

Analisis Numerik Stabilitas Lereng Terhadap Curah Hujan pada Tanah Tak Jenuh

Rabbani Isya Ramadhan*

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Email: rabbani.isya@ui.ac.id

Abdul Halim Hamdany

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Email: abdul.halim04@office.ui.ac.id

Glenn Adriel Adiguna

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Email: glenn.adiguna@unpar.ac.id

Alfrendo Satyanaga

Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering and Digital Sciences

Nazarbayev University, Astana 010000, Kazakhstan,

Email: alfrendo.satyanaga@nu.edu.kz

Abstrak

Perubahan iklim yang tak menentu membuat infiltrasi curah hujan dengan intensitas tinggi dapat terjadi di masa yang akan datang. Hal ini dapat menyebabkan keruntuhan pada lereng akibat infiltrasi curah hujan. Wilayah Indonesia memiliki wilayah yang sangat rentan terhadap keruntuhan lereng akibat curah hujan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik distribusi tekanan air pori dan stabilitas lereng selama hujan pada lereng asli melalui permodelan numerik. Kurva karakteristik air-tanah diukur menggunakan High-Suction Polymer Sensors (HSPS). Perubahan volume pada tanah didapatkan menggunakan 3D scanner. Pemodelan numerik dilakukan dengan bantuan GeoStudio. Analisis rembesan dilakukan menggunakan SEEP/W untuk memperoleh perubahan distribusi tekanan air pori akibat infiltrasi curah hujan. Stabilitas lereng dilakukan dengan menggunakan SLOPE/W untuk menentukan faktor keamanan lereng akibat infiltrasi air hujan. Hasil penelitian menunjukkan intensitas dan durasi curah hujan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas lereng. Semakin lama durasi curah hujan dan dengan intensitas yang tinggi dapat menyebabkan penurunan faktor keamanan yang semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena daya hisap pada tanah telah berkurang dan menyebabkan kekuatan geser pada tanah menjadi lebih rendah sehingga dapat menyebabkan kegagalan pada lereng.

Kata-kata Kunci: Tanah tak jenuh, kurva karakteristik air-tanah, infiltrasi curah hujan, stabilitas lereng

Abstract

Unpredictable climate change makes high intensity rainfall infiltration possible in the future. This can cause slope collapse due to rainfall infiltration. Indonesia has areas that are very susceptible to slope collapse due to rainfall. The purpose of this study was to determine the characteristics of the pore water pressure distribution and slope stability during rainfall on the original slope through numerical modeling. The groundwater characteristic curve was measured using High-Suction Polymer Sensors (HSPS). Volume changes in the soil were obtained using a 3D scanner. Numerical modeling was carried out with the help of GeoStudio. Seepage analysis was carried out using SEEP/W to obtain changes in the pore water pressure distribution due to rainfall infiltration. Slope stability was carried out using SLOPE/W to determine the slope safety factor due to rainwater infiltration. The results showed that the intensity and duration of rainfall had a significant effect on slope stability. The longer the duration of rainfall and with high intensity can cause a greater decrease in the safety factor. This is because the suction power of the soil has decreased and causes the shear strength of the soil to be lower so that it can cause slope failure.

Keywords: Unsaturated soil, SWCC, rainfall infiltration, slope stability

* Penulis Korespondensi: rabbani.isya@ui.ac.id

1. Pendahuluan

Peningkatan suhu global merupakan faktor utama dalam perubahan iklim yang signifikan yang telah terjadi dalam beberapa dekade terakhir. Hari hujan yang lebih panjang dengan intensitas yang lebih tinggi umumnya terjadi di beberapa negara (Rahardjo dkk., 2019). Salah satu penyebab utama dalam perubahan iklim global adalah perilaku manusia itu sendiri, meskipun dalam hal ini masih terdapat perdebatan tentang hal ini. Sebuah studi tentang perubahan iklim oleh (Kim dkk., 2012; Rahardjo dkk., 2014; Strauch dkk., 2015) mengindikasikan bahwa perubahan iklim mengakibatkan intensitas curah hujan yang lebih tinggi dengan frekuensi hari hujan yang lebih sedikit.

Kebanyakan lereng curam bersifat stabil di alam. Namun, kondisi iklim memengaruhi stabilitas lereng tersebut (Rahardjo dkk., 2016). Pemanasan global secara bertahap mengubah kondisi iklim. Dari sudut pandang keberlanjutan, sangat penting untuk memahami bagaimana stabilitas lereng tanah Loess berubah-ubah dalam berbagai kondisi (Hamdany dkk., 2023). Infiltrasi air hujan dianggap sebagai faktor utama yang menyebabkan kegagalan lereng akibat curah hujan (Rahardjo dkk., 2016). Namun, menurut Crosta (1998) dan Basile dkk. (2003) kondisi iklim, fitur geologi, topografi, vegetasi, dan kombinasi dari faktor-faktor ini dapat menyebabkan kegagalan lereng dalam kondisi curah hujan.

