

Studi Kasus Gerakan Tanah Dipicu Hujan dengan Menggunakan Model TRIGRS

Modeling of Rainfall - Triggering Landslide using TRIGRS Model

Farid Nur Bahti, Agus Setyo Muntohar

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Indonesia adalah negara yang rawan terhadap bencana hidrometeorologi seperti banjir dan tanah longor. Salah satu dari banyaknya penyebab tanah longor yaitu karena tingginya intensitas curah hujan pada suatu kawasan tertentu. Pada penelitian ini akan dikaji distribusi faktor aman dan distribusi tekanan air pori pada lereng saat berada dalam kondisi hujan. Nilai-nilai faktor aman dan kenaikan tekanan air-pori tersebut diperoleh dari hasil pemodelan numerik menggunakan *software* TRIGRS (*The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) versi 2.0. Hasil dari pemodelan tersebut selanjutnya diolah dalam *software* berbasis *Geographic Information System* sehingga distribusi nilai-nilai faktor aman dan kenaikan tekanan air-pori dapat divisualisasikan dalam bentuk peta spasial 2-Dimensi.

Kata kunci: Tanah longor, nilai faktor aman, TRIGRS, GIS, stabilitas lereng.

Abstract. Indonesia is a country which prone to hydrometeorological disasters such as flood and landslide. One of the many causes of landslides is due to the high intensity of rainfall in a particular area. In this study we will examine the distribution of factor of safety (FS) and distribution of pore-water pressure on the slope while in rain condition. The values of the Factor of Safety (FS) and the increase of pore-water pressure were obtained from numerical modeling using the TRIGRS (*The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) version 2.0 software. The results of the modeling processed in a Geographic Information System-based software so that the distribution of Factor of Safety (FS) values and pore-water pressures can be visualized in the form of a 2-dimensional spatial map.

Key words: Landslide, Factor of Safety (FS), TRIGRS, GIS, slope stability.

1. Pendahuluan

Pada umumnya longor terjadi pada musim penghujan. Hujan secara terus menerus sangat berpengaruh terlebih ketika pada sebuah lereng yang memiliki jenis tanah dengan tingkat permeabilitas tinggi (Muntohar dkk., 2013). Namun demikian masih banyak pula faktor-faktor lain penyebab pergerakan tanah diantaranya yaitu faktor geologi, geomorfologi, faktor vegetasi penutup lahan, dll. (Muntohar dan Ikhsan, 2013).

Perkembangan pemodelan peristiwa pergerakan tanah dipicu hujan terus meningkat, khususnya untuk pemodelan distribusi faktor aman dari sebuah lereng. Secara global penelitian tentang pergerakan tanah dipicu hujan telah banyak dilakukan. Ward (1979) membuat sebuah penelitian tentang pemodelan numerik pada sebuah lereng dengan mempertimbangkan faktor

vegetasi tanaman dan hujan. Kesimpulannya yaitu metode yang paling tepat untuk membuat sebuah pemodelan longor adalah dengan pendekatan geoteknik, yaitu mempertimbangkan keadaan alamiah dari sebuah lereng seperti kedalaman tanah, muka air tanah, sudut gesek internal efektif tanah, kohesi efektif tanah, hingga intensitas hujan.

Baum dkk. (2008) mengembangkan pemodelan numerik 1D dengan membuat sebuah program berbasis fortran. Program ini dapat menghitung variabel-variabel geoteknik dan hidrologi sehingga memiliki keluaran data berupa nilai faktor aman sebuah lereng saat berada dalam kondisi tak jenuh hingga menjadi jenuh air. Program tersebut diberi nama TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis*). Chen (2005) menyebutkan jika TRIGRS memiliki hasil yang sangat baik untuk menganalisis lokasi longor panjang

garis pengamatan 167 m. Liao dkk. (2010) melakukan penelitian memakai model TRIGRS dengan cakupan garis pengamatan hanya sekitar 120 m. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan jika performa TRIGRS memiliki tingkat keakuratan yang sangat baik, yaitu mencapai 98%.

Hasil dari program TRIGRS yang berupa *Grid Data* memungkinkan penggunaannya untuk mengombinasikan program tersebut dengan program berbasis *Geographic Information Sytem*. Sehingga pada penelitian ini akan dikombinasikan antara hasil dari pemodelan numerik yang diolah di program TRIGRS dengan program ArcGIS untuk memvisualisasikan distribusi nilai faktor aman dan distribusi nilai tekanan air-pori pada lereng.

