

Pemodelan Deformasi Lereng Akibat Rembesan Air Hujan

Modelling of The Slope Movement Due to Rainfall Seepage

Muhammad Azhar, Agus Setyo Muntohar

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Kestabilan lereng dipengaruhi banyak faktor salah satunya adalah infiltrasi hujan. Hujan yang terinfiltrasi ke dalam lereng akan menambah berat tanah, dan tekanan air pori, serta mengurangi kuat geser tanah. Apabila air tersebut menembus lapisan yang menjadi bidang gelincir akan menyebabkan lapisan tersebut licin dan mengalami pergerakan. Salah satu pergerakan lereng yang terjadi adalah di Saluran Induk Kalibawang km 15+900 yang menyebabkan kerusakan pada Saluran Induk Kalibawang dan bangunan di sekitar lereng. Lereng dimodelkan dengan analisis *coupled stress-pore water pressure* menggunakan perangkat lunak SIGMA/W. Data yang dimasukkan dalam pemodelan ini berupa data topografi, parameter geser dan parameter hidraulik tanah. Data hujan yang digunakan berasal dari satelit TRMM yang dimulai pada tanggal 1 Juli-30 Agustus 2017. Terjadi penurunan tekanan air pori pada lereng selama periode pemodelan. Tekanan air pori pada kedalaman 14 m pada tanggal 1 Juli (awal pemodelan) sebesar 51,2 kPa dan pada 30 Agustus (akhir pemodelan) sebesar 10,5 kPa. Berdasarkan hasil pemodelan, deformasi yang terjadi pada lereng terus bertambah seiring bertambahnya waktu dengan perubahan yang semakin kecil. Deformasi yang terjadi pada BH-7 pada akhir pemodelan (30 Agustus 2017) sebesar 1,9 mm.

Kata kunci: pergerakan, analisis *coupled*, infiltrasi, tekanan air pori, deformasi,

Abstract. Many factors affect the slope stability such as rainfall infiltration. The rainfall infiltration will increase the weight of soil, pore water pressure and reduce the shear strength. When the water flow through the slip surface, it will cause slope movement. This paper studies the slope movement in Kalibawang irrigation channel km. 15+900 which induces a failure of Kalibawang irrigation channel and other surrounding structures. The slope movement is modeled as coupled stress-pore water pressure analysis using SIGMA/W. Topography data, shear strength, and hydraulic parameter were applied as the input parameter. The rainfall data was collected from TRMM starting from 1 July to 30 August 2017. The pore water pressure on the slope was decreased. The pore water pressure in 14 m depth on 1 July (beginning of model) is 51.2 kPa and on 30 August (end of modeling) is 10.5 kPa. Based on the model, the deformation increased during modeling, but the deformation rate decreased over time. The deformation at the end of modeling (August, 30) is 1.9 mm at BH7.

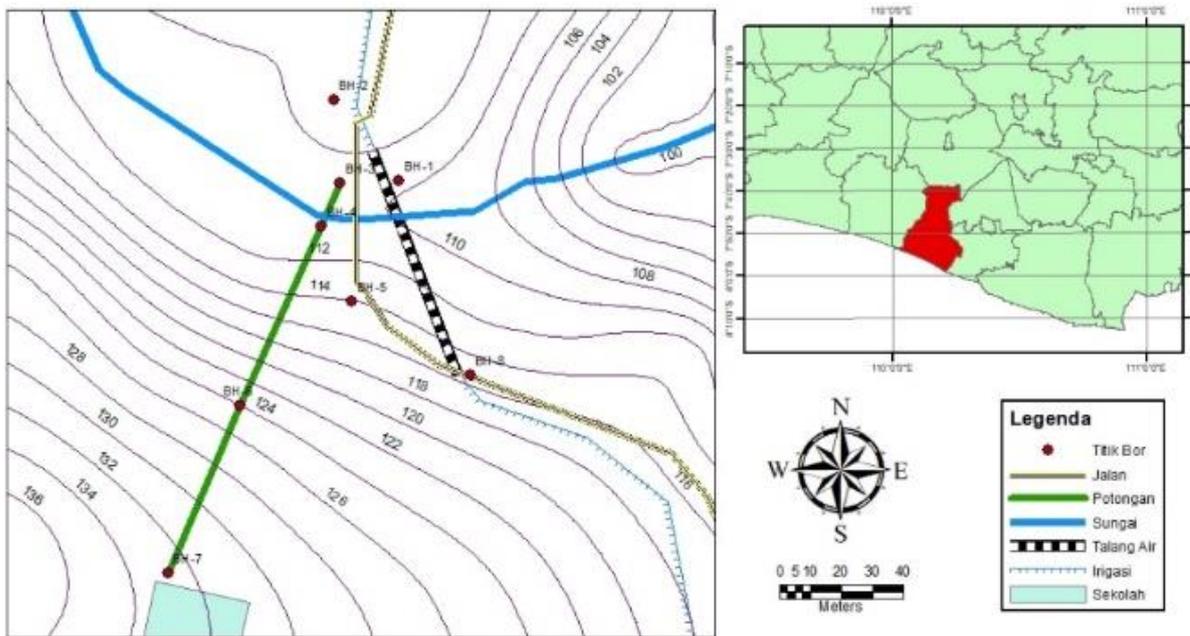
Keyword: movement, coupled analysis, infiltration, pore water pressure, deformation

1 Pendahuluan

Stabilitas lereng dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya adalah air hujan. Hujan yang terinfiltrasi ke dalam lereng akan menambah bobot tanah dan apabila air tersebut menembus lapisan yang menjadi bidang gelincir akan menyebabkan lapisan tersebut licin dan mengalami pergerakan. Salah satu lereng yang mengalami ketidakstabilan adalah lereng yang berada di Saluran Induk Kalibawang km 15+900, Kabupaten Kulonprogo (Gambar 1).

