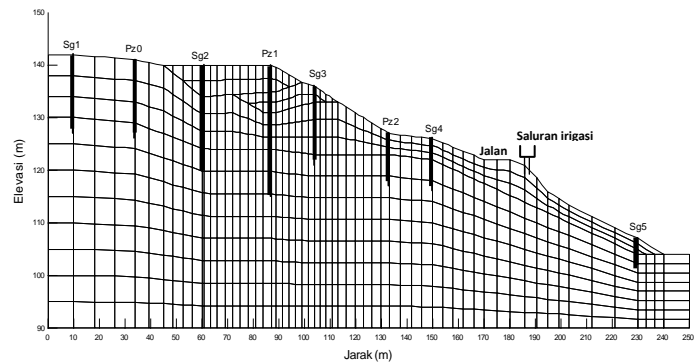
Hampir setiap tahun, pada saat atau akhir musim hujan, lereng di sekitar Saluran Induk Kalibawang mengalami kelongsoran yang mengakibatkan rusaknya bangunan rumah, gedung SD, jembatan dan Saluran Induk (*channel*) Kalibawang. Bencana ini diperkirakan akibat perubahan (peningkatan) tekanan air pori yang menyebabkan tegangan efektif (σ') tanah turun.

Penelitian dilakukan di lereng pada km 15,9 Saluran Induk Kalibawang yang berlokasi di Kecamatan Kalibawang, Kabupaten Kulonprogo, Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 1. Potongan melintang lereng ditunjukkan pada Gambar 2.

Dalam penelitian ini akan dikaji karakteristik hujan yang sering terjadi di lokasi penelitian dan pengaruhnya terhadap perubahan tekanan air pori, serta pengaruh tekanan air pori



GAMBAR. 1 Lokasi penelitian



GAMBAR. 2 Potongan melintang lereng

terhadap kelongsoran lereng di Saluran Induk Kalibawang khususnya di km 15,9.

Menurut Gofar dan Setiawan (2002), besarnya *soil suction* berbanding terbalik dengan kadar air awal pada tanah, sehingga *suction* akan berkurang seiring dengan peningkatan kadar air volumetrik dalam tanah. Dengan turunnya nilai *suction*, maka kekuatan geser tanah akan berkurang sehingga kohesi akan sama dengan kohesi efektif pada saat *matric suction* sama dengan nol. Dalam hal ini tanah mencapai kondisi jenuh.

Hujan pemicu longsor adalah hujan yang mempunyai curah tertentu, sehingga air yang dicurukannya dapat meresap ke dalam lereng dan mendorong massa tanah untuk longsor. Secara umum terdapat dua tipe hujan pemicu longsor di Indonesia, yaitu tipe hujan deras yang berlangsung singkat dan hujan normal tetapi berlangsung lama. Tipe hujan deras misalnya adalah hujan yang dapat mencapai 70 mm/jam atau lebih dari 100 mm/hari. Tipe hujan deras hanya akan efektif memicu longsor pada lereng-lereng yang tanahnya mudah menyerap air, seperti misalnya pada tanah lempung pasiran dan tanah pasir (Premichit, 1995, dalam Karnawati, 1996, 1997). Tipe hujan normal contohnya adalah hujan dengan intensitas 20 - 50 mm/hari. Hujan tipe ini bila berlangsung selama beberapa minggu hingga beberapa bulan dapat memicu longsor pada lereng yang tersusun oleh tanah yang permeabilitasnya kecil, misalnya tanah lempung (Karnawati, 2001).

Menurut Suhendro (2000), penyelesaian masalah dalam bidang *engineering* dapat

menggunakan beberapa cara pendekatan (*approach*) sebagai berikut ini.

- a. Pendekatan matematis (*mathematical approach*), yang dapat berupa :
 - 1) penyelesaian secara analitis, misalnya dengan menggunakan teori dasar elastisitas, plastisitas dalam penyelesaian masalah,
 - 2) penyelesaian secara numeris, misalnya dengan menggunakan *finite element method*, *finite different method* / *boundary element method*.
- b. Pendekatan eksperimen (*experimental approach*) yang dapat berupa :
 - 1) uji model dengan skala tertentu di laboratorium,
 - 2) uji *prototype*.
- c. Pengalaman dalam aplikasi di lapangan (*practical approach*).

Penyelesaian masalah dengan pendekatan secara numeris umumnya dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak (*software*) untuk mempercepat kalkulasi dan *trial* yang ada. Dalam penelitian ini digunakan *software* SEEP/W dan SLOPE/W yang merupakan bagian dari *software* GEOSLOPE OFFICE VERSI 5.

Aliran Air dalam Tanah

Menurut Bernoulli dalam Hardiyatmo (2002), tinggi energi total (*total head*) pada suatu titik dapat dinyatakan oleh Persamaan 1.