2. Pemodelan TRIGRS

TRIGRS (*The Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) merupakan program pemodelan berbasis Fortran yang didesain untuk memodelkan potensi terjadinya longsor dangkal yang pemicunya adalah curah hujan yang tinggi. Instalasi TRIGRS dapat dilakukan pada komputer dengan sistem operasi Windows dan MAC OS. Untuk menjalankan program TRIGRS pada sistem operasi Windows maka harus dibuka melalui program *Command Line* yang ada pada Windows. Hasil dari program TRIGRS juga dapat dikombinasikan dengan program berbasis *Geographic Information System* (GIS).

Fitur TRIGRS

Pada dasarnya program ini menerapkan konsep analisis yang sama dengan yang dipaparkan oleh Iverson (2000) dengan menghitung bangkitan tekanan air pori secara vertikal. TRIGRS dapat menghitung berdasarkan variabel-variabel masukan seperti kedalaman tanah, kedalaman muka air tanah, koefisien permeabilitas tanah jenuh air, difusivitas, parameter-parameter kurva karakteristik air-tanah, kohesi efektif tanah, sudut geser internal tanah efektif, dan berat volume tanah. Selain itu pengguna juga dapat memvariasikan curah hujan yang diinginkan dalam waktu tertentu.

Program TRIGRS dapat membaca data dengan ekstensi ASCII dalam bentuk standar yang telah ditetapkan oleh program ArcGIS (versi 9.2 atau yang terbaru) dan program Grass GIS (versi 6.3 atau yang terbaru) sehingga memungkinkan penggunaannya untuk memvisualisasikan hasil analisis pada program berbasis *Geographic Information System* (GIS).

TRIGRS menyediakan empat pilihan dalam memodelkan kondisi lereng: (1) kondisi tanah jenuh dengan kedalaman bidang longsor tak-terbatas (*infinite depth*), (2) kondisi tanah jenuh dengan kedalaman bidang longsor terbatas (*finite depth*), (3) kondisi tanah tak jenuh dengan kedalaman bidang longsor tak terbatas, (4) kondisi tanah tak jenuh dengan kedalaman bidang longsor terbatas (Saadatkah dkk., 2016).

Model Infiltrasi

Untuk memodelkan infiltrasi pada lereng, TRIGRS memakai persamaan yang diusulkan oleh Iverson(2000) dengan asumsi curah hujan yang konstant. Secara umum perhitungan proses infiltrasi TRIGRS menggunakan persamaan yang tercantum pada Persamaan 1.

$$\psi(Z,t) = (Z-d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} \left\{ H(t-t_n) [D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_S} \left\{ H(t-t_{n+1}) [D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t-t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \quad (1)$$

dengan ψ = tekanan air tanah, t = waktu (s), $Z = z/\cos \delta$, dimana Z adalah sumbu dalam kordinat yang merupakan kedalaman tanah, dan z tegak lurus terhadap kemiringan lereng α . d =kedalaman muka air tanah searah sumbu z . $\beta = \cos^2 \delta - (I_{ZLT}/k_s)$. I_{ZLT} = aliran awal pada permukaan. k_s = koefisien permeabilitas tanah. I_{nZ} = aliran pada saat intensitas waktu ke- n . $D_1 = D_0 / \cos \delta$, dimana D_0 adalah diffusivitas. Untuk menghitung diffusivitas menggunakan persamaan 3, N = total interval waktu, dan $H(t-t_n)$ = fungsi bobot.

Untuk menghitung fungsi kesalahan (*integral of the error function complement*), diberikan Persamaan 2.

$$ierfc(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2) - erfc(\eta) \quad (2)$$

Untuk difusivitas yang dipakai adalah persamaan yang diusulkan oleh Freeze dan Cherry (1979) seperti yang disajikan pada Persamaan 3.

$$D_{\psi} = \frac{\alpha \cdot K_s}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (3)$$

Analisis Stabilitas Lereng

Pemodelan TRIGRS merupakan pemodelan numerik yang dapat diterapkan untuk area tertentu (Baum dkk., 2008). TRIGRS memiliki *ouput* berupa nilai faktor aman (FS) dan nilai tekananan air pori terhadap kedalaman muka air tanah. Perhitungan nilai faktor aman diberikan pada Persamaan 4. Model perhitungan tersebut memakai persamaan yang diusulkan oleh Iverson (2000). Secara batas keseimbangan, nilai faktor aman pada suatu lereng adalah < 1 (Lien dkk., 2015).

$$F_s(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad (4)$$

dengan c' = kohesi efektif tanah. ϕ' = sudut geser internal tanah. γ_s = berat volume tanah. γ_w = berat volume air. $\psi(Z, t)$ = tekanan air pori (Persamaan 1).