Kajian pendahuluan tentang faktor aman lereng di Saluran Induk Kalibawang telah dilakukan oleh Subiyanti dkk. (2015), (Haryanti dkk., 2010), Muntohar dan Saputro

(2014). Pemodelan tentang deformasi lereng yang diakibatkan oleh hujan juga telah dikaji oleh Haryanti dkk. (2010). Namun pada tahun 2017, lereng ini mengalami pergerakan sehingga menyebabkan bangunan di atas lereng berupa sekolah dan rumah warga mengalami kerusakan. Pergerakan lereng juga menyebabkan kerusakan pada Saluran Induk Kalibawang. Faktor aman adalah salah satu metode yang biasa digunakan untuk mengevaluasi stabilitas lereng. Sudah banyak penelitian yang mengkaji tentang perubahan nilai faktor aman akibat hujan diantaranya Rahardjo dkk. (2001), Gofar dkk. (2006), Lee dkk. (2009), Muntohar dkk. (2013) Gofar dan Lee (2008). Selain faktor aman, deformasi juga



Gambar 1. Lokasi penelitian dan letak titik bor/SPT.

dapat digunakan untuk menilai stabilitas lereng (Pramusandi dkk., 2015).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memodelkan pergerakan lereng akibat air hujan dengan menggunakan SIGMA/W dan mengkaji pengaruh infiltrasi air hujan terhadap deformasi dan perubahan tekanan air pori pada lereng. Pada penelitian ini, analisis yang digunakan adalah *coupled analysis*. Analisis ini menghitung persamaan rembesan dan deformasi secara berurutan. Berbeda dengan analisis *uncoupled*, rembesan dan deformasi dianalisis secara terpisah. Hasil dari analisis rembesan dan deformasi saling mempengaruhi satu sama lain sehingga menyebabkan perbedaan pada analisis *coupled* dan *uncoupled* (Qi dan Vanapalli, 2015). Walaupun kajian serupa telah dilakukan oleh Haryanti dkk. (2010), namun perlu dilakukan *coupled analysis* dari pada melakukan analisis secara terpisah dengan *uncoupled analysis*.

2 Karakteristik Lapisan Tanah

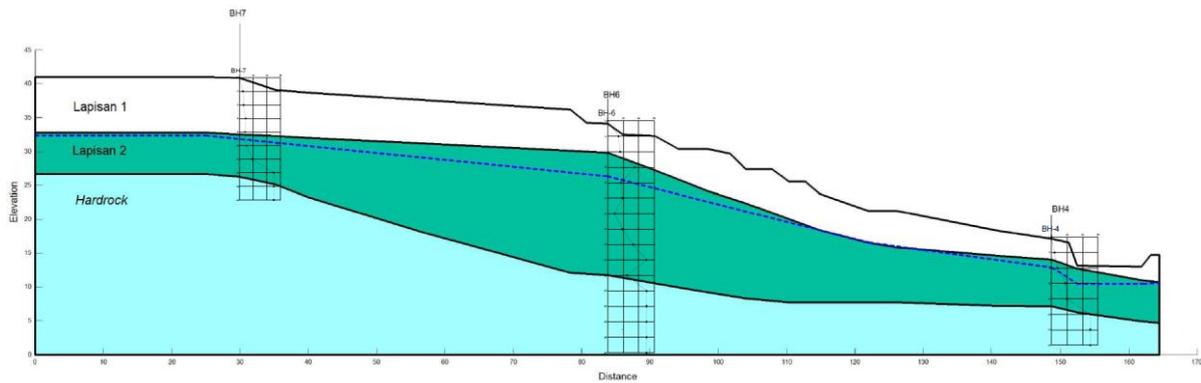
Profil lapisan tanah pada lereng berdasarkan interpretasi hasil pengeboran dan uji SPT seperti disajikan pada gambar 2. Secara umum, terdapat dua lapisan utama pada lereng. Pada lapisan 1 merupakan tanah lempung dan pada lapisan 2 merupakan tanah lanau berpasir.

