

ANALISIS PERUBAHAN NILAI SUCTION AKIBAT HUJAN TERHADAP KESTABILAN LERENG

Martini*

Abstract

Infiltration of rainfall into slope will have an effect on to condition of slope hydrology and more specifically to characteristic of slope soils, for example pore water pressure value, level of saturation, weight contents of soil, shear strength of soil. Pore water pressure value at dry soil condition or wet condition called as with pore water pressure value negative or value suction. This suction value will tend to declines and in the end becomes equal to zero or bigger than 0 (positive pore water pressure) in the event of change of the water content from condition unsaturated to saturated condition. Speed of value change suction becomes positive pore water pressure most influenced by rain intensity. Value suction which is quickest fastest changed at slope at foot of slope.

Keyword: slope, suction, slope soils

1. Pendahuluan

Suatu daerah berpotensi untuk longsor atau tidak, dapat diamati melalui kondisi yang ada di lapangan. Bekas-bekas longsoran yang ada di lapangan dapat digunakan sebagai petunjuk dan kemudian dilakukan analisis untuk memperkirakan faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya longsoran-longsoran tersebut serta usaha pencegahan longsoran susulan.

Dari hasil-hasil penelitian mengenai peristiwa longsoran, longsoran sering terjadi terutama pada musim hujan. Terjadinya longsoran biasanya diawali dengan turunnya hujan deras. Longsoran terjadi pada saat sedang hujan atau setelah hujan berhenti. Perubahan kondisi hidrologi lereng saat terjadi infiltrasi air hujan sulit untuk diamati secara langsung di lapangan, terutama pada saat terjadi longsoran.

Perubahan kondisi hidrologi lereng dari kondisi tidak jenuh menjadi jenuh, berakibat perubahan nilai tekanan air pori negatif (*suction*) menjadi tekanan air pori positif. Perubahan nilai tekanan air pori dalam lereng akan berpengaruh pada kestabilan lereng. Tujuan penulisan ini adalah untuk mengetahui perubahan tekanan air pori pada lereng akibat infiltrasi air hujan terhadap kestabilan lereng, serta untuk mengetahui pola perubahan

distribusi tekanan air pori negatif (*suction*) menjadi tekanan air pori positif pada lereng.

2. Tinjauan Pustaka

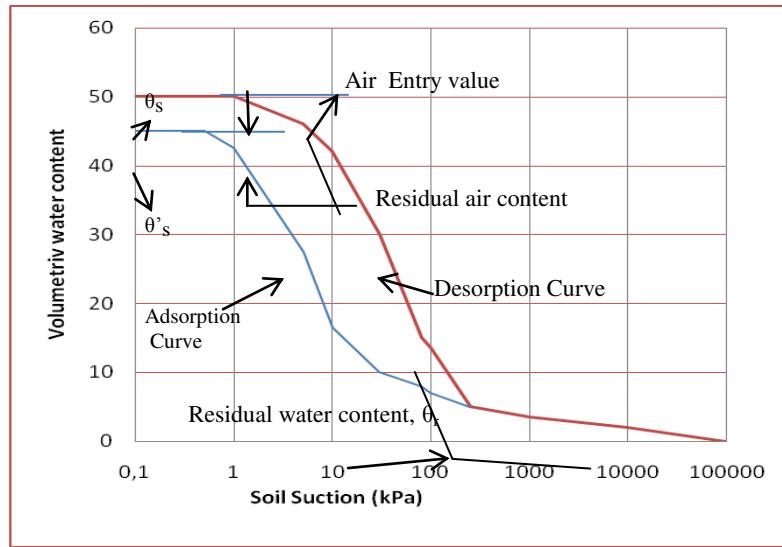
2.1 Soil - water characteristic curve

Soil - water characteristic curve juga dikenal dengan istilah *soil - water retention* yaitu kurva yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air dan digambarkan dalam hubungan kadar air dan *suction*. Semakin tinggi *suction* maka volume air dan tingkat kejemuhan semakin rendah. Sebaliknya semakin rendah *suction*, volume air dan tingkat kejemuhan semakin tinggi. *Soil-water characteristic curve* diperoleh melalui *test pressure plate*. Gambar 1 memperlihatkan bentuk dan variabel-variabel yang ada pada *soil-water characteristic curve*.

2.2 Hubungan Suction dan Koefisien permeabilitas

Kemampuan fluida mengalir melalui medium berpori disebut permeabilitas. Untuk masalah geoteknik, fluida adalah air dan medium yang berpori adalah massa tanah. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan lainnya. Sehingga air dapat mengalir dari titik yang mempunyai energi lebih tinggi ke titik yang mempunyai energi lebih rendah.

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu



Gambar 1 Definisi variabel-variabel yang terdapat pada *soil-water characteristic curve*

Dalam tanah jenuh koefisien permeabilitas nilainya konstan. Hal ini terjadi karena dalam tanah jenuh, kadar airnya jumlahnya konstan/tetap. Biasanya disebut sebagai *saturated permeability* (ks). *Saturated permeability* tanah dapat diperoleh dengan melakukan pengujian di laboratorium memakai metode constan atau falling head.

Koefisien permeabilitas untuk tanah tidak jenuh (*unsaturated permeability*, kw) nilainya tidak konstan dan lebih kecil dari *saturated permeability* (ks). Besarnya merupakan fungsi dari kadar air dan juga fungsi dari pore pressure. Bila pore water pressure dalam tanah berkurang menjadi negatif, maka kadar airnya juga akan berkurang dan akhirnya koefisien permeabilitasnya juga berkurang. Negatif pore pressure (tekanan air pori negatif) adalah *matric suction*. Dengan kata lain semakin tinggi *matric suction* maka koefisien permeabilitasnya semakin rendah. Sebaliknya semakin rendah *matric suction* maka koefisien permeabilitasnya semakin tinggi. Pada saat *suction* menjadi nol, koefisien permeabilitasnya menjadi konstan karena kondisi tanah sudah jenuh.

Koefisien permeabilitas tanah tidak jenuh dapat ditentukan dari kurva *soil-water characteristic*. Beberapa persamaan empirik telah dikembangkan untuk mendapatkan hubungan antara koefisien permeabilitas dengan volume air atau tingkat kejenuhan dalam tanah. Yaitu oleh

Gardner (1958), Brook dan Corey (1964) dan Van Genuchten (1980).