3. Metode Penelitian

Bahan Tanah

Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *undisturbed sample* atau sampel tak terusik. Selanjutnya sampel tersebut diuji untuk mengetahui sifat-sifat tanah. Hasil pengujian dipaparkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengujian sifat-sifat geoteknik dan hidraulika tanah

Variabel	Hasil
Berat Jenis, G _s	2,63
Batas-batas konsistensi:	
-Batas Cair, LL (%)	69,1
-Batas Plastis, PL (%)	35,5
-Indeks Plastis (%)	33,6
Kohesi efektif, c' (kN/cm ²)	1,4
Sudut gesek internal, ϕ' (°)	34,8
Kadar air volumetrik jenuh air, Θ_s (m ³ / m ³)	16,9
Kadar air volumetrik residu, Θ_r (m ³ / m ³)	4,8

4. Tahapan Penelitian

Pengambilan Sampel Tanah

Menurut Groenedwoud (1959) pengambilan sampel tanah *undisturb sample* dapat menggunakan 3 metode: (1) metode *hammering*; (2) metode pemberian tekanan tetap; (3) menggunakan *handbor* atau *motorbor*. Tatacara pengambilan sampel tanah mengacu pada ASTM 7015-04 (ASTM, 2004). yang menjelaskan bahwa pengambilan sampel tanah dapat memakai dua cara, yaitu dengan cara *block sampling* dan *cylindrical sampling*. Pada penelitian ini metode yang dipakai adalah metode *hammering* dan pengambilannya memakai cara *cylindrical sampling*.

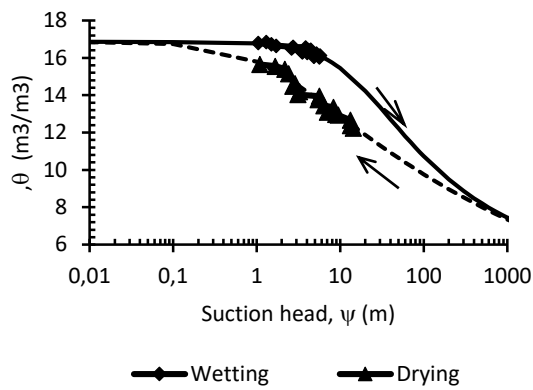
Pengujian SWCC (Soil Water Charracteristic Curve)

Pengujian *suction* untuk SWCC menggunakan metode *filter paper*. Pengujian menggunakan metode *filter paper* digunakan karena metode ini lebih mudah untuk diterapkan. Pengukuran *suction* memakai metode *filter paper* dijelaskan dalam ASTM D5298 (ASTM, 2003). Berdasarkan pengujian tersebut maka akan diperoleh parameter-parameter SWCC seperti yang tercantum pada Tabel 2, dan memiliki kurva SWCC seperti yang disajikan pada Gambar 2.

Tabel 2 Hasil pengujian parameter SWCC

α	Θ_r	Θ_s	n
-0,81	4,8	16,86	1,12

Keterangan : α = invers dari nilai tekanan udara (*air-entry value*) ; Θ_r = kadar air volumetrik ; Θ_s = kadar air jenuh; n= indek distribusi ukuran pori tanah.



Gambar 2 Kurva SWCC

Pengujian Triaksial Metode CU

Pengujian triaksial mengacu pada standar ASTM D4767-95 (ASTM, 1995). Pengujian CU (*Consolidated Undrained*) melalui tiga tahap pengujian, yaitu proses saturasi, konsolidasi, dan penggesaran. Pengujian ini akan menghasilkan kohesi efektif tanah (c') dan sudut geser internal efektif tanah (ϕ).

Pengujian Permeabilitas Tanah

Pada penelitian ini metode yang dipakai yaitu metode *falling head test*. Metode ini menggunakan standar yang diusulkan oleh ASTM D5856-95 (ASTM, 2007) dengan persamaan seperti Persamaan 5.

$$k = \frac{a \times L}{2A \times t} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (5)$$

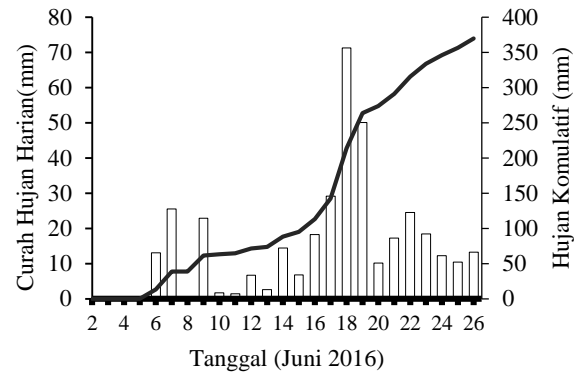
dimana k = koefisien permeabilitas. a = luas penampang selang pengukuran. t = durasi waktu penurunan air (detik). h_1 = tinggi air dalam waktu t_1 . h_2 = tinggi air dalam waktu t_2 . A = Luas penampang benda uji.