Banyak faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng, di antaranya infiltrasi curah hujan yang diidentifikasi sebagai faktor yang sangat penting. Selama proses infiltrasi, tanah mengalami peralihan dari keadaan tak jenuh ke keadaan jenuh. Hal ini menyebabkan penurunan progresif dalam hisapan matrik dan selanjutnya menurunkan kekuatan gesernya, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap keruntuhan lereng (Hou dkk., 2024). Pendekatan numerik (Cho, 2016; Tang dkk., 2018; Yang dkk., 2018), termasuk metode finite element dan metode finite difference, dapat menyelesaikan masalah yang kompleks. Namun, komputasi persamaan rembesan menggunakan metode-metode ini diketahui cukup memakan waktu (Xu dkk., 2021).

Metode kesetimbangan batas adalah metode yang paling banyak digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dan mendesain lereng yang direkayasa. Kesederhanaan dan keserbagunaan metodologi kesetimbangan batas terletak pada konsep bahwa geometri permukaan kegagalan potensial pada suatu lereng telah diketahui dan lereng tersebut dapat didiskritkan menjadi irisan vertikal yang terbatas (Oh & Lu, 2015). Setiap irisan kemudian dianalisis dengan menggunakan prinsip-prinsip kesetimbangan gaya dan/atau momen untuk mengetahui kontribusinya terhadap kestabilan lereng (Duncan dkk., 2014; Petterson, 1955). Berbagai teknik kesetimbangan batas telah dikembangkan untuk menentukan kondisi kestabilan, tergantung dari persamaan kesetimbangan yang disertakan dan asumsi apa yang dibuat untuk memperhitungkan gaya antar potongan (Bishop, 1959; Duncan, 1996; Spencer, 1967). Dalam beberapa tahun terakhir, untuk menghitung secara akurat gaya antar

irisan dan kondisi rembesan, metode kuantitatif yang canggih seperti analitis, elemen hingga dan beda hingga telah dikembangkan dan digabungkan dengan algoritma kesetimbangan batas (Dawson dkk., 1999; Ugai & Leshchinsky, 1995).

Wilayah Indonesia pada umumnya beriklim tropis, hal ini disebabkan karena faktor garis khatulistiwa yang melewati wilayah Indonesia. Dibandingkan dengan tempat lain di Bumi, wilayah Indonesia memiliki tekanan udara yang rendah dan frekuensi hujan yang tinggi (Rahayu dkk., 2024). Berdasarkan hal tersebut, pada umumnya kondisi lereng asli di Indonesia dapat dipengaruhi oleh intensitas curah hujan yang berbeda-beda. Pada jurnal ini akan dilakukan analisa numerik menggunakan bantuan software GeoStudio untuk memodelkan lereng dengan infiltrasi curah hujan serta dengan menggunakan parameter tanah tak jenuh pada kondisi lereng tersebut. Parameter tanah tak jenuh didapatkan dari pengujian laboratorium tanah tak jenuh menggunakan *high-suction polymer sensor* (HSPS). Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik distribusi tekanan air pori dan stabilitas lereng selama hujan pada lereng asli melalui permodelan numerik.

2. Metode Penelitian

2.1 Parameter tanah

Dalam penelitian ini, sampel tanah diambil dari lokasi konstruksi, yang terletak di Depok, Jawa Barat, Indonesia. Di lokasi tersebut terdapat dua lubang bor beserta Uji Penetrasi Standar (SPT). Muka air tanah terletak pada kedalaman 6-10 m di bawah permukaan tanah berdasarkan data borlog. Pengujian index properties menggunakan standar American *Soil Testing Machine* (ASTM), dan klasifikasi tanah menggunakan Unified Soil Classification System (USCS) seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 1**. Karena persentase lanau lebih besar daripada persentase kerikil dan butiran halus, tanah dapat diklasifikasikan sebagai tanah berlanau.

Untuk mengevaluasi bagaimana infiltrasi air hujan mempengaruhi zona tak jenuh, sangat penting untuk memastikan sifat-sifat tak jenuh seperti *Soil Water Characteristic Curves* (SWCC), *shrinkage curve*, dan fungsi permeabilitas. SWCC merupakan kurva yang menggambarkan jumlah air yang dapat ditahan oleh

Tabel 1. Index properties

Laboratory Test	Sample 1	Sample 2
Natural water content, %	24.23	65.64
Specific Gravity, G _s	2.668	2.671
Liquid Limit, L _L	62.24	61.01
Plastic Limit, P _L	32.14	44.47
Index Plasticity (IP)	30.10	16.54
Grain Size Distribution:		
Gravel, %	0.00	0.00
Sand, %	4.00	1.50
Silt, %	53.00	78.00
Clay, %	43.00	20.50
Shrinkage Limit	32.200	38.841
Shrinkage Ratio	1.404	1.265



Gambar 1. Pengukuran suction menggunakan HSPS

pori-pori tanah pada nilai matric suction tertentu (D. G. Fredlund & Rahardjo, 1993) (W. W. Ng & Menzies, 2007). Jumlah air di dalam tanah dapat ditentukan berdasarkan kadar air gravimetrik (SWCC-w), kadar air volumetrik (SWCC- θ), dan derajat kejenuhan (SWCC-S).