Contoh tanah diambil untuk pengujian sifat-sifat geoteknik dan hidraulik tanahnya di laboratorium. Tabel 1 menyajikan sifat-sifat geoteknik lapisan tanah. Nilai kohesi dan sudut gesek internal tanah diperoleh dari uji triaksial kondisi terkondolidasi–tak terdrainase (ASTM, 2004). Koefisien permeabilitas tanah jenuh ditentukan dari uji permeabilitas sesuai dengan ASTM D5084-10 (ASTM, 2010). Sifat tanah tak-jenuh air ditentukan dari kurva karakteristik air-tanah (SWCC) melalui pengujian metode *filter paper*. Pengujian ini mengacu pada ASTM D5298-03 (ASTM, 2003) Hasil dari pengujian ini berupa kurva SWCC yang ditunjukkan pada Gambar 3.

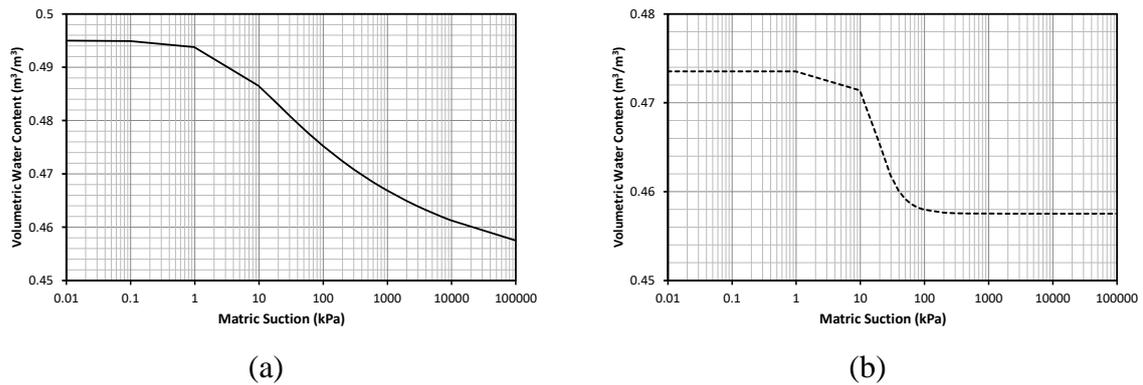
3 Metode Penelitian

Pengukuran Data Hujan

Rekaman hujan pada penelitian ini diperoleh melalui satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) yang dikembangkan oleh NASA dan JAXA. Data hujan dapat di unduh pada laman TRMM Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Pada penelitian ini data hujan diambil pada lokasi penelitian yaitu Saluran Induk Kalibawang km. 15+900 pada tanggal 1 Juli 2017 sampai dengan 30 Agustus 2017. Data



Gambar 2 Profil lapisan tanah pada lereng dan uji SPT



Gambar 3 Soil Water Characteristic Curve (SWCC) pada (a) lapisan 1, (b) lapisan 2.

Tabel 1 Hasil Pengujian Sifat-Sifat Geoteknik

Variabel	Lapisan 1	Lapisan 2
Berat jenis, G_s	2,50	2,80
Berat volume tanah, γ_t (kN/m^3)	16,9	17
Batas-batas konsistensi		
Batas cair, LL (%)	64,7	69,1
Batas plastis, PL (%)	37,0	43,5
Indeks plastisitas, PI (%)	27,7	25,6
Kohesi, c' (kPa)	13,6	22,4
Sudut gesek internal, ϕ' ($^\circ$)	28 $^\circ$	35 $^\circ$
Koefisien permeabilitas jenuh air, k_s (m/days)	$2,3 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-2}$

hujan selama bulan Juli ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk bulan Agustus tidak tercatat kejadian hujan.