Pengujian permeabilitas pada penelitian ini menggunakan pengujian skala laboratorium. Hasil dari pengujian ini yaitu didapatkan nilai koefisien permeabilitas tanah jenuh air (k_s) = 0.000123 m/s.

Pengukuran Curah Hujan

Hujan merupakan variabel yang sangat berpengaruh dalam proses terjadinya longsor. Pada penelitian ini curah hujan diperoleh dari halaman TRMM-NASA. Data curah hujan diperoleh melalui satelit *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) dari NASA

(*National Aeronautics and Space Administration*) berdasarkan koordinat lokasi. Curah hujan dapat diunduh melalui laman <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Hasil pengukuran tersebut disajikan dalam bentuk grafik intensitas hujan pada Gambar 3.



Gambar 3 Data curah hujan.

Peta DEM

Peta DEM (*Digital Elevation Model*) merupakan peta yang menggambarkan tentang bentuk atau pola dari permukaan bumi bersama dengan tataletak koordinatnya dalam format data digital. Peta DEM (*Digital Elevation Model*) diperoleh dari halaman *Earth Explorer-NASA*. Selanjutnya data peta digital tersebut diolah dalam *software Arc-GIS* hingga didapatkan, model aliran air (*flow directions*), dan kemiringan lereng (*slope*). Peta DEM yang dipakai adalah peta dengan resolusi terbaik yang ada, hal ini perlu diperhatikan untuk mengurangi tingkat *error* dalam pengolahan data nantinya.

Analisis TRIGRS

Software TRIGRS berfungsi untuk mengolah beberapa variabel masukan menjadi data faktor aman lereng. Adapun variabel yang dibutuhkan tercantum pada Tabel 3.

Pengolahan data pada Software ArcGIS

Software ArcGIS dipakai untuk memvisualisasikan data berupa grid-data faktor aman lereng yang telah dianalisis oleh *software TRIGRS* menjadi peta spasial. Dengan data yang berupa grid, nilai faktor aman diklasifikasikan menurut klasifikasi nilai faktor aman oleh Ward dkk. (1979) pada Tabel 4.

Tabel 3 Varibel-variabel masukan TRIGRS

c' (Kpa)	ϕ' ($^{\circ}$)	γ_s (kN/m ³)	K_s (m.s ⁻¹)	D_o (ms ⁻¹)	α	θ_r	θ_s
10,1	34,8	22	2.13×10^{-4}	$11.55 \cdot 10^{-5}$	-0,068	4,8	16,8

Keterangan : α = invers dari nilai tekanan udara (*air-entry value*) ; θ_r = kadar air volumetrik ; θ_s = kadar air jenuh; n = indeks distribusi ukuran pori tanah.

Tabel 4 Klasifikasi nilai faktor aman terhadap probabilitas terjadinya longsor (Ward dkk., 1979)

Klasifikasi	Potensi Longsor (FS)	Probabilitas
Tinggi	<1.2	>60%
Menengah	1.2 – 1.7	30% - 60%
Rendah	>1.7	< 30%