Pengukuran kurva karakteristik air-tanah (SWCC) dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan menggunakan *high-suction polymer sensors* (HSPS). Pada penelitian ini, pengukuran SWCC untuk sampel tanah di Depok menggunakan *high-suction polymer sensors* (HSPS). HSPS dapat bekerja ketika polimer telah dimasukkan ke dalam chamber. Sebaliknya, jika chamber tidak diisi dengan polimer, HSPS hanya akan

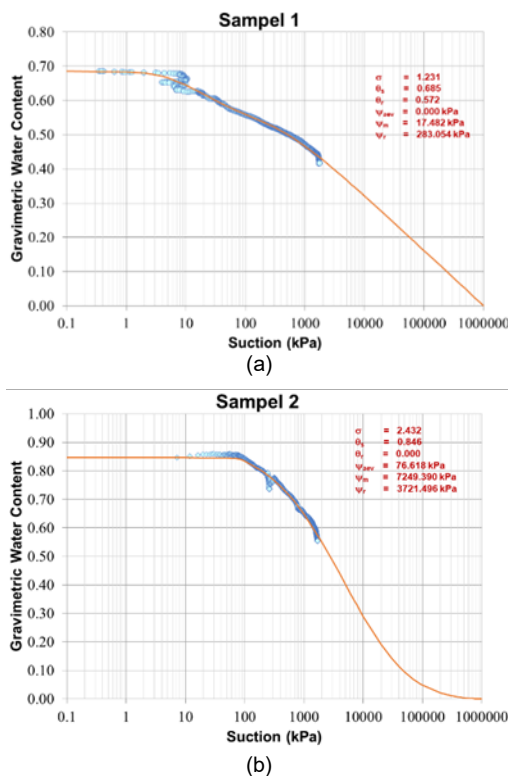
mengikuti tekanan air dan tidak akan menyedot air di dalam tanah. Karena gradien hidraulik yang berbeda, air dapat masuk ke dalam chamber, tetapi partikel polimer tidak dapat meninggalkan kompartemen. Piringan keramik dan tutupnya kemudian disegel dengan gel silikon untuk mencegah kebocoran (Aventian dkk., 2024). Pemantauan suction menggunakan HSPS dapat ditunjukkan pada Gambar 1.

Hasil dari pengukuran suction menggunakan HSPS tersebut kemudian didapatkan best fitting menggunakan Persamaan (1) dari Satyanaga dkk. (2017).

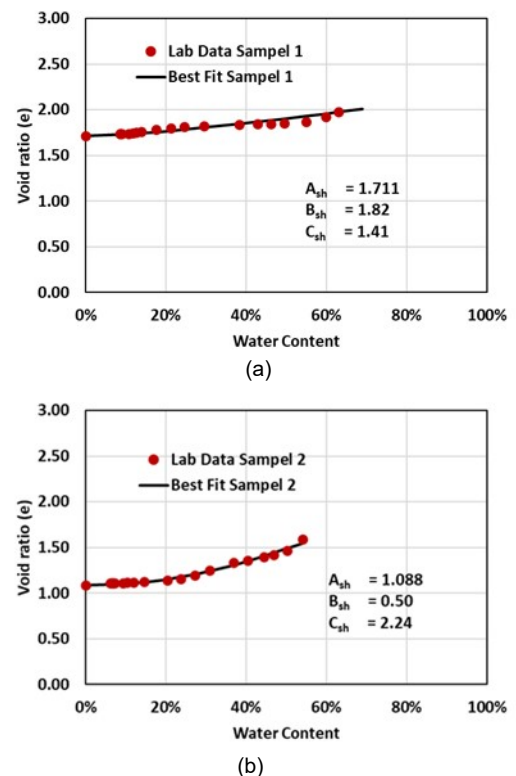
$$\theta_w = \left(1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right) \times \left[\theta_s + \left(\theta_s - \theta_r \right) \left(-\beta \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln\left(\frac{\psi_a - \psi}{\psi_a - \psi_m}\right)}{s} \right) \right) \right] \quad (1)$$

dimana: $\beta = 0$ ketika $\psi \leq \psi_a$; $\beta = 1$ ketika $\psi \geq \psi_a$, θ_w = Perhitungan kadar air volumetrik, θ_s = Kadar air volumetrik jenuh, ψ = Hisapan matrik yang sedang dipertimbangkan (kPa), ψ_a = Parameter yang mewakili nilai masuknya udara ke dalam tanah (kPa), ψ_m = Parameter yang mewakili hisapan matrik pada titik infeksi SWCC (kPa), ψ_r = Hisapan yang sesuai dengan kadar air sisa, $\theta_{r,s}$ = Parameter yang mewakili deviasi standar geometri SWCC, dan θ_r = Parameter yang mewakili kadar air volumetrik sisa.