Genuchten (1980) memberikan persamaan untuk menghitung relatif koefisien permeabilitas , kr ;

$$kr(h) = \frac{\left\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\right\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \dots\dots(1)$$

dengan ; kr adalah relatif koefisien permeabilitas (rasio antara kw dan ks), h adalah *pressure head*, α , m, n adalah parameter konstan yang diperoleh dari kurva.

2.3 Aliran Air Tanah Jenuh (*saturated*) dan Tidak Jenuh (*unsaturated*)

Tiga tipe pergerakan air yang terjadi dalam tanah adalah aliran jenuh (*saturated flow*), aliran tidak jenuh (*unsaturated flow*) dan pergerakan uap (*vapour*). Aliran air tanah merupakan gambaran gradien total potensial air dari satu zona tanah ke zona tanah lainnya.

Aliran air tanah jenuh terjadi bila seluruh pori-pori tanah terisi oleh air, dan terjadi pada arah horisontal, vertikal ke atas dan ke bawah bila ada gradien tekanan. Pada kondisi ini tekanan potensialnya adalah positif. Daerah jenuh biasanya

terletak pada daerah yang mempunyai drainase jelek dan berada pada tempat yang rendah, pada daerah dengan drainase yang baik namun berada di atas lapisan lempung, serta pada tanah-tanah bagian atas saat atau setelah hujan deras.

Aliran air tanah tidak jenuh adalah kondisi normal yang terjadi pada hampir semua tanah di alam sepanjang waktu. Ciri dari kondisi ini adalah tidak ada gradien hidraulik, tidak ada air dalam pori-pori tanah yang berukuran besar, tetapi air hanya terdapat pada pori-pori tanah yang berukuran kecil. Hal ini terjadi karena adanya gaya adhesi dan kohesi sehingga air yang ada merupakan air serapan dan gaya kapiler. Dalam tanah tidak jenuh gradien *matric* potensial dari satu zona ke zona lainnya merupakan pendorong terjadinya pergerakan air. Air mengalir melalui lapisan-lapisan air serapan dan pori-pori kapiler, air cenderung untuk seimbang dan bergerak dari zona dengan potensial tinggi ke zona potensial rendah dan prosesnya sangat lambat. Koefisien permeabilitas pada kondisi tidak jenuh akan berubah-ubah seiring dengan perubahan tingkat kejemuhan yang terjadi.

Perubahan dari kondisi jenuh ke tidak jenuh umumnya memerlukan penurunan koefisien permeabilitas. Pada saat *suction* tinggi atau nilai pembasahan menjadi rendah, permeabilitas mungkin akan menjadi sangat rendah.

2.4 Infiltrasi hujan

Infiltrasi dapat didefinisikan sebagai proses masuknya air ke dalam tanah. Kapasitas infiltrasi (*infiltration capacity*) adalah volume maksimum air yang masuk dari permukaan tanah (dalam satuan kecepatan). Laju infiltrasi (*infiltration rate*) adalah volume dari air yang melewati permukaan tanah dan mengalir dalam profil tanah. Laju infiltrasi ditentukan oleh banyaknya air yang tersedia pada permukaan tanah, sifat dari permukaan tanah, kemampuan tanah untuk mengalirkan infiltrasi air dari permukaan.

Kemampuan tanah untuk melewaskan air tergantung pada ukuran, jumlah dan hubungan antar void serta perubahan dalam ukuran akibat sifat kembang susut mineral lempung pada saat pembasahan. Tanah yang mendekati kering mempunyai kapasitas infiltrasi awal yang lebih tinggi dibanding dengan tanah-tanah yang mempunyai kadar air tinggi.

Efek dari laju infiltrasi hujan adalah hilangnya suction dalam zona tidak jenuh, perubahan tekanan air pori serta menurunnya kekuatan geser tanah.

Kapasitas infiltrasi biasanya berkurang apabila kondisi :

- a. permukaan tanah yang jenuh disebabkan oleh penurunan gradien hidraulik dekat permukaan tanah. Hal ini dapat terjadi setelah periode hujan yang panjang, dan kondisi lapisan tanah yang berada di bawah permukaan mempunyai permeabilitas yang rendah. Juga aliran air yang berasal dari lereng bagian atas,
- b. permukaan tanah berubah. Mineral lempung mengurangi ukuran pori bila mengembang, terutama yang dekat dengan permukaan karena tekanan overburden pada tanah relatif ringan. Penghilangan tanaman penutup, pekerjaan-pekerjaan manusia, binatang dan mesin dapat merubah struktur permukaan.
- c. Laju infiltrasi selama hujan

Mein dan Larson (1973) memperlihatkan laju infiltrasi air hujan ke dalam tanah tidak jenuh sebagai fungsi dari waktu dengan kondisi yang berbeda-beda seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.

Kurva A memperlihatkan hubungan antara flux atau intensitas hujan yang konstan dan lebih kecil dari koefisien permeabilitas jenuh. Laju infiltrasi sama dengan intensitas hujan bila kapasitas infiltrasi minimum dari tanah sama dengan koefisien permeabilitas dan gradien hidraulik kurang dari 1.

Kurva B menggambarkan laju infiltrasi dengan kondisi terjadi ponding atau *pressure head* pada permukaan tanah sama dengan nol. Infiltrasi awal lebih besar dari *saturated* koefisien permeabilitas. Hal ini terjadi karena tajamnya gradien hidraulik ke arah bawah yang disebabkan oleh nilai *suction* pada permukaan adalah nol. Laju infiltrasi akan berkurang seiring dengan berjalannya waktu, karena air terus-menerus masuk ke dalam tanah dan menyebabkan *matric suction* awal tanah menjadi hilang. Dengan kata lain proses pembasahan menyebabkan berkurangnya *matric suction* pada tanah serta perubahan gradien *pressure head*. Semakin ke bawah gradien hidraulik yang vertikal berubah seiring dengan berjalannya waktu sebagai akibat proses infiltrasi. Pada akhirnya laju infiltrasi akan mencapai nilai minimum yaitu sama

dengan *saturated* koefisien permeabilitas dari tanah.