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (1)$$

dengan

- h : tinggi energi total (m),
- $\frac{p}{\gamma_w}$: tinggi energi tekanan (m),
- p : tekanan air (t/m², kN/m²),
- $\frac{v^2}{2g}$: tinggi energi kecepatan (m),
- v : kecepatan air (m/det),
- γ_w : berat volume air (t/m³, kN/m³),
- g : percepatan gravitasi (m/det²),
- z : tinggi energi elevasi (m).

Kecepatan rembesan di dalam tanah sangat kecil, maka tinggi energi kecepatan dalam suku persamaan Bernoulli dapat diabaikan.

Stabilitas Lereng

Faktor aman (SF) didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya yang menahan dan gaya yang menggeserkan/menggerakkan (Hardiyamo, 2002), seperti diformulasikan dalam Persamaan 2.

$$SF = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2)$$

dengan

- τ : tahanan / kekuatan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah,
- τ_d : tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor,
- SF : faktor aman.

Bishop (1955, dalam Fredlund dan Rahardjo, 1993) mengusulkan persamaan kuat geser tanah pada *unsaturated soils* adalah :

$$\tau = c' + \left[\sigma' - u_a \right] \chi \left[\sigma'_a - u_w \right] \tan \varphi \quad (3)$$

dengan

- c' : kohesi efektif (kN/m²),
- σ' : tegangan efektif (kN/m²),
- u_a : tegangan udara pori (kN/m²),
- $\left[\sigma' - u_a \right]$: tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²),
- u_w : tegangan air pori (kN/m²),
- $(u_a - u_w)$: *matric suction* (kN/m²),

φ : sudut gesek dalam (...°),

φ^b : sudut yang menunjukkan variasi pertambahan kuat geser relatif terhadap *matric suction* (...°),

χ : parameter yang berhubungan dengan derajat kejenuhan, dengan

$$\chi = \frac{\varphi^b}{\varphi} \quad (4)$$

Menurut Suryolelono (2004), untuk kondisi tanah tidak kenyang air, tinjauan terhadap besarnya SF tetap menggunakan analisis keseimbangan batas seperti dalam Persamaan 5.

$$SF = \frac{\sum \left\{ c_i' b_i + \left[W_i \left(-e \cdot \sin \theta_i \right) - u_i b_i \frac{\tan \varphi^b}{\tan \varphi'} \right] \tan \varphi' \right\} \left(\frac{1}{m_{\theta}} \right)}{\sum W_i (\sin \theta_i + e \cdot \cos \theta_i)} \quad (5)$$

dengan

- W_i : berat tanah pada pias ke-i = $b_i \cdot h_i \cdot \gamma$ (kN),
- n : jumlah pias,
- b_i : lebar pias ke-i (m),
- h_i : tinggi pias ke-i (m),
- θ_i : sudut pias ke-i terhadap garis vertikal melalui tengah-tengah pias (...°),
- c_i' : kohesi tanah efektif (kN/m²),
- φ' : sudut gesek tanah efektif (...°),
- γ : berat volume tanah (kN/m³),
- u_i : tegangan air pori (kPa) (= u_w),
- e : koefisien gaya gempa,

$$m_{\theta(i)} = \cos \theta_i + (\sin \theta_i \cdot \tan \varphi') / SF$$

φ^b : suatu sudut yang menunjukkan variasi pertambahan kuat geser relatif terhadap *matric suction* ($u_a - u_w$). Apabila nilai $\varphi^b \approx \varphi'$, berarti kondisi tanah mulai kenyang air, hubungan tersebut sesuai dengan metode Bishop disederhanakan.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Alat

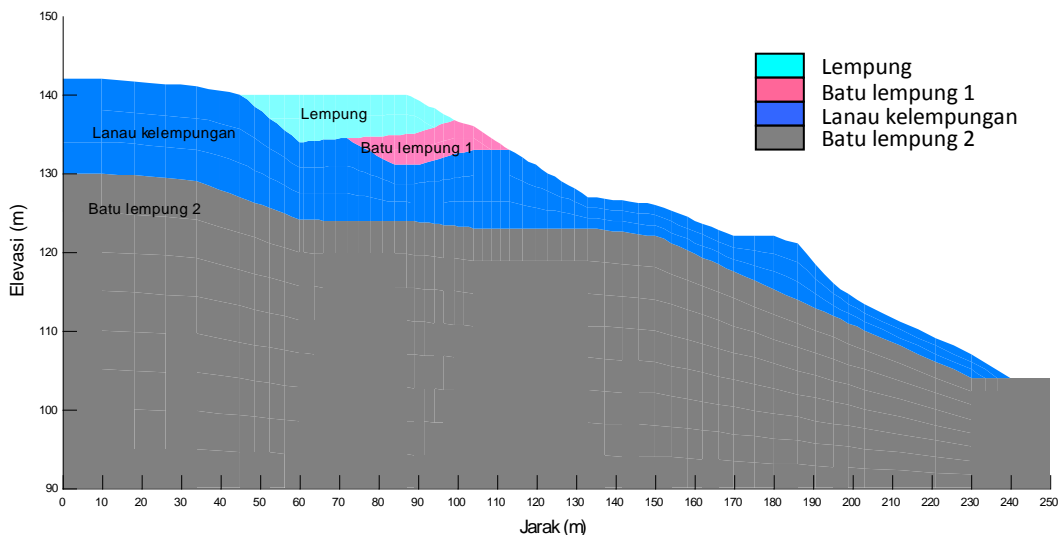
Data yang digunakan untuk memodelkan lereng berupa data topografi lereng, sifat-sifat fisis dan mekanis tanah. Untuk dapat memperkirakan profil lapisan lereng di lokasi penelitian, diperlukan uji lapangan ditunjang dengan uji laboratorium. Uji lapangan berupa uji beberapa