Dari hasil pengukuran dengan HSPS, dapat diperoleh hubungan antara hisapan tanah dan kadar air gravimetrik (SWCC-w) dan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kadar air gravimetrik (SWCC-w) dari HSPS (a) sampel 1, (b) sampel 2



Gambar 3. Shrinkage curve. (a) sampel 1, (b) sampel 2

Perubahan volume pada sampel tanah umumnya tidak diukur saat melakukan pengujian SWCC. Tanah berbutir halus pada umumnya dapat menyusut seiring dengan meningkatnya daya hisap tanah. Perubahan volume dapat dijelaskan dengan hubungan antara tekanan air pori dan kadar air gravimetrik, yang disebut dengan *shrinkage curve*. Saat ini, perubahan volume dapat diukur secara akurat dengan menggunakan 3D scanner. Volume diukur hingga tidak ada perubahan volume yang signifikan. *Shrinkage curve* kemudian diestimasi dengan menggunakan persamaan Fredlund dkk. (2002) yang menghasilkan parameter-parameter curve-fitting berupa rasio rongga minimum (*ash*), kemiringan garis singgung (*bsh*), dan kelengkungan *shrinkage curve* (*csh*) yang dapat dilihat pada **Gambar 3**.

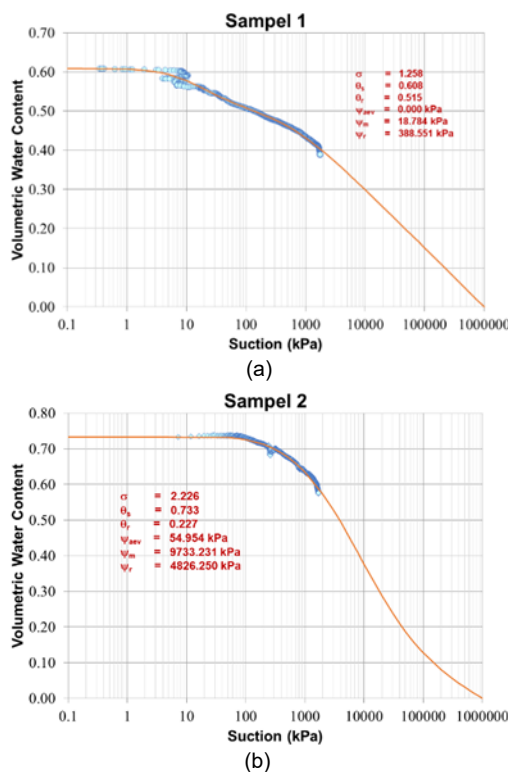
Parameter-parameter curve-fitting dari *shrinkage curve* tersebut digunakan sebagai input untuk menyelesaikan masalah rembesan. Kadar air volumetrik dan hisapan tanah didapatkan berhubungan dengan mengestimasi hasil uji *high-suction polymer sensor* (HSPS) yang diturunkan dari persamaan unimodal yang dibuat oleh Satyanaga dkk. (2017) dan dapat dilihat pada **Gambar 4**.

2.2 Pemodelan numerik

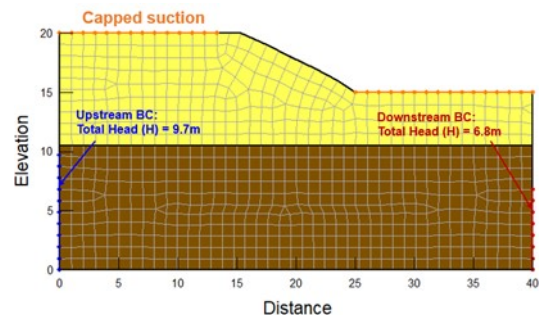
Pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GeoStudio, khususnya SEEP/W dan SLOPE/W. SEEP/W digunakan sebagai analisis rembesan untuk mengetahui pergerakan distribusi tekanan air pori akibat infiltrasi curah hujan. Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menggunakan SLOPE/W dengan mengintegrasikan hasil distribusi