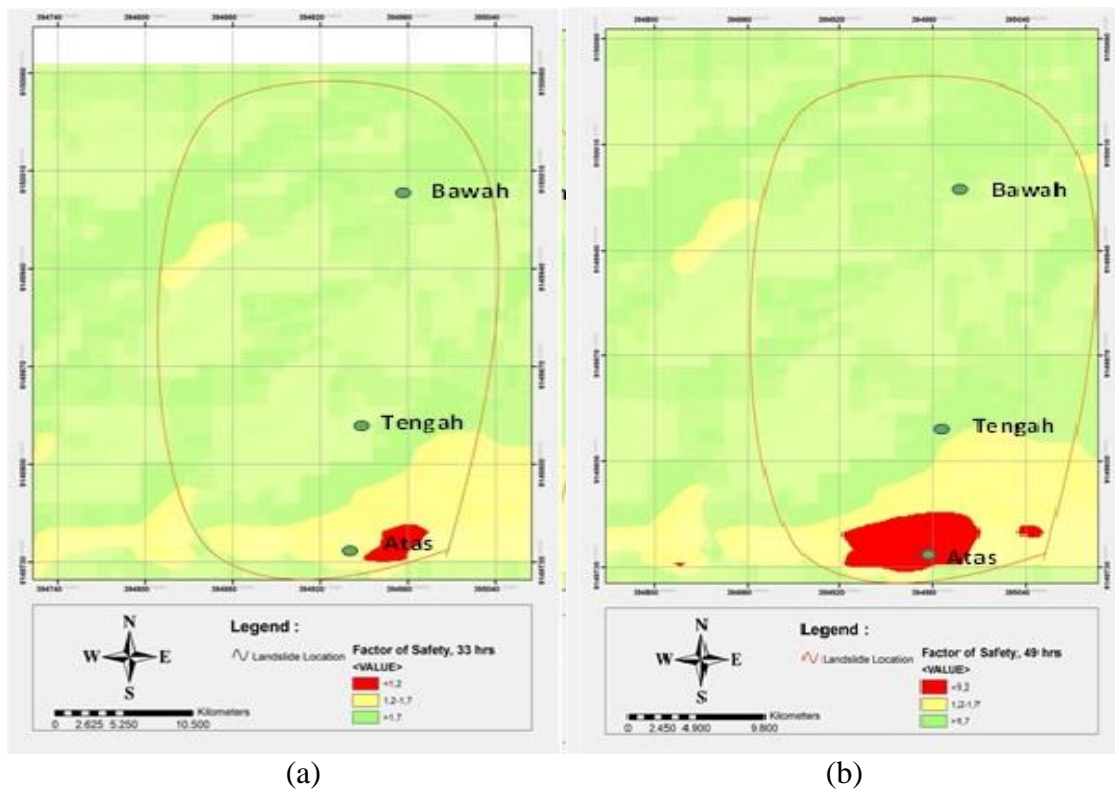
5. Hasil dan Pembahasan

Distribusi Faktor Aman Lereng

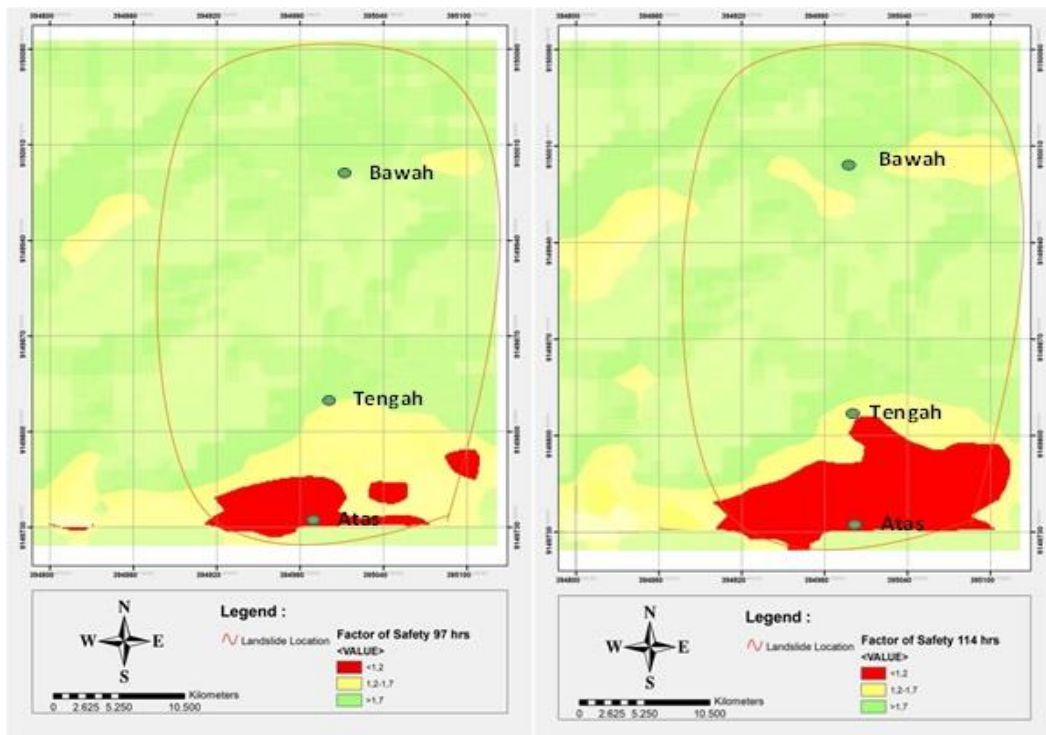
Pada Gambar 4 disajikan distribusi faktor aman lereng di Desa Karangrejo, Kec. Loano, Kabupaten Purworejo dalam bentuk peta spasial. Peta spasial faktor aman lereng menampilkan visualisasi nilai-nilai faktor aman lereng terhadap intensitas hujan. Peta

faktor aman yang dibandingkan yaitu peta pada saat kondisi hujan 33 jam, hujan 48 jam, hujan 97 jam, dan hujan 114 jam.