bor mesin pada 8 lubang. Lubang tersebut kemudian dipakai untuk pemasangan alat uji lapangan, berupa 3 buah piezometer dan 5 buah strain gauge.

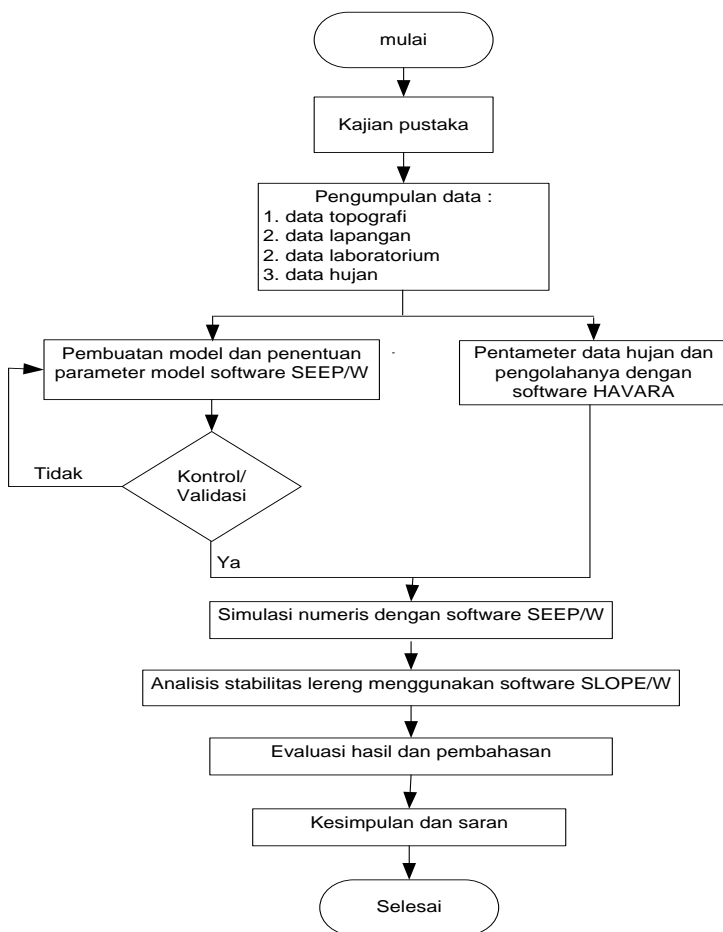
Berdasarkan data bor log dan uji laboratorium, maka diperoleh profil lereng seperti dalam Gambar 3.

Pelaksanaan Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.



GAMBAR. 3 Profil lereng



GAMBAR 4. Bagan alir penelitian

Prosedur penelitian dapat dijelaskan seperti berikut ini.

1. Data topografi lereng, data uji lapangan dan data uji laboratorium digunakan untuk membuat profil lereng, seperti dalam Gambar 3.
2. Data hujan dari tahun 1985 – 2004 didapat dari Stasiun Hujan Kalibawang. Hujan harian maksimum dengan kala ulang tertentu dicari dengan bantuan program HAVARA, sedangkan distribusi hujan tiap jamnya dicari dengan analisis frekuensi.
3. Untuk mengetahui apakah model sudah sesuai dengan kondisi lapangan atau belum, dilakukan kontrol/validasi. Parameter-

parameter yang diperlukan untuk input dalam SEEP/W dan SLOPE/W adalah seperti dalam Tabel 1.