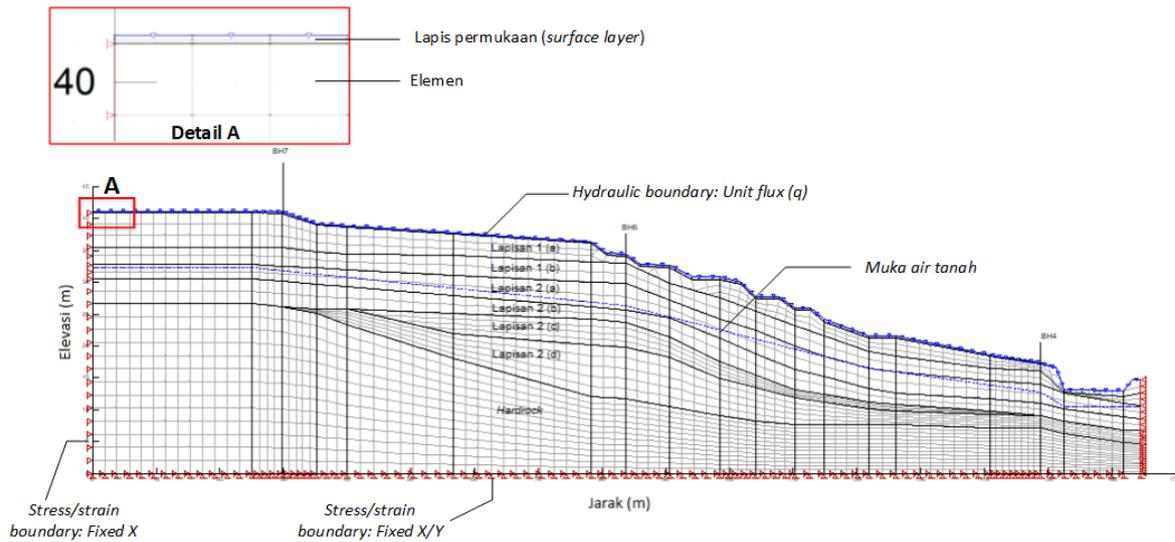
Pemodelan Numerik

Kondisi Awal dan Kondisi Batas Model Lereng Analisis deformasi lereng dan infiltrasi dilakukan dengan menggunakan SIGMA/W. Lereng dimodelkan dalam *two dimensional analysis* (lihat Gambar 4). Analisis dilakukan dalam dua tahap, yaitu : (1) pemberian kondisi awal (*initial condition*), (2) *coupled stress and pore water pressure (pwp)*. Kondisi awal dianalisis sebagai *in-situ stresses* yang menghitung tegangan awal dari berat tanah itu sendiri (*overburden stress*). Kondisi batas

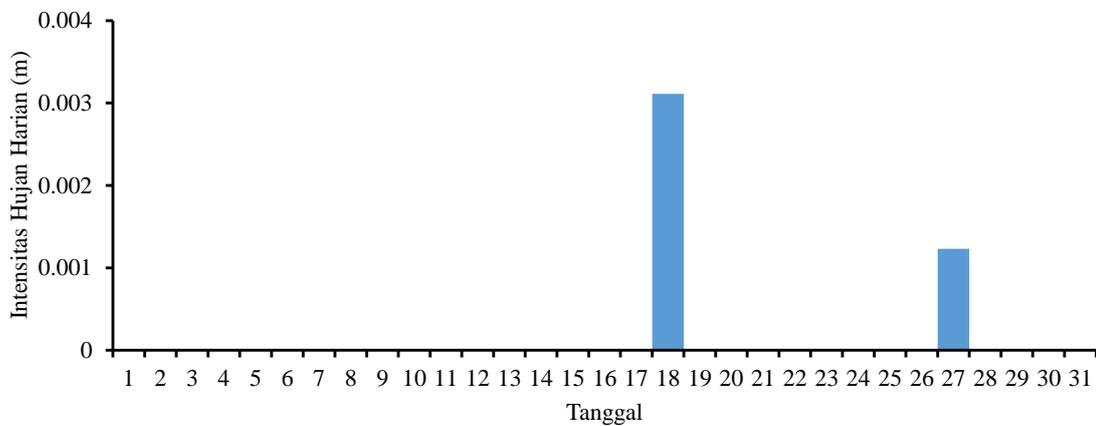
(*boundary condition*) lereng diberikan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Intensitas hujan (Gambar 5) diterapkan pada permukaan lereng sebagai *unit flux (q)* dalam analisis *coupled stress/pwp*. Lapis permukaan dibuat dengan tebal bervariasi antara 0,4 hingga 0,8 m.

Parameter Input dan Model Material

Parameter tanah yang dimasukkan dalam pemodelan seperti pada Tabel 1. Model dan kategori material yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 2. Material secara umum dimodelkan sebagai model *Elastic-Plastic* yang didasarkan pada teori keruntuhan Mohr-Coulomb dengan kondisi *effective stress*.



Gambar 4 Profil lereng dan kondisi batas yang diterapkan



Gambar 5 Intensitas hujan pada bulan Juli.

Pengaruh rembesan menyebabkan perubahan kadar air dan tekanan air pori dalam tanah. Kondisi ini dimodelkan sebagai *w/pwp change*.

Untuk analisis tegangan dalam SIGMA/W memerlukan parameter modulus elastisitas tanah (E). Nilai modulus elastisitas pada penelitian ini ditentukan berdasarkan nilai N-SPT rata-rata tiap lapisan tanah (persamaan 1) yang diusulkan oleh Wang dkk. (2015). Untuk nilai modulus elastisitas pada lapisan tanah keras (*hardrock*) menggunakan nilai modulus elastisitas yang didapat dari Jafri dan Yoo (2018) sebesar 23 GPa.

$$E_u / P_a = 19,3N^{0,6} \quad (1)$$

dengan,

E_u = modulus elastisitas (MPa)

P_a = tekanan atmosfer (10 kPa)