Menurut Ward dkk. (1979) klasifikasi potensi longsor dapat dibagi menjadi tiga klaster, klasifikasi potensi longsor dan probabilitas terjadinya longsor disajikan dalam Tabel 4.



Gambar 4 Peta spasial faktor aman lereng terhadap intensitas hujan, (a) hujan 33 jam, (b) hujan 49 jam, bersambung



(c) (d)
Gambar 4 sambungan, (c) hujan 97 jam, dan (d) hujan 114 jam.

Pada Gambar 4 lokasi yang berwarna merah adalah lokasi dengan probabilitas lebih dari 60% akan terjadi longsor.

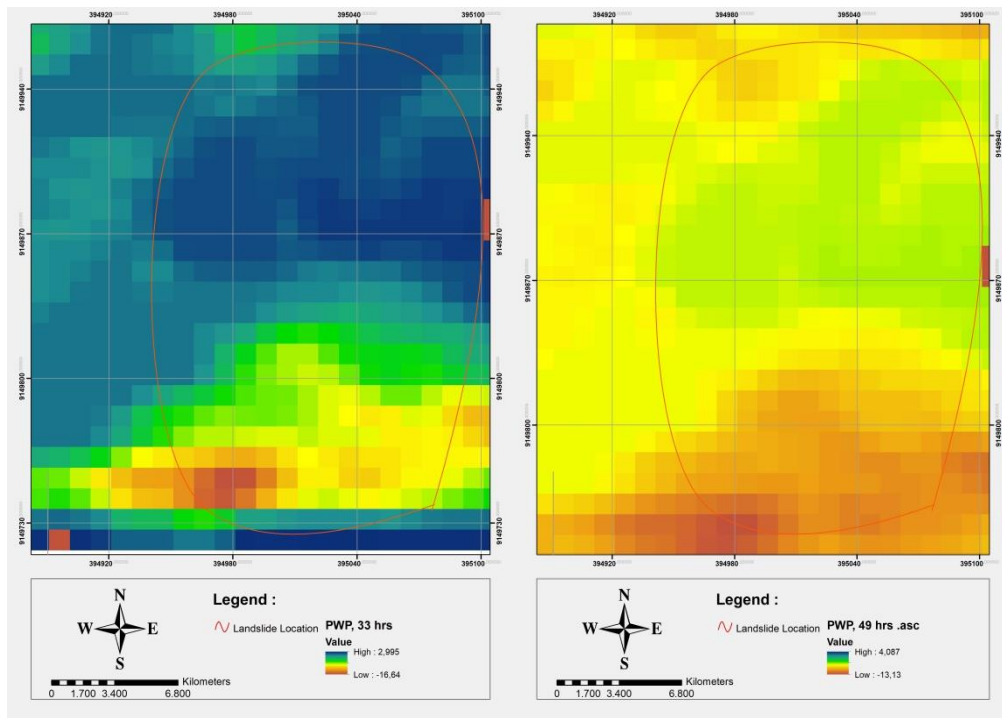
Luas area merah dalam satuan persen terhadap luas area dampak longsor adalah 1,1% pada hujan 33 jam, 3,4% pada hujan 49 jam, 12,7% pada hujan 97 jam, dan 15,1% pada hujan 114 jam. Grafik pertambahan luas area dengan hujan kumulatif disajikan dalam Gambar 6 dan pada Gambar 7 disajikan grafik penurunan nilai faktor aman dengan intensitas hujan pada masing-masing titik tinjauan.

Panjang garis lokasi pengamatan longsor adalah sekitar 180 m, sehingga dapat disimpulkan jika prediksi TRIGRS memiliki tingkat keakuratan yang baik. Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Chen (2005) dan Liao dkk. (2010) dengan panjang lokasi pengamatan kurang dari 200 m menyimpulkan jika tingkat akurasi TRIGRS mencapai 98%. Menurut Salciarini (2006) kurang akuratnya analisis TRIGRS dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti 1) faktor resolusi peta DEM, 2) faktor keakuratan riwayat curah hujan, dan 3) faktor keadaan riil lapangan.