Kurva C dan D memperlihatkan kondisi dengan hujan yang konstan namun intensitasnya melebihi *saturated* koefisien permeabilitas dari tanah. Laju infiltrasi sama dengan intensitas hujan pada saat mulai hujan. Karena air terus-menerus masuk ke dalam tanah, akhirnya *suction* dan gradien hidraulik menjadi turun yang akhirnya laju infiltrasi juga akan menurun pada suatu waktu (t). t adalah waktu yang diperlukan untuk penurunan laju infiltrasi dari kurva C ke D berhubungan dengan ponding pada permukaan tanah. Run off bisa terjadi pada kondisi ini jika permukaan tidak ada drainase.

3. Metode Penelitian

3.1 Pemodelan hidrologi lereng dan analisis kestabilan lereng

Dalam pemodelan hidrologi lereng dan analisis kestabilan lereng ada beberapa batasan dan asumsi yaitu :

- 1) pemodelan hidrologi lereng untuk kondisi awal (tanpa hujan) dan saat ada hujan memakai program SEFTRANS (*Simple and Efficient Flow and Transport Model*), Oxford Geotechnica International, 1995) dan analisis kestabilan lereng menggunakan program

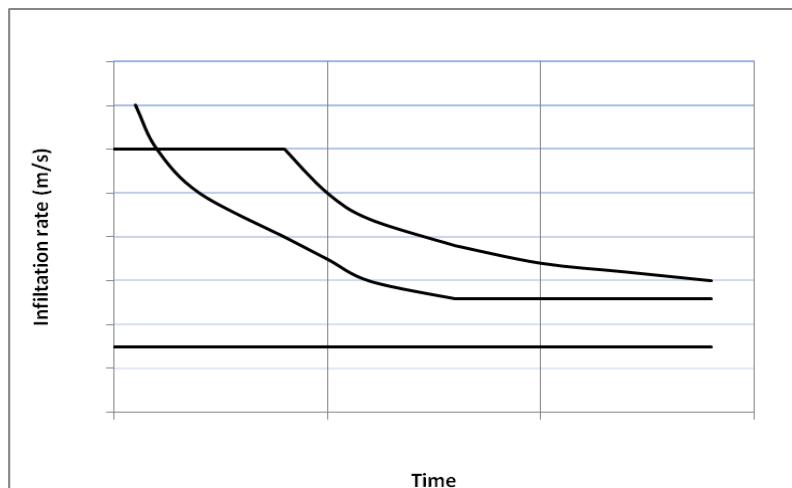
GEOSTAR 3.4, Oxford Geotechnica International, 1995,

- 2) model untuk pemodelan hidrologi dan analisis kestabilan lereng adalah penampang/profil lereng yang di gambarkan dalam skala 2 dimensi yaitu arah X dan Y, serta diasumsikan kondisi geologi dan material penutup lereng bersifat homogen.
- 3) pengaruh vegetasi dalam pemodelan hidrologi lereng dan analisis kestabilan dianggap tidak ada,
- 4) pada kedua program tersebut ada keterbatasan bahwa parameter sifat-sifat tanah sebagai data masukan nilainya dianggap tetap/konstan.

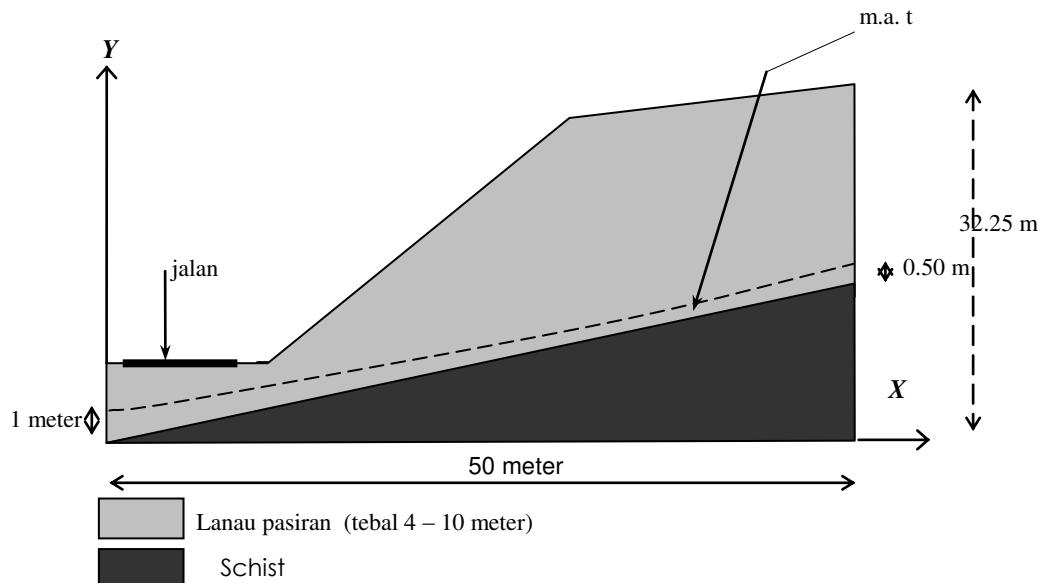
a. Model kondisi hidrologi lereng awal

Tujuan membuat model hidrologi lereng kondisi awal adalah untuk mengetahui gambaran kondisi lereng sebelum hujan dan sebagai model awal pemodelan hujan. Tampilannya adalah berupa letak muka air tanah pada lereng. Muka air tanah dimodelkan sebagai rembesan air yang mengalir di atas permukaan lapisan kedap air (lapisan batuan), dan muka air ini bersifat fluktuatif.

Pada bagian puncak kedalaman muka air tanah dari batas lapisan kedap air (batuan) adalah 0,50 meter sedangkan pada bagian kaki lereng adalah 1 meter. Kondisi ini diasumsikan sebagai muka air pada awal musim hujan.



Gambar 2 Hubungan laju infiltrasi ke dalam tanah dengan kondisi yang berbeda-beda sebagai fungsi waktu (Mein dan Larson, 1973).