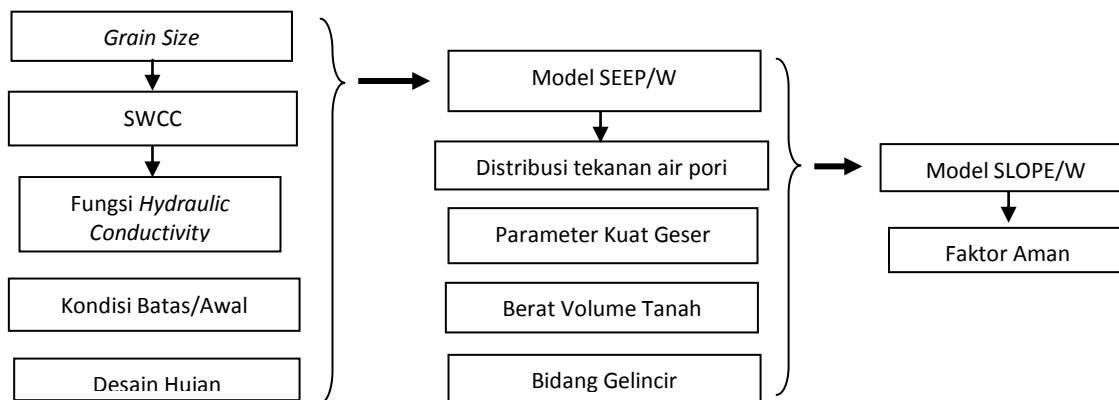
Gambar 5 akan lebih memperjelas langkah-langkah input data dalam penelitian ini.

Parameter-parameter untuk masukan data VWC (Θ_s) dan *hydraulic conductivity* disajikan pada Tabel 2.

Validasi dilakukan terhadap nilai tekanan air pori, antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi. Perbandingan antara nilai tekanan air pori hasil pengukuran dengan nilai tekanan air pori hasil simulasi disajikan pada Gambar 6.

TABEL 1. Data parameter untuk input dalam *software*

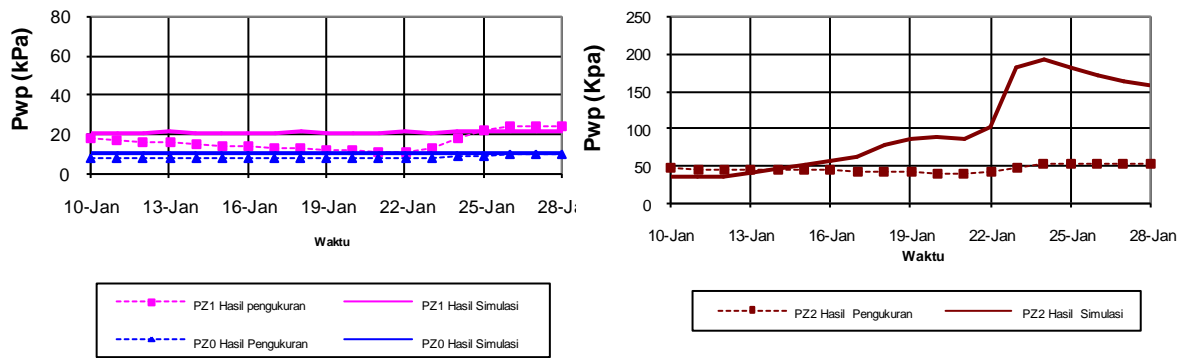
SEEP/W	SLOPE/W
- Fungsi VWC atau SWCC	- Parameter kuat geser efektif
- Fungsi <i>hydraulic conductivity</i>	- Berat volume tanah
- Kondisi awal lereng	- Distribusi tekanan air pori
- Karakteristik hujan	- Bidang gelincir/ <i>slip surface</i>



GAMBAR 5. Langkah-langkah dalam input data

TABEL 2. Data parameter tanah dengan estimasi awal

Tanah	$\Theta_s = n \times S$	ks (m/hari)
1. Lempung	0,562	6,6640e-2
2. Batu Lempung 1	0,250	1,7200e-4
3. Lanau Kelempungan	0,575	1,1920e-2
4. Batu Lempung 2	0,562	6,5040e-2



GAMBAR 6. Perbandingan nilai tekanan air pori hasil pengukuran dan hasil simulasi dengan parameter estimasi awal.

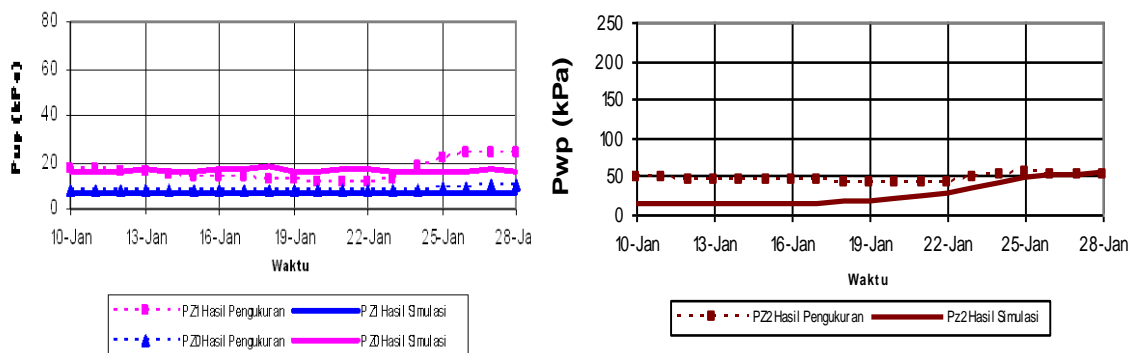
Dari Gambar 6 terlihat masih terdapat perbedaan yang jauh antara nilai tekanan air pori hasil pengukuran dan hasil simulasi. Untuk itu diperlukan estimasi yang lebih tepat pada parameter-parameter tanah di atas. Dilakukan re-estimasi parameter dengan *trial-error* untuk mendapatkan data input yang lebih sesuai dengan hasil pengukuran di lapangan.