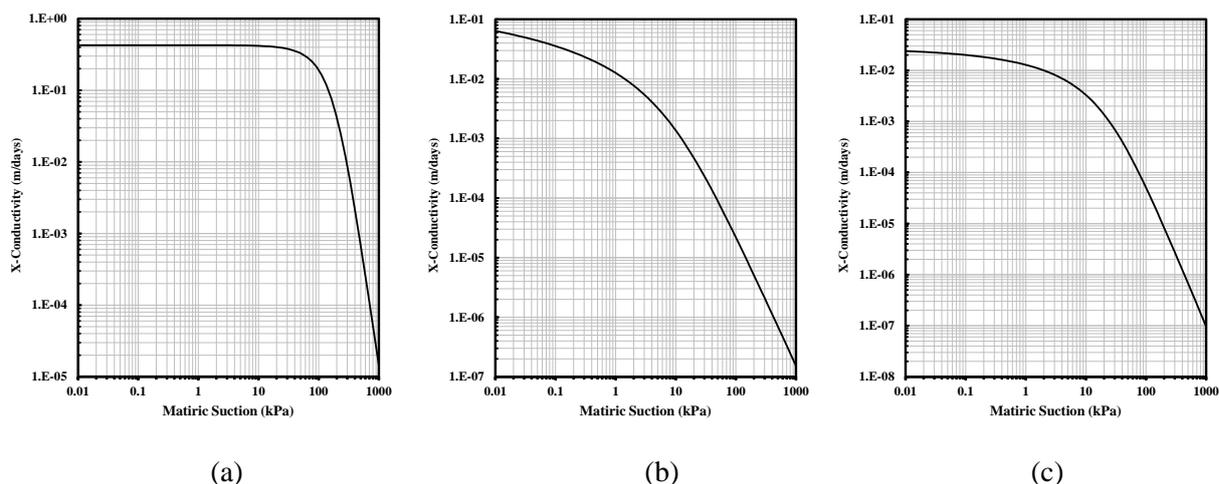
N = N-SPT

Nilai modulus elastisitas pada setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Modulus Elastisitas, model dan kategori material

Lapisan	E (MPa)	Model Material	Kategori Material
Permukaan	15	<i>Elastic-plastic (effective)</i>	<i>Effective-drained</i>
1(a)	5,3	<i>Elastic-plastic (w/pwp change)</i>	<i>Effective parameter (w/pwp change)</i>
1(b)	6,9		
2(a)	7,6		
2(b)	11,2		
2(c)	9,2		
2(d)	17,3		

Parameter hidraulik yang dimasukkan dalam pemodelan ini meliputi kurva karakteristik air-tanah (Gambar 3) dan kurva karakteristik permeabilitas-tekanan air pori (Gambar 6).



Gambar 6 Kurva karakteristik permeabilitas-tekanan air pori (a) lapisan permukaan, (b) lapisan 1a, 1b, (c) lapisan 2a, 2b, 2c, 2d.

4 Hasil dan Pembahasan Kajian Parametrik Deformasi Lereng

Kajian parametrik terhadap parameter E tiap lapisan tanah dilakukan untuk memperoleh nilai E yang sesuai dengan hasil pengukuran deformasi di lapangan. Pada penelitian ini, deformasi arah-X di titik BH-7 dari hasil simulasi, dibandingkan dengan hasil pengukuran inklinometer pada tanggal 18 Juli 2017. Gambar 6 menyajikan profil deformasi lereng antara hasil pemodelan dengan pengukuran di lapangan. Untuk mengevaluasi nilai kesalahan (*error*) hasil pemodelan terhadap pengukuran maka digunakan metode *root mean square error* (RMSE).

Nilai RMSE rata-rata pada pemodelan awal yang menggunakan data pada Tabel 2 diperoleh sebesar 26,8%. Profil deformasi lereng pada tahap awal ini ditunjukkan pada Gambar 7a. Setelah dilakukan penyesuaian parameter E (Tabel 3) secara *trial and error*, diperoleh nilai RMSE sebesar 3,3% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7b.

Deformasi Lereng Akibat Hujan

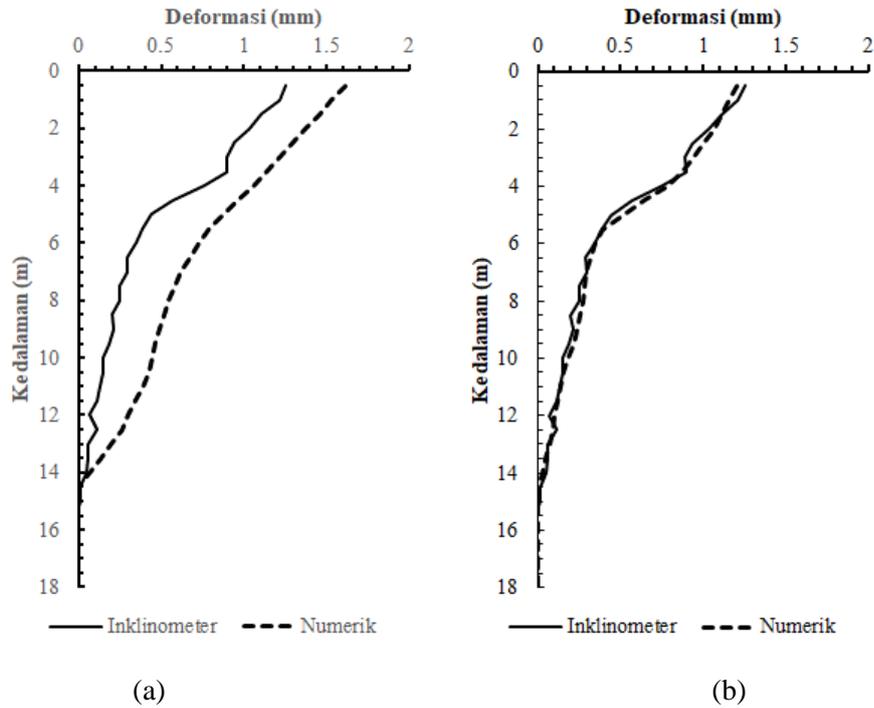
Gambar 8 menunjukkan profil deformasi hasil analisis numerik. Deformasi dimulai dari kedalaman 14,5 m dan bertambah besar ke permukaan lereng. Deformasi lereng terus bertambah seiring dengan waktu dengan perubahan yang semakin kecil (Gambar 9). Pada 6 Juli di kedalaman 0,5 m deformasi yang terjadi sebesar 0,4 mm dan berturut-turut bertambah menjadi 1,2 mm, 1,3 mm dan 1,6