Gambar 3. Model kondisi awal hidrologi lereng

b. Data masukan (*input*) pada program

Untuk melakukan pemodelan hidrologi diperlukan data masukan mengenai geometri lereng, sifat-sifat tanah atau batuan dalam lereng, baik pada pemodelan kondisi awal hidrologi lereng sebagai kondisi awal pemodelan dan pemodelan hidrologi lereng saat ada hujan. Parameter data-data tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

- 1) geometri lereng yang terdiri dari tinggi dan panjang lereng. Geometri lereng digambarkan dalam susunan elemen-elemen. Bentuk elemen yang digunakan adalah elemen segitiga dan segi empat,
- 2) sifat-sifat tanah penyusun lereng
 - koefisien permeabilitas jenuh (ks) arah x dan y, K_x dan K_y ($m/detik$),
 - *spesifik storage* (S_s), m^{-1} ,
 - porositas (n),
 - parameter *suction* yaitu α , β dan γ yang diperoleh dari hubungan *suction* dan tingkat kejemuhan (persamaan 3.7.5),
 - parameter relatif koefisien permeabilitas, yaitu parameter a dan b (persamaan 3.7.3),

- 3) memodelkan kondisi hidrologi lereng awal dengan memasukan data

- posisi dan *head* untuk mendefinisikan letak muka air tanah (m),
- 4) memodelkan adanya hujan adalah dengan memasukan data
- posisi dan nilai *flux* untuk mendefinisikan intensitas hujan yang terjadi.

c. Hasil keluaran (*output*) pada program

Hasil dari pemodelan ditampilkan dalam bentuk gambar. Tampilannya dapat digambarkan menggunakan kontur, vektor dan pewarnaan. Keluaran program seftrans antara lain :

- kecepatan *Darcy* pada arah x dan y,
- tekanan air pori di pusat setiap elemen,
- tingkat kejemuhan di setiap elemen,
- koefisien permeabilitas arah x dan y pada setiap elemen,
- *piezometrik head* pada setiap titik,
- *spesifik storage* (S_s) pada setiap elemen.

Tabel 1. Sifat tanah penyusun lereng untuk pemodelan hidrologi dan kestabilan lereng

No	Sifat tanah	Satuan	Besarnya	Keterangan
1.	Kohesi (c)	KN/m ²	7	
2.	Sudut gesek (ϕ')	(°)	36,5	
3.	Berat jenis (Gs)	-	2,652	
4.	Angka pori	-	1,088	
5.	Berat volume	kN/m ³	berdasarkan tingkat kejemuhan tanah penyusun	Data masukan untuk analisis kestabilan lereng (GEOSTAR)
6.	Koefisien permeabilitas	m/det	2.7346 E-6	
7.	Porositas (n)	-	0,5211	
8.	Parameter <i>suction</i> : <i>Air entry value</i> (ψ_a)	m	0,01	
	Residual water saturation	-	0,1842	
α		/m	5,1304	
β		-	0,73962	
γ		-	0,90291	
a		-	-3,0267	
b		-	2,95423	

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Distribusi tekanan air pori pada lereng kondisi initial dan terjadi

Gambar 4 memperlihatkan distribusi tekanan air pori dan letak muka air tanah kondisi hidrologi lereng awal, nilai tekanan air pori adalah negatif (*suction*) berkisar 0 sampai -100 kPa dan faktor aman (F) awal (sebelum hujan) adalah 2,79, hal ini menunjukkan bahwa kondisi lereng tidak jenuh, terutama pada bagian permukaan lereng nilai *suction* sangat tinggi. Tekanan air pori pada batas muka air tanah adalah sama dengan nol. Pada lapisan impermeabel tidak timbul tekanan air pori karena lapisan terdiri dari material batuan.

Gambar 5 memperlihatkan kondisi hidrologi lereng saat longsor setelah hujan 70 mm/jam selama 10 jam, hasil analisis stabilitas lereng diperoleh faktor aman $F = 0,942$, nilai *suction* (tekanan air pori negatif) pada permukaan lereng berkurang bahkan hilang dan berubah menjadi 0 (nol). Terjadi perubahan pola distribusi tekanan air pori dari kondisi awal (gbr 5). Akibat infiltrasi air hujan ke dalam lereng kondisi lereng yang awalnya tidak jenuh berangsur-angsur berubah menjadi jenuh, perubahan ini mengakibatkan tekanan air pori negatif menjadi berkurang nilainya dan pada akhirnya menjadi nol. Tekanan air pori negatif (*suction*) pada lereng merupakan gaya yang dapat meningkatkan tahanan geser pada lereng, sehingga saat nilai *suction*

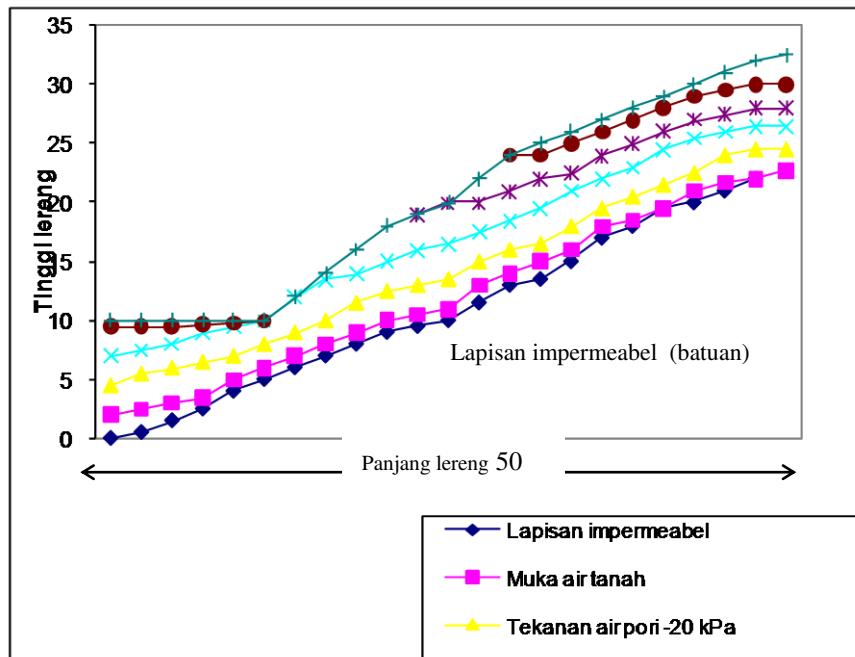
menurun maka tahanan geser yang terjadi juga menurun akibatnya kestabilan lereng juga menurun, hal ini ditunjukkan dengan nilai faktor aman. Bila faktor aman < 1 maka lereng telah longsor.