Distribusi Tekanan Air-Pori

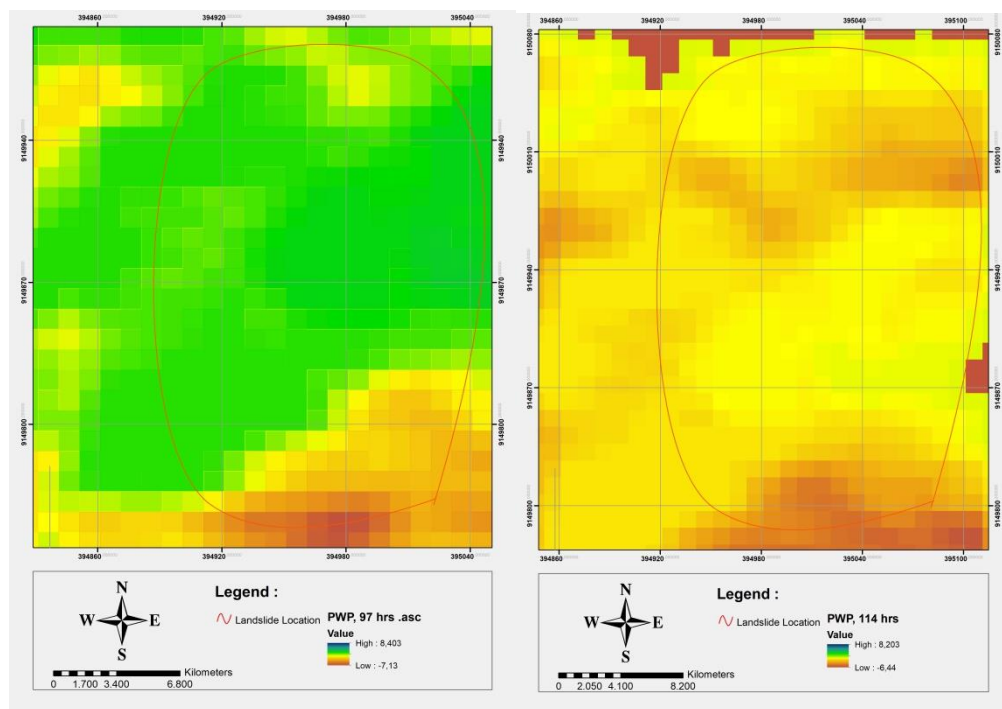
Hasil visualisasi distribusi tekanan air pori disajikan dalam bentuk peta spasial dan grafik hubungan tekanan air-pori terhadap durasi hujan sebagaimana yang disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 8.

Beberapa parameter yang dapat mempengaruhi bangkitan tekanan air-pori yaitu perubahan intensitas hujan, dan keadaan permeabilitas tanah (Iverson, 2000; Baum dkk., 2008). Gambar 5 dan Gambar 8 menunjukkan bahwa terjadi perubahan tekanan air-pori seiring dengan peningkatan intensitas hujan. Pada hujan dengan durasi 33 jam, 48 jam, 97 jam, dan 114 jam, masing-masing memiliki nilai tinggi tekanan air-pori sebesar 2,99 m, 4,087 m, 8,403 m, dan 8,203 m.



(a)

(b)

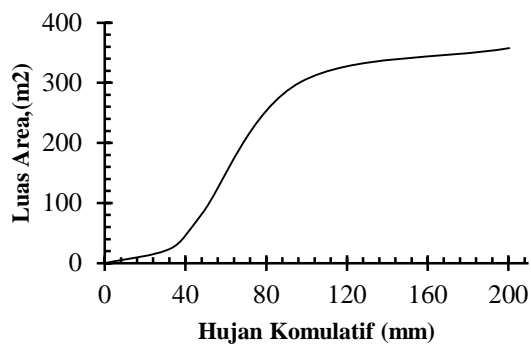


(c)

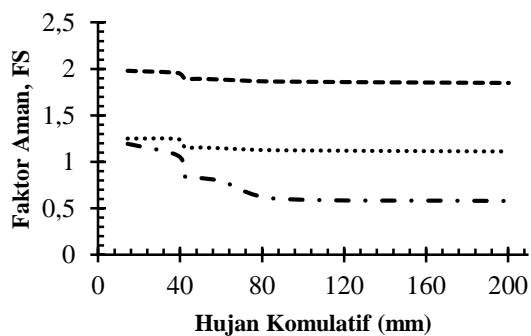
(d)

Gambar 5 Distribusi tekanan air-pori pada kondisi (a) 33 jam, (b) 49 jam, (c) 97 jam, dan (d) 114 jam.