tekanan air pori dari SEEP/W untuk mengetahui faktor keamanan lereng akibat infiltrasi curah hujan. Perangkat lunak GeoStudio telah digunakan oleh banyak peneliti (Abishev dkk., 2024; Adiguna dkk., 2023; Rahardjo dkk., 2019; Rahayu dkk., 2024; Satyanaga dkk., 2023; Sharipov dkk., 2023). Dalam penelitian Adiguna dkk. (2023), SEEP/W dan SLOPE/W digunakan untuk melakukan analisis balik guna menangkap mekanisme keruntuhan lereng akibat hujan di Cimanggung, Indonesia berdasarkan estimasi parameter tanah tak jenuh. SEEP/W digunakan untuk memodelkan infiltrasi curah hujan dan SLOPE/W digunakan untuk menyelidiki durasi hujan kritis yang menyebabkan keruntuhan lereng. Abishev dkk. (2024) melakukan analisis rembesan menggunakan SEEP/W untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada sudut lereng dan tinggi lereng yang berbeda. Distribusi tekanan air pori dari SEEP/W dimasukkan ke dalam analisis SLOPE/W untuk mengamati perubahan faktor keamanan lereng terhadap waktu.

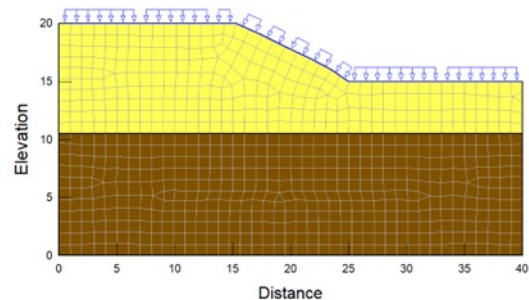
Geometri lereng diperoleh dari lokasi di Depok dengan ketinggian 5 m dan sudut lereng 34 derajat. Model material yang digunakan dalam SEEP/w adalah model jenuh/tidak jenuh. Fungsi SWCC dan permeabilitas yang telah diperoleh sebelumnya digunakan sebagai parameter input untuk analisis rembesan. Analisis rembesan kondisi steady-state dilakukan untuk mendapatkan kondisi awal sebelum hujan. Kondisi batas total head diterapkan di sisi kiri dan kanan model yang didasarkan pada elevasi muka air tanah dari data lubang bor. Untuk membatasi nilai hisapan di permukaan tanah, kondisi batas tekanan air diterapkan di sepanjang permukaan lereng. Analisis rembesan kondisi steady-state dapat dilihat pada **Gambar 5**. Analisis rembesan transient dilakukan untuk



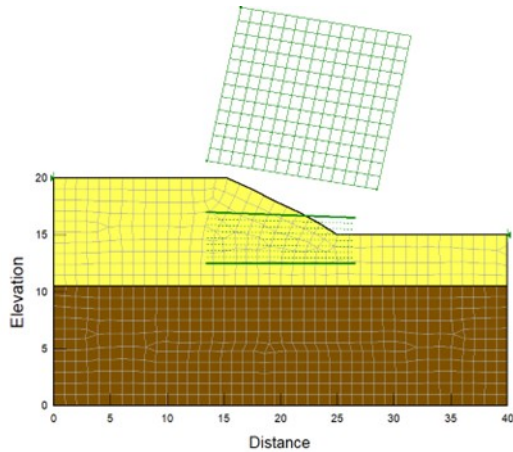
Gambar 4. Kadar air volumetrik (SWCC-q) (a) sampel 1, (b) sampel 2



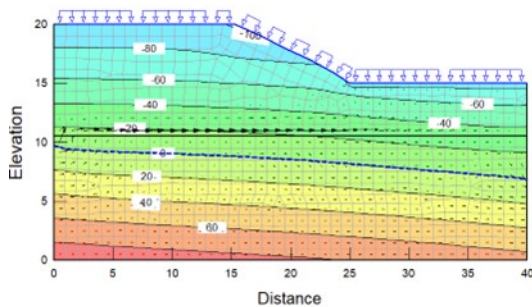
Gambar 5. Permodelan numerik untuk analisis rembesan kondisi steady-state



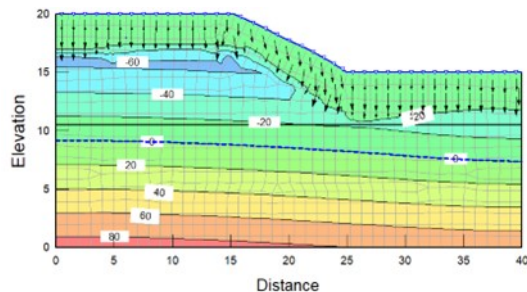
Gambar 6. Permodelan numerik untuk analisis rembesan kondisi transient



Gambar 7. Permodelan numerik untuk analisis stabilitas lereng



Gambar 8. Kontur tekanan air pori kondisi steady-state



Gambar 9. Kontur tekanan air pori setelah 3 hari

memodelkan infiltrasi curah hujan dengan menerapkan kondisi batas fluks air di sepanjang permukaan lereng. Tinjauan rembesan potensial juga diterapkan di sepanjang permukaan lereng. Analisis transient dilakukan selama lima hari. Periode basah dengan curah hujan harian maksimum 150 mm diterapkan selama dua hari dan periode kering diterapkan selama tiga hari berikutnya. Kondisi batas untuk analisis rembesan transient dapat dilihat pada Gambar 6.