Menurunnya *suction* dan berubah menjadi tekanan air pori bukan karena muka air tanah naik (muka air tanah tetap) tetapi karena masuknya air ke dalam lereng (*infiltrasi*) serta rembesan air dalam lereng.

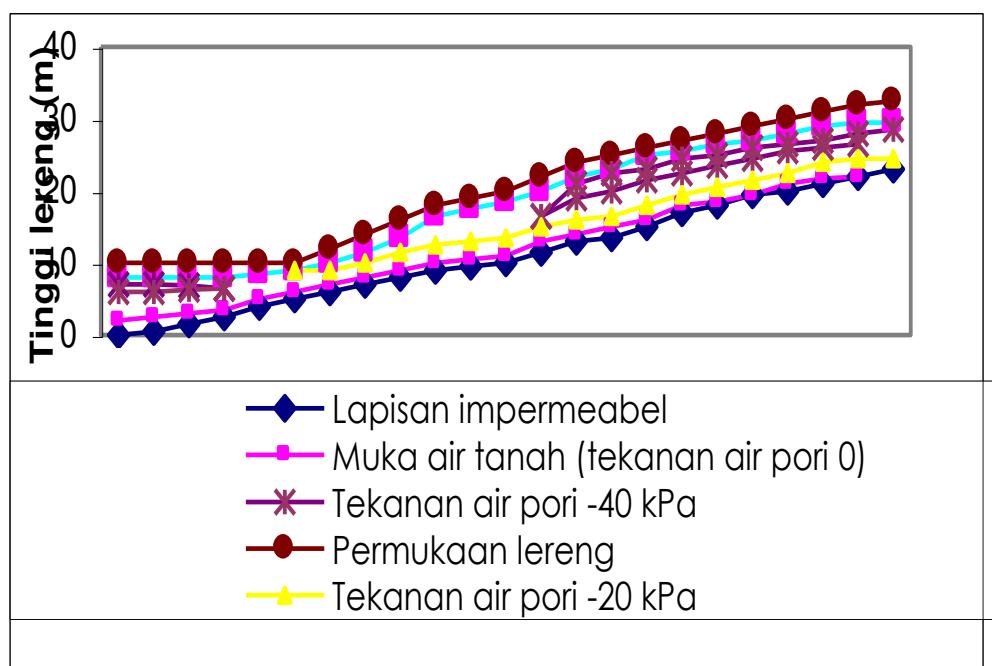
4.2 Mekanisme Berkurangnya Kestabilan Lereng Akibat Hilangnya *Suction*

Mekanisme berkurangnya kestabilan lereng akibat hujan terjadi karena hilangnya *suction* dan meningkatnya berat volume tanah. Mekanisme yang disebabkan oleh meningkatnya tekanan air pori karena naiknya muka air tanah tidak terjadi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa hilangnya *suction* lebih berpengaruh dalam menurunkan kestabilan pada lereng yang diakibatkan oleh hujan.

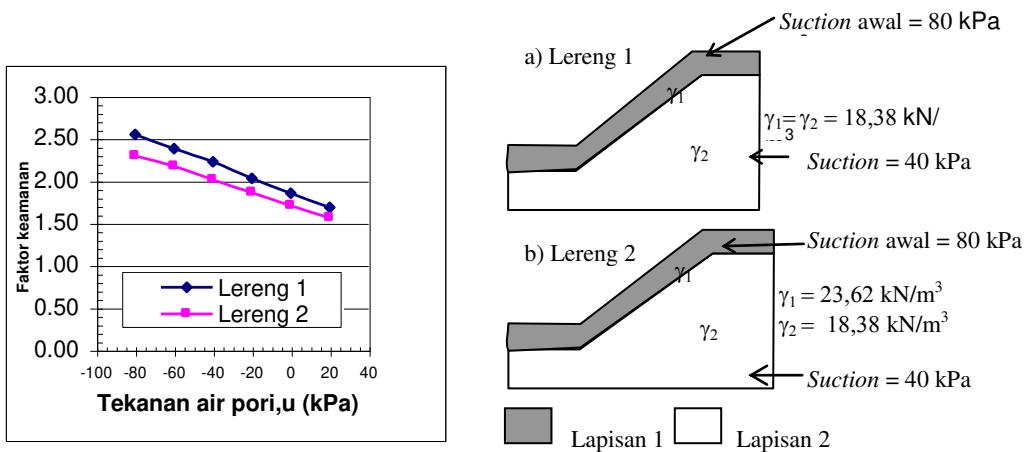
Dengan model lereng yang berbeda (gambar 6), akibat penurunan *suction* pada lapisan 1, dari *suction* 80 kPa berangsur turun menjadi tekanan positif 20 kPa, hasilnya adalah untuk model lereng-1 penurunan faktor aman adalah 0,8637 dan model lereng-2 adalah 0,7304. Nilai *suction* yang berubah hanya pada lapisan 1 sedangkan pada lapisan 2 tetap.