Chen dkk. (2005) menyebutkan jika bangkitan tekanan air-pori akan meningkat ketika kondisi intensitas hujan semakin tinggi. Sehingga dibagian atas dari lereng, tekanan air-pori akan semakin meningkat kemudian merembes ke bagian luar dan dalam tanah, sehingga di bagian bidang longsoran membetuk jalur rembesan.

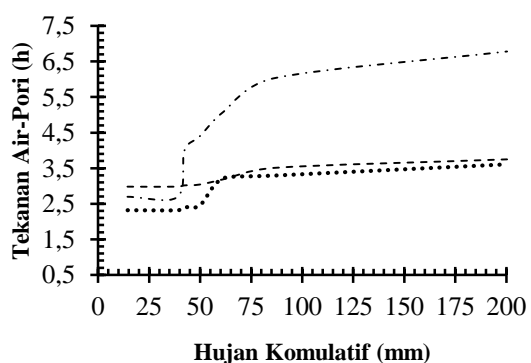


Gambar 6 Grafik hubungan luas area dengan hujan kumulatif



--- Atas Tengah ----- Bawah

Gambar 7 Grafik hubungan faktor aman dengan hujan kumulatif



----- Atas Tengah ----- Bawah

Gambar 8 Grafik hubungan tekanan air-pori dengan hujan kumulatif

6. Kesimpulan

Berdasarkan studi yang telah dilakukan, maka kesimpulannya adalah:

1. Ketika intensitas hujan semakin meningkat, maka faktor aman lereng akan mengalami penurunan dan luas area rawan longsor bertambah.
2. Sebaran angka tinggi tekanan air-pori terendah diperoleh sekitar 2,995 m dan tertinggi sebesar 8,203 m.

Daftar Pustaka

- ASTM. 2003. D4767-95: Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM. 2003. D5289: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM. 2015. D1452-09: Standard Practices for Obtaining Undisturbed Block (Cubical and Cylindrical). ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM. 2004. D7015-04: Standard Practices for Obtaining Undisturbed Block (Cubical and Cylindrical) Samples of Soils. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM. 2009. D5856-95: Standard Test Method Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA
- Baum, R. L., dan Godt, J. W. 2013. Erratum: Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1999.
- Chien, Lien Kwei, Chia Feng Hsu, dan Li Chung Yin. 2015. "Warning Model for Shallow Landslides Induced by Extreme Rainfall." *Water (Switzerland)* 7(8), 4362–84.

- Chien-Yuan, Chen, Chen Tien-Chien, Yu Fan-Chieh, dan Lin Sheng-Chi. 2005. "Analysis of Time-Varying Rainfall Infiltration Induced Landslide." *Environmental Geology* 48(4-5), 466-79.
- Fredlund, D. G. 2002. Use of Soil-Water Characteristic Curve in the Implementation of Unsaturated Soil Mechanics. *Third International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil*, 3, 10-13.
- Fredlund, D. G. dan Anqing Xing. 1994. "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve." *Canadian Geotechnical Journal* 31(6):1026-1026.
- Groenewoud, H. Van. 1960. Methods and Samplers for Obtaining Undisturbed Soil Samples in the Forest. *Soil Science*, 90(5), 272-274.
- Muntohar, A.S., Ikhsan, J., dan Liao, H. J. 2013. Influence of Rainfall Patterns on the Instability of Slopes. *Civil Engineering Dimension*, 15(2), 120-128.
- Liu, Z., Zhang, B., Yu, X., dan Tao, J. 2012. A new method for soil water characteristic curve measurement based on similarities between soil freezing and drying. *Geotechnical Testing Journal*, 35(1).
- Liao, Z., Hong, Y., Kirschbaum, D., Adler, R. F., Gourley, J. J., dan Wooten, R. 2011. Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: A case study in Macon County, North Carolina. *Natural Hazards*, 58(1), 325-339.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5):892.
- Ward, T. J., Li, R. M., dan Simons, D. B.. 1979. Landslide Potential and Probability Considering Randomness of Controlling Factors," *Proceedings International Symposium on Risk and Reliability in Water Resources*, University of Waterloo, Waterloo, Canada, June 26-28, 1978, pp. 592-608.
- Zad, S. N. M., Zulkafli, Z., dan Muharram, F. M. 2018. Satellite rainfall (TRMM 3B42-V7) performance assessment and adjustment over Pahang river basin, Malaysia. *Remote Sensing*, 10(3), 1-24.