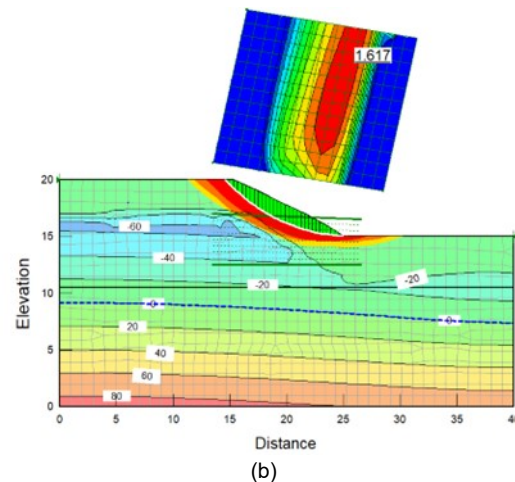
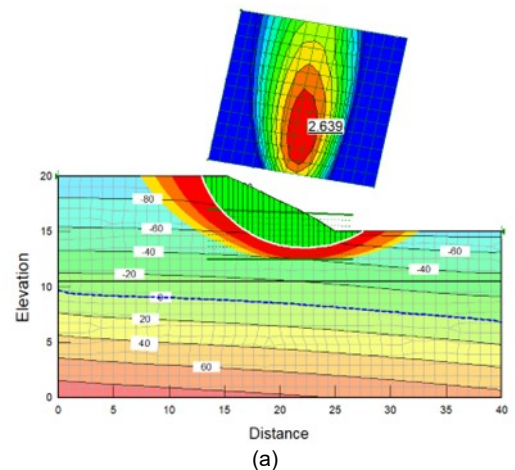
Metode analisis yang digunakan dalam SLOPE/W adalah stabilitas lereng kesetimbangan batas dengan metode Morgenstern-Price (D. G. Fredlund dkk., 1978). Model material yang digunakan dalam SLOPE/W untuk parameter kekuatan geser adalah Mohr-Coulomb (Rahayu dkk., 2024). Kekuatan geser tak jenuh dihasilkan berdasarkan input SWCC. Permukaan longsor diiterasi menggunakan metode Grid dan Radius

(Satyanaga dkk., 2023). Gambar 7 menunjukkan model analisis stabilitas lereng.

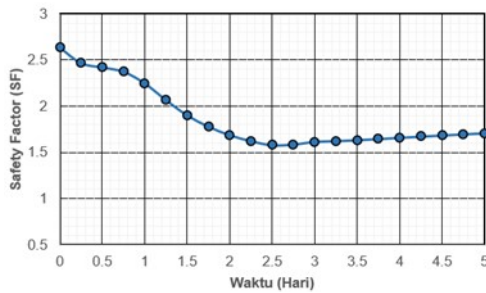
Pada Gambar 7 tersebut permodelan numerik untuk stabilitas lereng dapat menentukan faktor keamanan dari lereng tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar perubahan faktor keamanan terhadap perubahan curah hujan. Sehingga dapat mengetahui kondisi lereng sebelum dan sesudah curah hujan.

3. Hasil dan Pembahasan

Profil dan kontur tekanan air pori diperoleh dari hasil analisis rembesan menggunakan SEEP/W. Gambar 8 menampilkan kontur tekanan air pori kondisi awal sebelum adanya infiltrasi curah hujan. Sedangkan Gambar 9 menunjukkan perubahan tekanan air pori dengan infiltrasi curah hujan pada fluks 150 mm/hari yang akan menyebabkan penurunan faktor keamanan. Mekanisme pemicunya diindikasikan karena penurunan daya hisap tanah sehingga kekuatan geser tanah menjadi berkurang. Pada kondisi awal daya hisap tanah pada lereng tersebut mencapai 100 kPa. Setelah adanya infiltrasi curah hujan selama dua hari curah hujan maksimum menyebabkan daya hisap tanah menjadi berkurang. Hal ini menandakan bahwa tekanan air pori meningkat seiring dengan peningkatan intensitas dan



Gambar 10. Permukaan longsor kritis. (a) $t=0$ hari (sebelum hujan), (b) $t=3$ hari (akhir hujan)



Gambar 11. Perubahan faktor keamanan terhadap waktu

durasi curah hujan. Semakin tinggi intensitas dan durasi curah hujan, maka mengakibatkan semakin besar volume air yang meresap ke dalam tanah sehingga meningkatkan tekanan air pori dan rembesan.