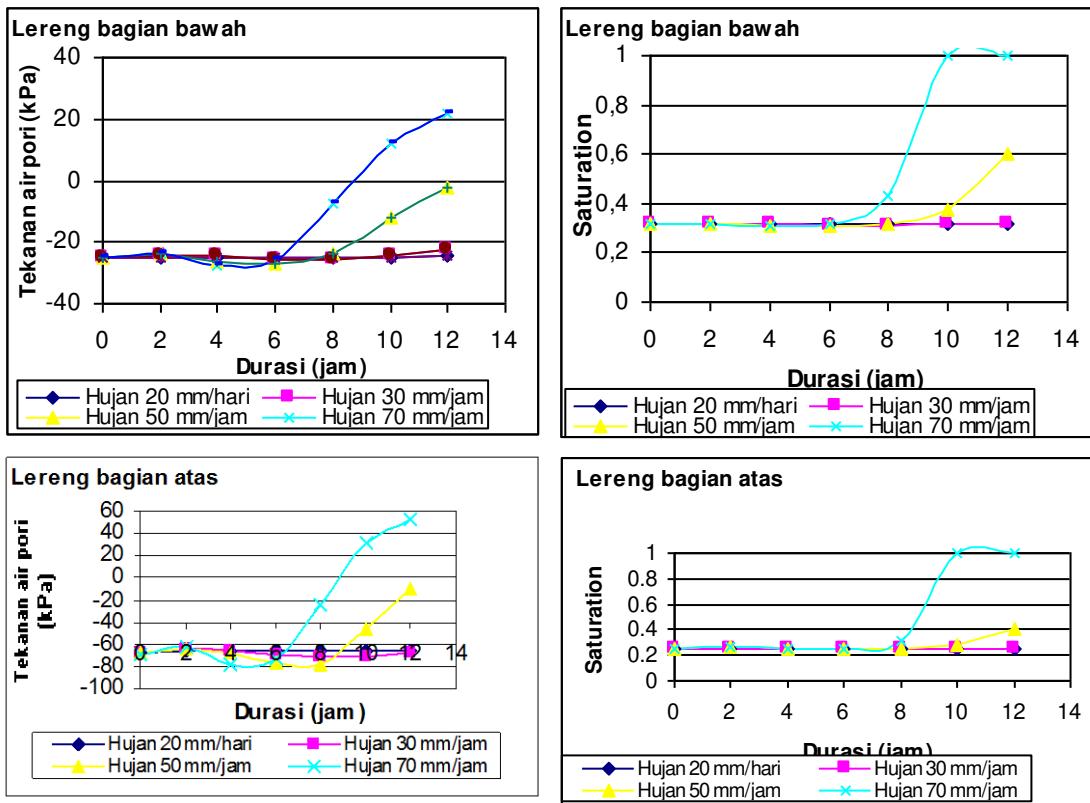
Gambar 4. Distribusi Tekanan air Pori Pada Kondisi Awal



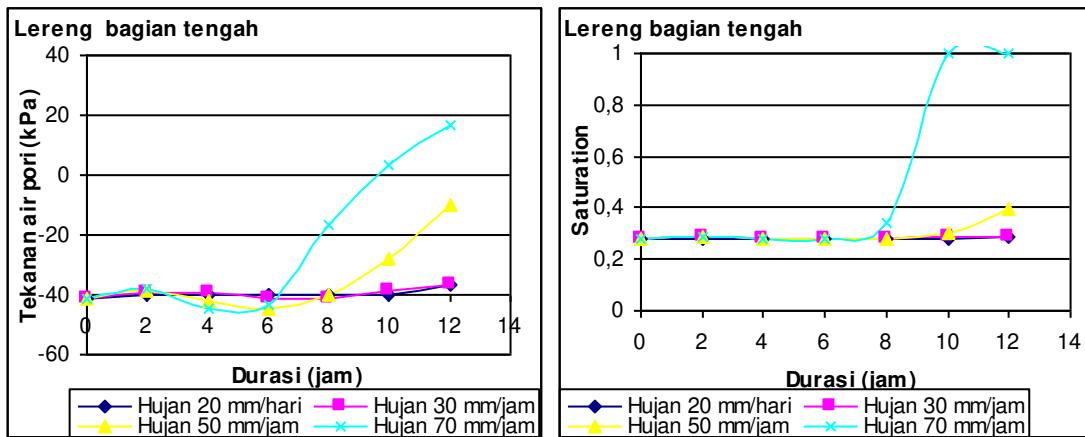
Gambar 5. Distribusi tekanan air pori dalam lereng setelah hujan 70 mm/jam selama 10 jam



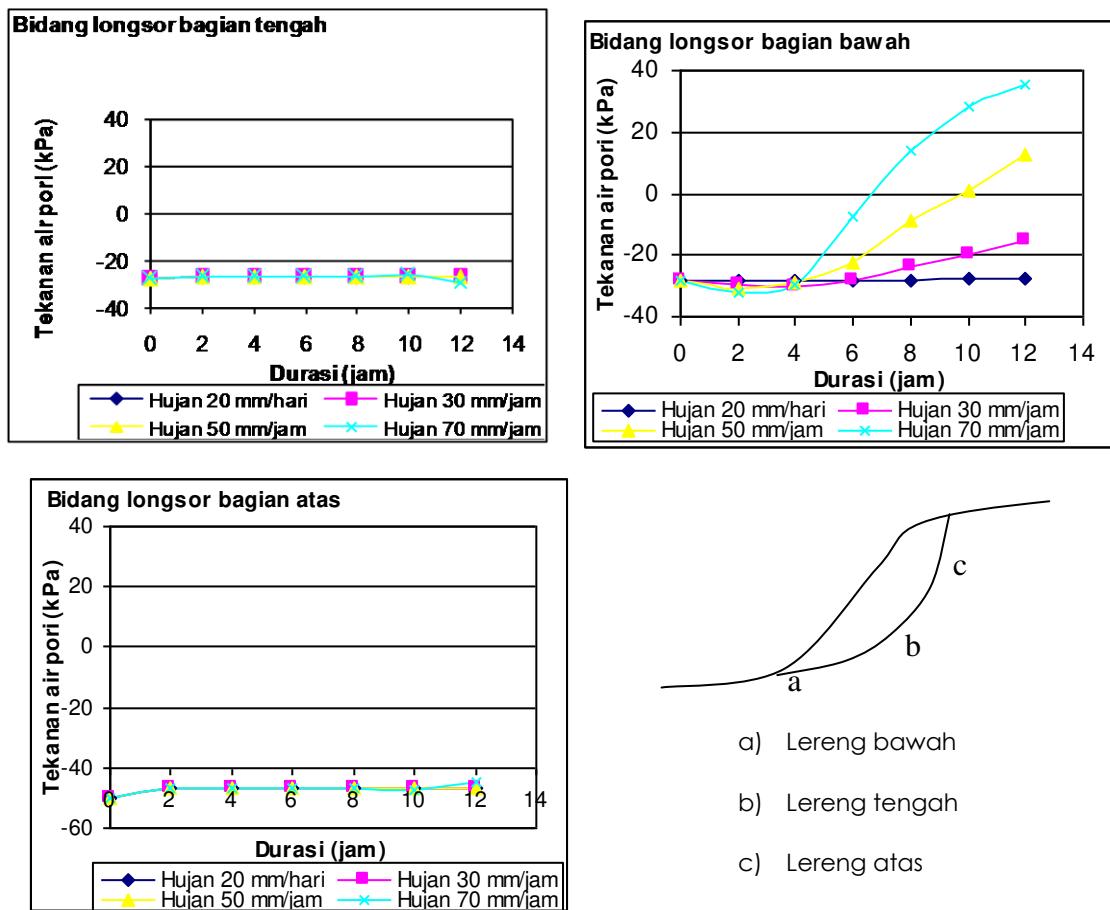
Gambar 6. Penurunan kestabilan lereng akibat penurunan/hilangnya *suction*



Gambar 7. Trend perubahan nilai tekanan air pori pada lereng dengan intensitas hujan yang berbeda.