Tabel 3 menunjukkan nilai re-estimasi parameter yang hasilnya ditampilkan dalam Gambar 7. Dari Gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai tekanan air pori hasil simulasi sudah mendekati hasil pengukuran di lapangan.

Desain hujan yang dipakai ditampilkan dalam Tabel 4.

TABEL 3. Data parameter tanah re-estimasi

Tanah	$\Theta_s = n \times S$	ks (m/hari)
1. Lempung	0,562	2,3940e-2
2. Batu Lempung 1	0,562	6,5040e-4
3. Lanau Kelempungan	0,575	2,6208e-2
4. Batu Lempung 2	0,562	6,7200e-4



GAMBAR 7. Perbandingan nilai tekanan air pori hasil pengukuran dan hasil simulasi dengan parameter re-estimasi

TABEL 4 Desain hujan untuk simulasi

Model simulasi	Pola hujan	Intensitas P (mm)
I	tanpa hujan	
II	hujan deras durasi pendek selama 4 jam	114
III	hujan normal 40 mm selama 3 minggu, berhenti 10 hari, hujan lagi 25 mm selama 24 hari	40 dan 25
IV	hujan normal selama 3 minggu, berhenti 10 hari, hujan lagi selama 30 hari	20
V	hujan deras 114 mm selama satu hari diikuti hujan normal 20 mm selama 20 hari	114 dan 20
VI	hujan normal 20 mm selama 20 hari diikuti hujan deras 114 mm selama satu hari	20 dan 114

4. Analisis numeris

Alat bantu yang digunakan berupa program SEEP/W untuk menganalisis perubahan tekanan air pori pada lereng. Ada dua kondisi yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu kondisi lereng sebelum ada hujan, dimodelkan dengan analisis *steady state* dan kondisi lereng setelah ada hujan, dimodelkan dengan analisis *transient*. Pada analisis *transient*, kondisi *steady state* digunakan sebagai *initial condition* / kondisi awal.

5. Analisis stabilitas lereng

Setelah distribusi tekanan air pori didapat, maka dilakukan analisis stabilitas lereng dengan program SLOPE/W, dengan memasukkan *output* dari SEEP/W kedalam program SLOPE/W, ditambah dengan parameter-parameter lain yang dibutuhkan, maka akan didapat angka keamanan lereng.

Data Masukan untuk SLOPE/W seperti dalam Tabel 5.

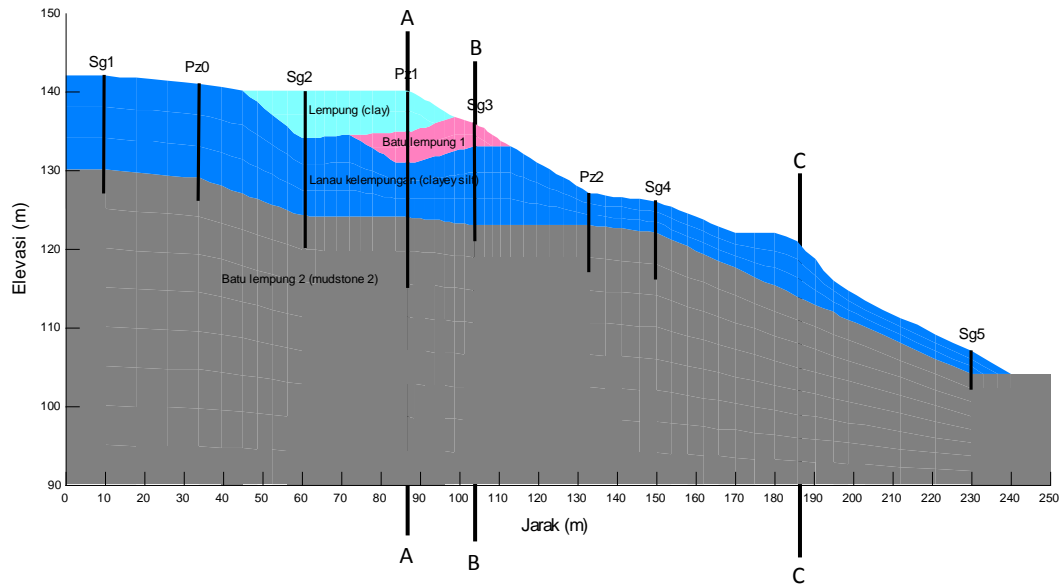
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui pengaruh hujan terhadap perubahan tekanan air pori dan stabilitas lereng, ditinjau satu titik dari masing-masing potongan. Untuk potongan A-A ditinjau titik pada elevasi 135 m atau pada kedalaman 5 m dari permukaan tanah, untuk potongan B-B ditinjau titik pada kedalaman 135 m atau pada kedalaman 1 m dari permukaan tanah, sedangkan untuk potongan C-C ditinjau titik pada elevasi 120 m atau pada kedalaman 1 m dari permukaan tanah, seperti dalam Gambar 8.