Hasil analisis SEEP/W selanjutnya diaplikasikan dalam analisis stabilitas SLOPE/W sebagai kondisi tekanan air pori. Berdasarkan hasil SLOPE/W, perubahan faktor keamanan terhadap waktu dapat dihasilkan. Selain itu, berdasarkan grid dan radius, dihasilkan beberapa permukaan longsor, termasuk permukaan longsor yang kritis. **Gambar 10** menunjukkan permukaan longsor kritis untuk hari ke-0 dan hari ke-3 setelah curah hujan berhenti. Pada kondisi awal memiliki faktor keamanan sebesar 2.639 kemudian setelah adanya infiltrasi curah hujan faktor keamanan menjadi 1.617. Selama periode basah, faktor keamanan akan menurun secara bertahap hingga akhir durasi hujan dan kemudian meningkat secara perlahan hingga menjadi stabil. Setelah curah hujan berakhir, faktor keamanan naik menjadi 1.710 karena adanya proses evaporasi.

Gambar 11 menunjukkan perubahan faktor keamanan terhadap waktu. Faktor keamanan naik sedikit demi sedikit setelah curah hujan berakhir. Hal ini disebabkan karena proses evaporasi telah dimulai. Proses evaporasi pada tanah dapat mengurangi volume air dan tekanan air pori dalam tanah sehingga meningkatkan daya hisap tanah secara bertahap. Proses evaporasi ini sangat tergantung pada kondisi iklim yang terjadi. Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa intensitas dan durasi curah hujan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas lereng. Semakin lama durasi curah hujan dan dengan intensitas yang tinggi dapat menyebabkan penurunan faktor keamanan yang semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena daya hisap pada tanah telah berkurang dan menyebabkan kekuatan geser pada tanah menjadi lebih rendah sehingga dapat menyebabkan kegagalan pada lereng.

4. Kesimpulan

1. Infiltrasi curah hujan adalah salah satu faktor penting dalam stabilitas lereng. Penurunan hisapan matrik dapat menurunkan kekuatan geser pada lereng, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap keruntuhan lereng.
2. Untuk menilai dengan tepat pengaruh infiltrasi curah hujan terhadap faktor keamanan, sifat

hidrolik tak jenuh diperoleh dengan menggunakan peralatan yang akurat seperti *high-suction polymer sensor* (HSPS) untuk pengukuran suction dan 3D scanner untuk pengukuran volume.

3. Analisis numerik dilakukan dengan bantuan software GeoStudio. SEEP/W digunakan untuk analisis rembesan sehingga mendapatkan distribusi tekanan air pori pada lereng. SLOPE/W digunakan untuk analisis stabilitas lereng dengan kondisi infiltrasi curah hujan.
4. Pada kondisi awal memiliki faktor keamanan awal sebesar 2.639 kemudian setelah curah hujan maksimum selama 2 hari didapatkan faktor keamanan sebesar 1.617. Setelah adanya proses evaporasi, faktor keamanan naik menjadi sebesar 1.710.
5. Infiltrasi curah hujan ke dalam tanah akan menurunkan daya hisap tanah secara lebih besar. Karena daya serap tanah berkurang, mengurangi kekuatan geser tanah, faktor keamanan juga akan turun akibat tanah yang melemah. Namun, setelah hujan berhenti, faktor keamanan akan kembali secara bertahap karena proses pengeringan akan dimulai.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Penelitian dan Pengembangan, Universitas Indonesia melalui Hibah PUTI 2024 (Nomor Hibah NKB-457/UN2.RST/HKP.05.00/2024).

Daftar Pustaka

- Abishev, R., Satyanaga, A., Pernebekova, G., Rahardjo, H., Zhai, Q., Shon, C. S., Moon, S. W., & Kim, J. (2024). *Stability of soil slope in Almaty covered with steel slag under the effect of rainfall*. Scientific Reports, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58364-5>
- Adiguna, G. A., Wijaya, M., Rahardjo, P. P., Sugianto, A., Satyanaga, A., & Hamdany, A. H. (2023). *Practical Approach for Assessing Wetting-Induced Slope Failure*. Applied Sciences (Switzerland), 13(3). <https://doi.org/10.3390/app13031811>
- Aventian, G. D., Satyanaga, A., Zhakiyeva, A., Hamdany, A. H., Wijaya, M., Irawan, S., & Kim, J. (2024). *High-suction polymer sensor for measurement of soil suction under freezing and thawing conditions*. Cold Regions Science and Technology, 218, 104080. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104080>
- Basile, A., Mele, G., & Terribile, F. (2003). *Soil hydraulic behaviour of a selected benchmark soil involved in the landslide of Sarno 1998*. Geoderma, 117(3–4), 331–346. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00132-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00132-0)
- Bishop, A. W. (1959). *The Principle of Effective Stress*. Teknisk Ukeblad, 39, 859–863.