mm pada 18, 24 dan 30 Juli. Pada bulan Agustus perubahan yang terjadi semakin kecil, pada 1 Agustus deformasi yang terjadi sebesar 1,6 mm dan menjadi 1,9 mm pada 30 Agustus (akhir pemodelan).

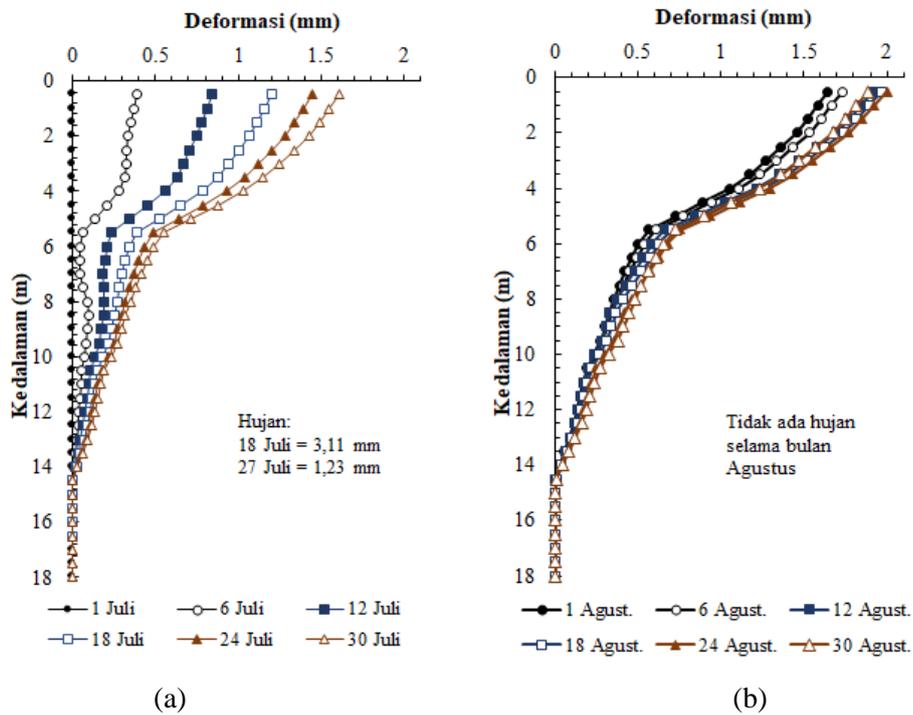
Kecilnya deformasi yang terjadi disebabkan karena terjadinya penurunan muka air tanah akibat tidak adanya air yang terinfiltrasi ke dalam lereng. Penurunan muka air tanah yang terjadi ditunjukkan pada gambar 10. Pada 1 Juli muka air berada di kedalaman 8,8 m dan turun menjadi 13,6 m pada 30 Juli. Pada 31 Agustus, muka air turun dari 13,7 m di 1 Agustus menjadi 12,9 m pada 30 Agustus. Menurut Xue dkk. (2016), perubahan deformasi sangat dipengaruhi oleh kedalaman muka air tanah dan distribusi tekanan air pori. Muka air tanah yang turun menyebabkan penurunan nilai tekanan air pori dan meningkatkan nilai *suction* tanah seperti yang dapat dilihat dalam gambar 10. Nilai tekanan air pori yang besar pada bulan Juli menyebabkan deformasi yang lebih besar jika dibandingkan dengan bulan Agustus. Tekanan air pori pada bulan Agustus

Tabel 3 Modulus elastisitas pada setelah validasi

Lapisan Tanah	Modulus Elastisitas, E (MPa)
Lapisan 1 (a)	1,8
Lapisan 1 (b)	4,0
Lapisan 2 (a)	50
Lapisan 2 (b)	280
Lapisan 2 (c)	9,2
Lapisan 2 (d)	17,3
<i>Hardrock</i>	23.000



Gambar 7 Deformasi pada tanggal 18 Juli (a) sebelum validasi, (b) sesudah validasi.