Gambar 7. Trend perubahan nilai tekanan air pori pada lereng dengan intensitas hujan yang berbeda. (lanjutan)



Gambar 8. Trend perubahan nilai tekanan air pori pada titik-titik yang ditinjau pada bidang longsor terhadap intensitas hujan yang berbeda.

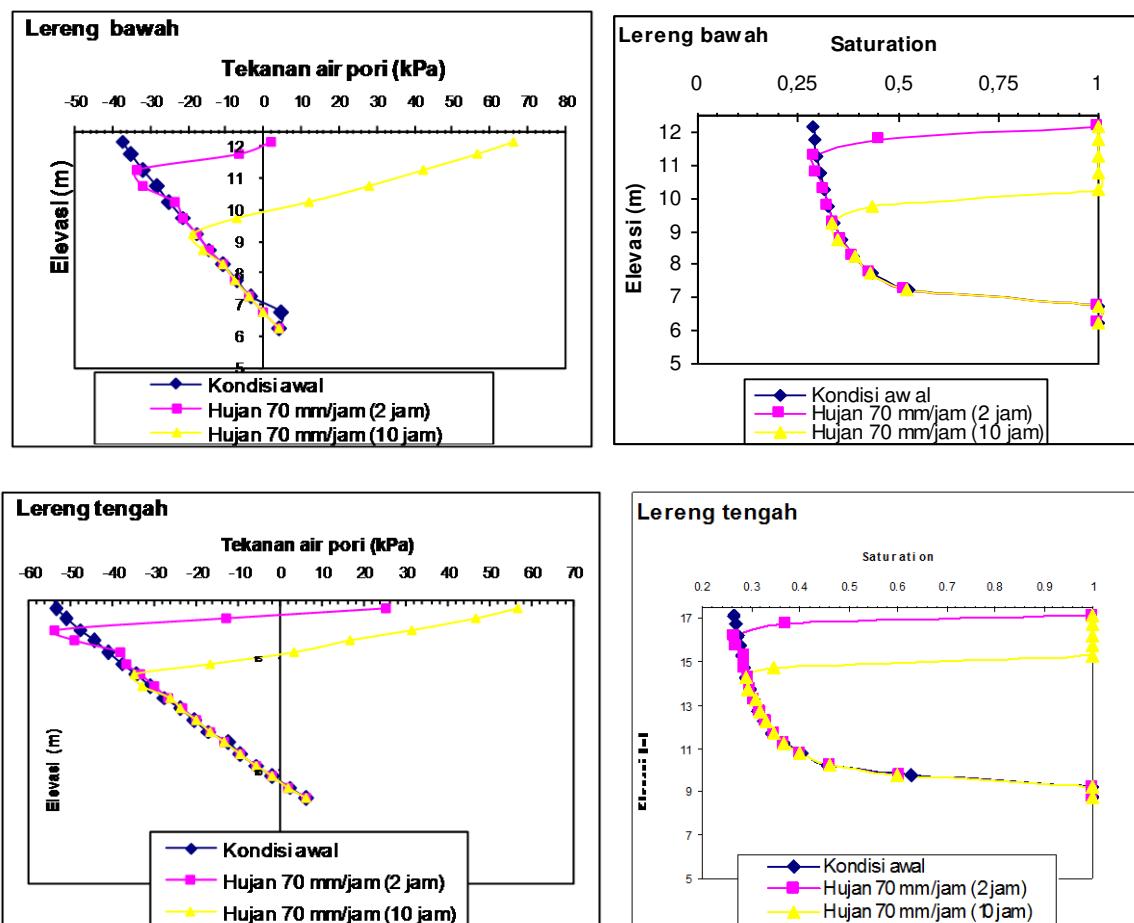
4.3 Perubahan nilai tekanan air pori negatif (*suction*) pada lereng

Gambar 7. memperlihatkan trend perubahan tekanan air pori dan saturation untuk hujan 30 mm/jam, 50 mm/jam 70 mm/jam dan 20 mm/hari dari kondisi awal hingga 12 jam hujan pada beberapa titik di lereng dimana jaraknya , dari permukaan lereng adalah 2 m. Perubahan nilai tekanan air pori dalam hal ini *suction* dan *saturation* paling besar terjadi di lereng bagian bawah.

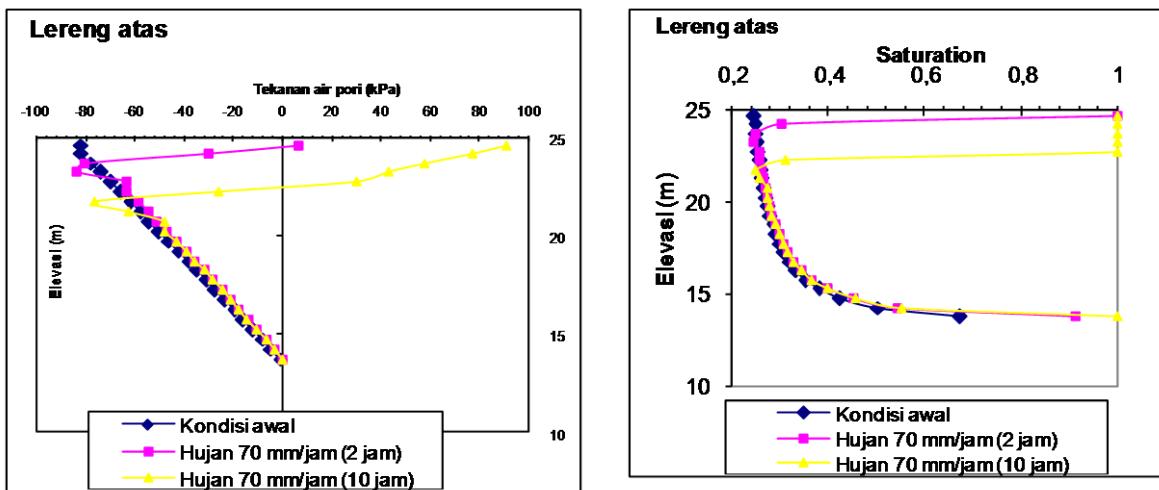
Dari gambar tersebut terlihat bahwa laju penurunan nilai *suction* dan *saturation* lebih cepat ketika hujan intensitas 70 mm/jam dibandingkan dengan 3 (tiga) tipe hujan lainnya. Saat hujan 20 mm/hari perubahan nilai *suction* bergerak sangat