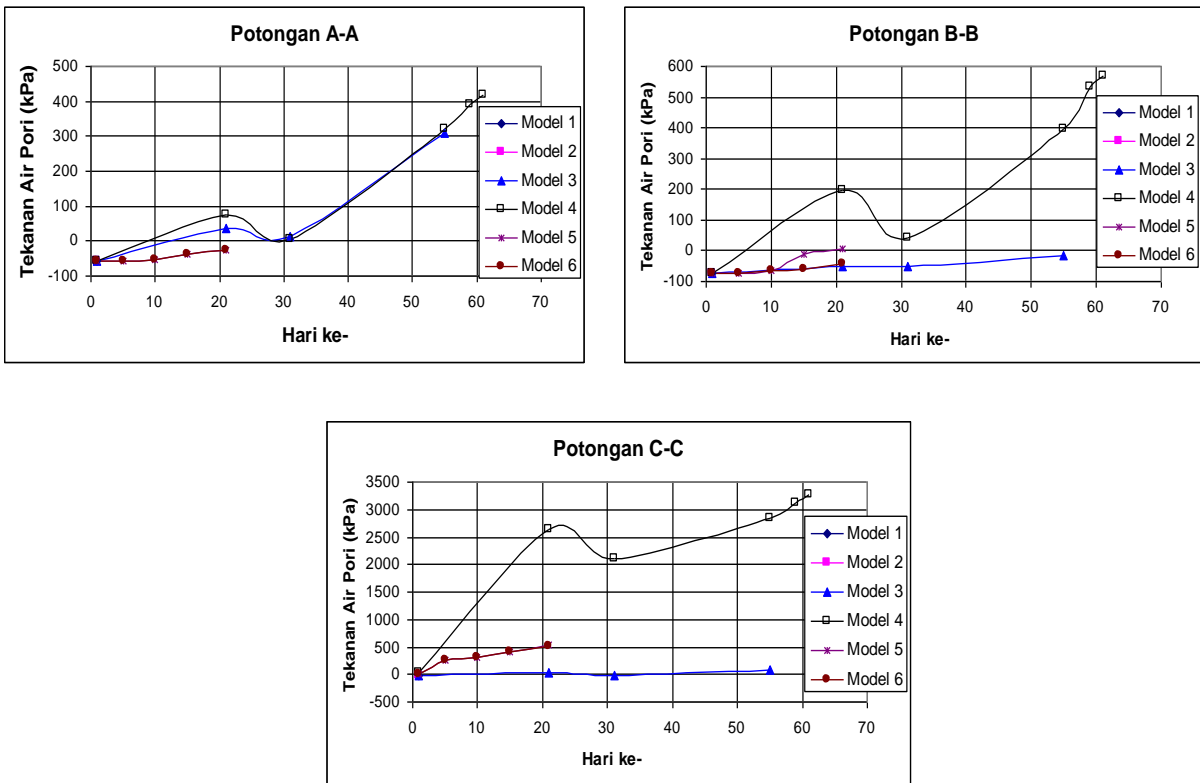
Distribusi tekanan air pori pada masing-masing titik yang ditinjau disajikan dalam Gambar 9 dan Tabel 6.

TABEL 5. Data parameter tanah untuk input dalam SLOPE/W

Lapisan	Metode	Gs	e	w (%)	γ_b (kN/m ³)	ϕ' (...°)	$\phi^{b'}$ (...°)	c (kN/m ²)
1. Lempung	Mohr-coulomb	2,73	1,49	56,86	16,43	6,63	3,315	25
2. Batu lempung 1	Mohr-coulomb	2,64	1,24	50,56	31,5	10	5	70
3. Lanau kelempungan	Mohr-coulomb	2,70	1,4	50,43	15,28	5	2,5	30
4. Batu lempung 2	Bedrock							
5. Bedrock	Bedrock							



GAMBAR 8. Potongan melintang.