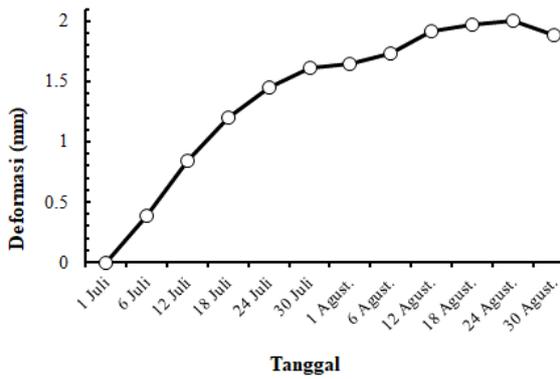
Gambar 8 Perubahan deformasi di (a) bulan Juli, (b) bulan Agustus.

mengalami perubahan yang kecil sehingga deformasi yang terjadi semakin kecil seiring dengan berjalannya waktu.

Perubahan Tekanan Air Pori

Tekanan air pori mengalami perubahan seiring berjalannya waktu. Gambar 10

menunjukkan perubahan tekanan air pori yang terjadi pada bulan Juli dan Agustus. Pada tanggal 1 Juli nilai tekanan air pori sebesar 51,2 kPa dan turun menjadi 23,4 kPa pada 6 Juli.. Penurunan ini masih berlangsung sampai dengan 12 Juli menjadi 10,3 kPa. Setelah 12 Juli nilai tekanan air pori tidak mengalami



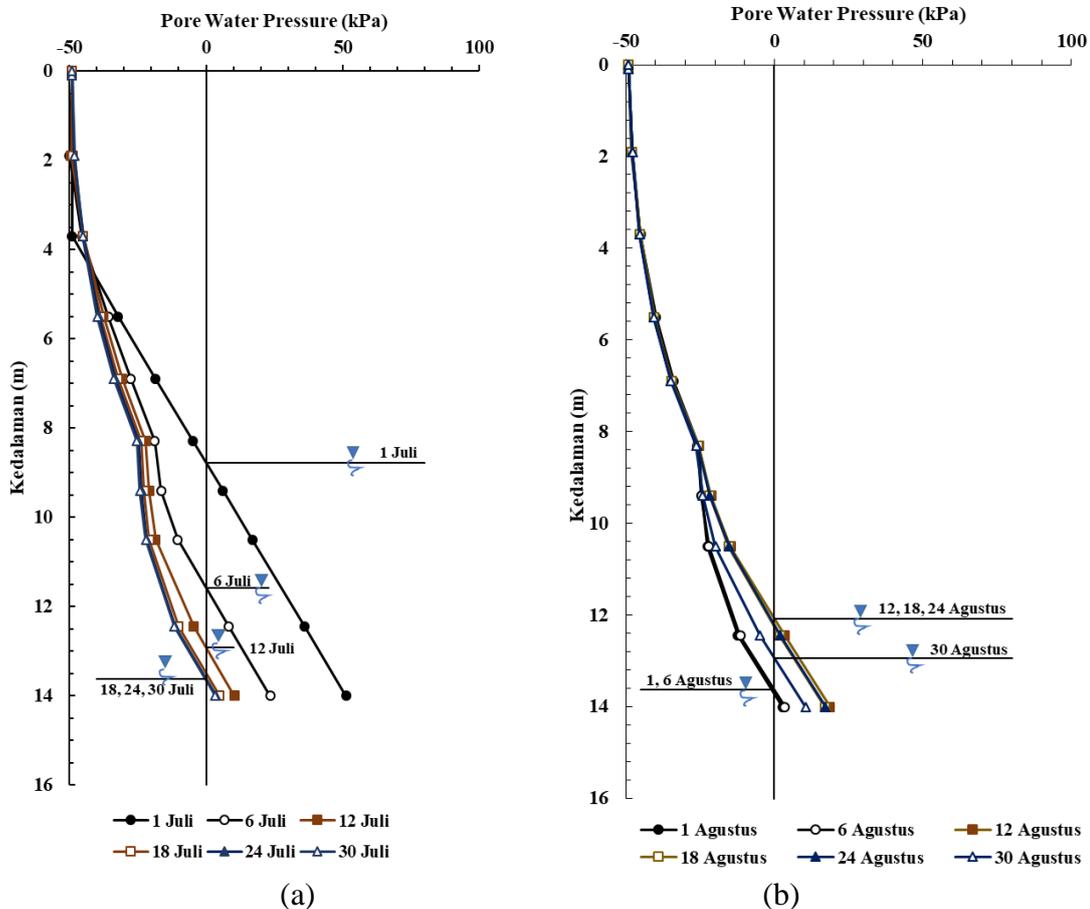
Gambar 9 Pergerakan lereng di kedalaman 0,5 m terhadap waktu

perubahan sebesar sebelumnya walaupun masih mengalami penurunan. Karena tidak ada kejadian hujan yang terjadi pada bulan Agustus, nilai tekanan air pori pada bulan Agustus tidak mengalami banyak perubahan. Nilai tekanan air pori pada bulan Agustus di kedalaman 14 m dari permukaan berkisar antara 2 sampai 11 kPa.