lambat . Sehingga dapat disimpulkan bahwa laju perubahan nilai *suction* dan *saturation* pada lereng yang diakibatkan hujan tergantung pada intensitas hujan yang terjadi. Semakin tinggi intensitas hujan maka laju penurunan *suction* dan *saturation* semakin cepat.

Perubahan nilai *suction* pada bidang longsor diperlihatkan pada gambar 8, dari gambar ini terlihat bahwa perubahan nilai *suction* paling besar terjadi di bidang longsor pada lereng bagian bawah. Terlihat juga bahwa yang menyebabkan penurunan nilai *suction* paling cepat adalah hujan 70 mm/jam.



Gambar 9. Profil perubahan distribusi tekanan air pori dan *saturation* dalam lereng akibat hujan 70 mm/jam.



Gambar 9. Profil perubahan distribusi tekanan air pori dan *saturation* dalam lereng akibat hujan 70 mm/jam. (lanjuiytan)

Profil distribusi tekanan air pori dan tingkat kejemuhan pada lereng saat kondisi awal dan setelah ada hujan dapat dilihat pada gambar 9, *Suction* di lereng bagian bawah (0,30 m dari permukaan lereng) sebelum hujan sebesar 37,50 kPa (3,75 m) dan setelah hujan 70 mm/jam selama 10 jam turun menjadi tekanan air pori positif sebesar 66,06 kPa (6,606 m). Untuk di lereng bagian tengah dari *suction* 53,61 kPa turun menjadi tekanan positif 56,62 kPa dan pada lereng bagian atas turun menjadi 90,99 kPa yang awalnya *suction*-nya sebesar 84,81 kPa. Penurunan nilai *suction* disebabkan oleh meningkatnya tingkat kejemuhan pada permukaan lereng akibat infiltrasi air hujan dan rembesan air dari lereng bagian atas.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

- 1) Perubahan tekanan air pori negatif (*suction*) akibat infiltrasi air hujan sehingga berpengaruh terhadap tingkat kadar air dan kejemuhan pada lereng.
- 2) Perubahan besarnya nilai tekanan air pori negative ke tekanan air pori positif sangat dipengaruhi oleh intensitas hujan yang terjadi.
- 3) Nilai *suction* pada lereng cenderung lebih cepat penurunan nilainya pada lereng bagian bawah, karena perubahan tingkat kejemuhan akibat

infiltrasi air hujan juga karena adanya aliran air dari lereng bagian atas.

- 4) Mekanisme penurunan kestabilan lereng akibat hujan lebih disebabkan oleh hilangnya *suction* pada lereng. Penurunan kestabilan lereng akibat meningkatnya tekanan air pori (positif) akibat naiknya muka air tanah tidak terjadi karena muka air tanah letaknya dalam. Proses penjemuhan pada lereng dengan muka air yang dalam cenderung bergerak dari permukaan lereng menuju ke lapisan jenuh (muka air).

5.2 Saran

- 1) Untuk mengetahui perubahan nilai tekanan air pori pada suatu lereng dapat juga dilakukan dengan pengamatan di lapangan menggunakan alat piezometer.
- 2) Sebagai bahan perbandingan dapat dilakukan pengaruh permeabilitas dan letak muka air terhadap perubahan nilai tekanan air pori.

6. Daftar Pustaka

- Bear, J., 1979, *Hidraulics of ground water*, McGraw-Hill Int. Book Company, London.
- Domenico, P.A., 1972, *Concepts and Model In Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill Inc. Book Company, New York.

Fredlund, D.G., and Rahardjo, H., 1993, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John and Wiley Sons. Inc., New York.

Fredlund, D.G., 1987, Slope Stability Analysis Incorporating the effect of Soil Suction, *Slope Stability*, Eds. M.G. Anderson and S.K. Richards, pp 113-144, John Wiley and Sons Ltd., London

Gostelow, T.P., 1991, Rainfall and Landslide., *Prevention and Control of Landslide and Other Movement*, eds. Almeida-Taxeira M.E., et al., Commission of the European Communities, Report EUR 12918 EN.

Houston, S.L., Fredlund, D.G., 1997, *Unsaturated Soil Engineering Practice*, Geotechnical Special Publication No 68, New York.

Karnawati, D., 1997, *Prediction of Rain-Induced Landsliding by Using Slope Hydrodynamic Numerical Model*, Forum Teknik Jilid 20 No.1 Januari , UGM, Yogyakarta.

Kirby, M.J., 1978, *Hillslope Hydrology*, John Wiley and Sons Ltd , New York.

Lim,T.T., Rahardjo, H., Chang, M.F., Fredlund, D.G., 1996, Effect of Rainfall on Matric Suction in a Residual Soil Slope, Canadian Journal Geotechnical, pp. 618 – 628.

Oxford Geotechnica International, 1995, *A Simple and Efficient Two Dimensional Groundwater Flow and Transport Model*, Oxford.

Selby,M.J., 1993, *Hillslope Material and Processes*, Second Edition, Oxford University Pers, Oxford.

Van Genuchten, M.Th., 1980, A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Journal of Soil Science Social of America*, Vol 44 No.5, pp 892-898.