GAMBAR 9. Distribusi tekanan air pori pada masing-masing potongan

TABEL 6. Rekapian distribusi tekanan air pori dan angka aman

Model	Waktu	Tekanan Air Pori (kPa)			Angka Aman	Keterangan	
		A-A	B-B	C-C			
1		-58.963	-74.452	-27.564	1,444	Kondisi sebelum hujan	
2	Jam ke-	1	-58.751	-74.458	-27.126	1,437	
		2	-59.455	-73.894	-19.123	1,429	
		3	-59.151	-72.926	-12.084	1,423	
		4	-58.593	-72.016	-2.008	1,418	Lereng stabil
3	Hari ke-	1	-58.751	-74.458	-27.348	1,437	
		21	37.702	-49.479	21.673	1,358	
		31	12.584	-53.088	-10.912	1,372	
		55	309	-14.21	72.456	1,208	Lereng stabil
4	Hari ke-	1	-58.858	-74.058	30.2	1,440	
		21	74	196	2633	1,402	
		31	5.0525	42.1	2118.1	1,405	
		55	320	395.24	2832.5	1,150	
		59	390	531.68	3125.1	1,104	Lereng stabil
		61	420	568.68	3269.2	0,982	Kemungkinan besar lereng longsor
5	Hari ke-	1	-58.751	-74.058	7.322	1,437	
		5	-58.445	-73.546	260	1,424	
		10	-54.344	-63.145	318.2	1,414	
		15	-35.848	-11.243	403.5	1,405	
		21	-27.245	7.872	547.5	1,397	Lereng stabil
6	Hari ke-	1	-58.751	-74.458	9.348	1,440	
		5	-58.445	-73.439	260	1,432	
		10	-54.344	-62.887	318.2	1,422	
		15	-35.848	-61.891	403.5	1,412	
		21	-26.546	-41.756	524	1,402	Lereng stabil

Dari Gambar 9 dan Tabel 6 dapat dilihat bahwa pada potongan A-A dimana posisi lereng datar dan jenis tanah pada permukaan lereng adalah lempung dengan permeabilitas $2,78 \times 10^{-6}$ m/detik, hujan normal 20 mm seluruhnya masuk berinfiltrasi ke dalam lereng. Hujan normal 25 mm dan 40 mm berinfiltrasi sebagian. Sementara hujan deras 114 mm lebih banyak melimpas daripada berinfiltrasi. Seiring bertambahnya waktu, hujan akan mengakibatkan naiknya muka air tanah sekaligus naiknya tekanan air pori. Pada hari-hari awal terjadinya hujan masih terdapat

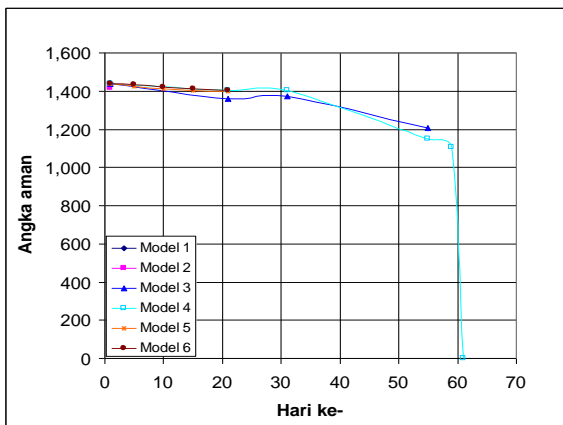
suction, tetapi kemudian berangsur-angsur *suction* berubah menjadi tekanan air pori positif. Dapat disimpulkan bahwa urutan hujan dalam mempengaruhi perubahan tekanan air pori adalah hujan model 4, model 3, model 6, model 5, model 2 dan model 1.

Pada potongan B-B dimana posisi lereng cukup curam dan jenis tanah di atas permukaan adalah batu lempung dengan permeabilitas sebesar $6,94 \times 10^{-9}$ m/detik. Urutan hujan dalam mempengaruhi perubahan tekanan air pori

adalah hujan model 4, model 5, model 3, model 6, model 2 dan model 1.

Pada potongan C-C dimana posisi lereng cukup curam dan jenis tanah di atas permukaan adalah lanau kelempungan dengan permeabilitas $2,62 \times 10^{-7}$ m/detik. Urutan hujan dalam mempengaruhi perubahan tekanan air pori adalah hujan model 4, model 5, model 6, model 3, model 2 dan model 1.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa hujan normal yang berdurasi lama lebih berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori pada lereng yang tersusun dari tanah-tanah berbutir halus. Distribusi angka aman pada masing-masing titik yang ditinjau dari masing-masing model ditampilkan pada Gambar 10.



GAMBAR. 10. Distribusi angka aman pada masing-masing titik yang ditinjau.

Dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa urutan hujan dalam mempengaruhi stabilitas lereng adalah hujan model 4, model 3, model 5, model 6, model 2 dan model 1. Dapat disimpulkan bahwa hujan normal 20 mm yang berlangsung lama mempunyai pengaruh paling besar terhadap penurunan stabilitas lereng.

Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah hujan normal yang berdurasi lama lebih berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori pada lereng yang tersusun dari tanah-tanah berbutir halus. Hujan normal yang berlangsung lama, pada tanah-tanah berbutir halus menyebabkan naiknya muka air tanah sekaligus naiknya tekanan air pori, sehingga proses penjenuhan tanah berlangsung terhadap fungsi waktu. Ketika *suction* mulai turun seiring dengan peningkatan kadar air dalam

tanah, maka kekuatan geser tanah akan berkurang. Ketika tanah jenuh, maka kekuatan geser tanah hilang, sehingga kemungkinan besar terjadilah longsor.