Hujan dengan durasi panjang memungkinkan lebih banyak air hujan yang

dapat terinfiltrasi dalam tanah (Gofar dan Lee, 2008). Air hujan yang terinfiltrasi kedalam tanah dapat menurunkan nilai *suction* dan meningkatkan tekanan air pori sehingga menyebabkan stabilitas lereng menurun (Gofar dan Lee, 2008; Muntohar dkk., 2013; Xue dkk., 2016). Dalam hal ini, hujan yang terjadi 18 dan 27 Juli tidak memberikan efek pada pengikatan nilai tekanan air pori pada lereng seperti yang ditampilkan pada gambar 10. Hal ini disebabkan karena intensitas dan durasi hujan yang kecil. Durasi hujan dan intensitas hujan yang kecil menyebabkan air tidak dapat terinfiltrasi dengan baik ke dalam tanah (Haryanti dkk., 2010).

Selain hujan, muka air tanah menjadi salah satu parameter penting terhadap perubahan nilai tekanan air pori. Menurut Schnellmann dkk. (2010) muka air tanah yang dangkal membuat nilai *suction* menjadi kecil dan meningkatkan tekanan air pori. Pada bulan Juli dan Agustus muka air tanah mengalami penurunan. Pada 1 Juli, muka air tanah berada di kedalaman 8,8 m dan turun menjadi 13,6 m



Gambar 10 Perubahan tekanan air pori di (a) bulan Juli, (b) bulan Agustus

pada 30 Juli. Pada 31 Agustus, muka air turun dari 13,7 m di 1 Agustus menjadi 12,9 m pada 30 Agustus. Penurunan muka air tanah ini menyebabkan penurunan tekanan air pori seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.

5 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil pemodelan, deformasi yang terjadi pada lereng terus bertambah seiring bertambahnya waktu dengan perubahan yang semakin kecil. Deformasi yang terjadi pada akhir pemodelan (30 Agustus 2017) sebesar 1,9 mm.
2. Terjadi penurunan tekanan air pori pada lereng. Tekanan air pori pada kedalaman 14 m pada tanggal 1 Juli (awal pemodelan) sebesar 51,2 kPa dan pada 30 Agustus (akhir pemodelan) sebesar 10,5 kPa.

6 Daftar Pustaka

- ASTM, 2003, *D5298-03:Standard test method for measurement of soil potential (suction) using paper filter*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, USA
- ASTM, 2004, *D4767-04:Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, USA
- ASTM, 2010, *D5084-10:Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible-Wall Permeameter*, ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia, USA
- Gofar, N., Lee, M.L., 2008, Extreme rainfall characteristics for surface slope stability in the Malaysian Peninsular, *Georisk*, 2(2), 65-78.
- Gofar, N., Lee, M.L., Kassim, A., 2006, Effect of surface boundary condition on rainfall infiltration, *Jurnal Teknologi*, 44(1), 63-70.
- Haryanti, S., Suryolelono, K.B., Jayadi, R., 2010, Analisis Pengaruh Karakteristik Hujan terhadap Gerakan Lereng, *Semesta Teknika*, 13(2), 105-115.
- Jafri, T., Yoo, H., 2018, REV Application in DEM Analysis of Non-Vibrational Rock Splitting Method to Propose Feasible Borehole Spacing, *Applied Sciences*, 8(3), 335.
- Lee, L.M., Gofar, N., Rahardjo, H., 2009, A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability, *Engineering Geology*, 108(3-4), 272-285.
- Muntohar, A.S., Ikhsan, J., Soebowo, E., 2013, Mechanism of rainfall triggering landslides in Kulonprogo, Indonesia, *Proceeding of the Geo-Congress 2013*, pp. 452-461, doi: 10.1061/9780784412787.047
- Muntohar, A.S., Saputro, R.I., 2014, Pengaruh Kedalaman Muka Air Awal Terhadap Analisis Stabilitas Lereng Tak Jenuh, *Paper presented at the Seminar Nasional Teknik Sipil X-2014*, ITS Surabaya, 5 Februari 2014,
- Pramusandi, S., Rifa'i, A., Suryolelono, K.B., 2015, Determination of unsaturated soil properties and slope deformation analysis due to the effect of varies rainfall, *Procedia Engineering*, 125, 376-382.
- Qi, S., Vanapalli, S.K., 2015, Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes, *Computers and Geotechnics*, 70, 68-82.
- Rahardjo, H., Li, X.W., Toll, D.G., Leong, E.C., 2001, The Effect of Antecedent Rainfall on Slope Stability, *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3-4), 371-399. doi: 10.1023/A:101312972
- Schnellmann, R., Busslinger, M., Schneider, H.R., Rahardjo, H., 2010, Effect of rising water table in an unsaturated slope, *Engineering Geology*, 114(1-2), 71-83.
- Subiyanti, H., Rifa'i, A., Jayadi, R., 2015, Analisis Kelongsoran Lereng Akibat Pengaruh Tekanan Air Pori di Saluran Induk Kalibawang Kulonprogo, *Semesta Teknika*, 14(1), 15-25.

- Wang, Y., Zhao, T., Cao, Z., 2015, Determination of soil property characteristic values from standard penetration tests, *Proceeding of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP 2015)*, July 12-15, 2015, doi: 10.14288/1.0076041
- Xue, K., Ajmera, B., Tiwari, B., Hu, Y., 2016, Effect of long duration rainstorm on stability of Red-clay slopes, *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 1-12.