- Cho, S. E. (2016). *Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration*. Engineering Geology, 211, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.008>
- Crosta, G. (1998). *Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation*. Dalam Environmental Geology (Vol. 35, Nomor 3). Springer-Verlag.
- Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999). *Slope stability analysis by strength reduction*. Geotechnique, 49(6), 835–840. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835>
- Duncan, J. M. (1996). *State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes*. Journal of Geotechnical Engineering, 122(7), 577–596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability (Second)*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). *The shear strength of unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal, 15(3), 313–321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., & Fredlund, D. G. (2002). *Representation and estimation of the shrinkage curve*. 3rd International Conference on Unsaturated Soils, 145–149.
- Hamdany, A. H., Wijaya, M., Satyanaga, A., Rahardjo, H., Qian, Z., Lim, A., & Kim, J. (2023). *Numerical Simulation on the Effect of Infiltration and Evapotranspiration on the Residual Slope*. Sustainability (Switzerland), 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118653>
- Hou, C. Q., Xu, Q., Li, Y. X., & Sun, Z. B. (2024). *Reliability analysis of geosynthetic-reinforced slopes under rainfall infiltration*. Geotextiles and Geomembranes, 52(1), 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.09.010>
- Kim, J., Jeong, S., & Regueiro, R. A. (2012). *Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern*. Engineering Geology, 147–148, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.005>
- Oh, S., & Lu, N. (2015). *Slope stability analysis under unsaturated conditions: Case studies of rainfall-induced failure of cut slopes*. Engineering Geology, 184, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.007>
- Petterson, K. E. (1955). *The Early History of Circular Sliding Surfaces*. Géotechnique, 5, 275–296. [doi:10.1680/geot.1955.5.4.275](https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.4.275)
- Rahardjo, H., Kim, Y., & Satyanaga, A. (2019). *Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering*. International Journal of Geo-Engineering, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-019-0104-8>
- Rahardjo, H., Nio, A. S., Harnas, F. R., & Leong, E. C. (2014). *Comprehensive Instrumentation for Real Time Monitoring of Flux Boundary Conditions in Slope*. Procedia Earth and Planetary Science, 9, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.015>
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Choon, E. (2016). *Effects of rainfall characteristics on the stability of tropical residual soil slope*. E3S Web Conferences, 9.
- Rahayu, W., Ramadhan, R. I., Adinegara, A. W., Adiguna, G. A., Hamdany, A. H., Wijaya, M., Prakoso, W. A., Sagitaningrum, F. H., & Satyanaga, A. (2024). *Effect of slope protection using concrete waste on slope stability during rainfall*. Results in Engineering, 24. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103244>
- Satyanaga, A., Abishev, R., Sharipov, A., Wijaya, M., Hamdany, A. H., Moon, S. W., & Kim, J. (2023). *Effect of slope geometry on stability of slope in Almaty*. E3S Web of Conferences, 382. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338213005>
- Satyanaga, A., Rahardjo, H., & Zhai, Q. (2017). *Estimation of unimodal water characteristic curve for gap-graded soil*. Soils and Foundations, 57(5), 789–801. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.009>
- Sharipov, A., Satyanaga, A., Abishev, R., Moon, S. W., Taib, A. M., & Kim, J. (2023). *Influence of Slope Geometry on Stability of Clayey Soil Slopes*. Geotechnical and Geological Engineering, 41(5), 2939–2950. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02438-0>
- Spencer, E. (1967). *A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces*. Geotechnique, 17, 11–26. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>
- Strauch, A. M., MacKenzie, R. A., Giardina, C. P., & Bruland, G. L. (2015). *Climate driven changes to rainfall and streamflow patterns in a model tropical island hydrological system*. Journal of Hydrology, 523, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.045>
- Tang, G., Huang, J., Sheng, D., & Sloan, S. W. (2018). *Stability analysis of unsaturated soil slopes under random rainfall patterns*. Engineering

Geology, 245, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.013>

- Ugai, K., & Leshchinsky, D. (1995). *Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analyses: A Comparison of Results*. Soils and Foundations, 35, 1–7. https://doi.org/10.3208/sandf.35.4_1
- W. W. Ng, C., & Menzies, B. (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Taylor & Francis.
- Xu, J., Zhao, X., Li, P., & Zhang, M. (2021). *Stability of a 3D unsaturated vertical cut slope subjected to variable rainfall infiltration*. Computers and Geotechnics, 134. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104110>
- Yang, K. H., Thuo, J. N. ang'a, Huynh, V. D. A., Nguyen, T. S., & Portelinha, F. H. M. (2018). *Numerical evaluation of reinforced slopes with various backfill-reinforcement-drainage systems subject to rainfall infiltration*. Computers and Geotechnics, 96, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.012>