KESIMPULAN

Berdasar hasil pengamatan dan analisis dalam penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Lereng di lokasi penelitian tersusun dari tanah berbutir halus dan batuan yang telah melapuk menjadi lempung, yang rata-rata mempunyai nilai permeabilitas kecil.
2. Ada dua tipe hujan yang sering terjadi di lokasi penelitian, yaitu hujan deras berdurasi pendek dan hujan normal berdurasi lama.
3. Lama hujan rata-rata (durasi hujan) dominan adalah 4 jam.
4. Hujan harian maksimum pada kala ulang dua tahun adalah 114 mm.
5. Pada posisi yang sama, kondisi sebelum hujan masih terdapat tekanan air pori negatif (*suction*) sebesar -74,796 kPa; akibat hujan deras selama 4 jam *suction* turun menjadi -72,016 kPa; akibat hujan 25 mm dan 40 mm *suction* turun menjadi -14,21 kPa; akibat hujan 20 mm *suction* berubah menjadi tekanan air pori positif sebesar 568,68 kPa; akibat hujan deras diikuti hujan normal *suction* berubah menjadi tekanan air pori positif sebesar 7,875 kPa dan akibat hujan normal diikuti hujan deras *suction* turun menjadi -41,756 kPa. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa hujan normal berdurasi panjang lebih berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori daripada hujan deras berdurasi pendek.
6. Angka aman sebelum hujan sebesar 1,444; angka aman akibat hujan 114 mm selama 4 jam sebesar 1,418; angka aman akibat hujan 25 mm dan 40 mm sebesar 1,208; angka aman akibat hujan 20 mm sebesar 0,982; angka aman akibat hujan deras diikuti hujan normal sebesar 1,397 dan angka aman akibat hujan normal diikuti hujan deras sebesar 1,402. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kondisi yang paling berpengaruh terhadap

stabilitas lereng di lokasi tersebut adalah hujan normal 20 mm berdurasi panjang.

7. Hujan normal yang berdurasi lama lebih berpengaruh terhadap perubahan tekanan air pori pada lereng yang tersusun dari tanah-tanah berbutir halus. Hujan normal yang berlangsung lama, pada tanah-tanah berbutir halus menyebabkan naiknya muka air tanah sekaligus naiknya tekanan air pori, sehingga proses penjenuhan tanah berlangsung terhadap fungsi waktu. Ketika *suction* mulai turun seiring dengan peningkatan kadar air dalam tanah, maka kekuatan geser tanah akan berkurang. Ketika tanah jenuh, maka kekuatan geser tanah hilang, sehingga kemungkinan besar terjadilah longsor.

Seminar Nasional Inovasi Teknologi Bahan Bangunan Untuk Meningkatkan PAD Dan Beberapa Kemajuan Untuk Menyelesaikan Permasalahan Bidang Teknik Sipil, Program S-I Ekstensi (Swadaya), Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

User's Guide (2002). *SEEP/W for Finite Element Seepage Analysis Version 5*, GEOSLOPE INTERNASIONAL Ltd. Calgary, Alberta, Canada.

User's Guide (2002). *SLOPE/W for Slope Stability Analysis Version 5*, GEOSLOPE INTERNASIONAL Ltd. Calgary, Alberta, Canada.

DAFTAR PUSTAKA

- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley and Sons.
- Gofar, N. & Setiawan, B. (2002). Pengaruh Peningkatan Kandungan Air terhadap Potensi Keruntuhan Lereng Tanah. *Prosiding Seminar Nasional SLOPE 2002*, Universitas Katholik Parahyangan, Bandung 27 April 2002.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Karnawati, D. (1996). Rain-Induced Landslides Problems in West Java, *Jurnal Media Teknik* no. 3 XVIII Edisi November, Yogyakarta.
- Karnawati, D. (1997). Prediction of Rain-Induced Landsliding by Using Slope Hydrodynamic Numerical Model. *Jurnal Forum Teknik* Jilid 20 no. 1 Januari 1997, Yogyakarta.
- Karnawati, D. (2001). Tanah Longsor di Indonesia; Bahaya dan Mitigasinya, *Prosiding Studium General Pencegahan dan Penanganan Bahaya Tanah Longsor*, Yogyakarta.
- Suhendro, B. (2000). *Mekanika kontinum*, Edisi I, Yogyakarta: Beta Offset.
- Suryolelono, K. B. (2004). Menguak Misteri Candi Borobudur; Tinjauan Geoteknik Terhadap Stabilitas Lereng, *Prosiding*

PENULIS:

Hesti Subiyanti
Alumni S2 Geoteknik, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Ahmad Rifa'i, Rachmad Jayadi
Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika no. 2, Yogyakarta.