



Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY

Fakultas Teknik Geologi
UNIVERSITAS PADJADJARAN

homepage: <http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X



Volume 22, No.3
Desember 2024

PERAN INTENSITAS HUJAN TERHADAP STABILITAS LERENG DI DAERAH JATISARI, KECAMATAN BOJONGPICUNG, KABUPATEN CIANJUR, PROVINSI JAWA BARAT

Devanya Anantasya Sholtan¹, R. Irvan Sophian¹, Adi Hardiyono¹ Iskandar²

¹Faculty of Geological Engineering Padjadjaran University, Indonesia

²Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG)

Corresponding author: devanya20002@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Pada tanggal 25 April 2024 diketahui telah terjadi peristiwa gerakan tanah di daerah Jatisari, Kecamatan Bojongpicung, Kabupaten Cianjur, Provinsi Jawa Barat. Menurut keterangan warga sekitar, peristiwa tersebut terjadi setelah hujan dengan durasi yang cukup panjang. Studi ini bertujuan untuk melihat keterkaitan hujan dengan peristiwa gerakan tanah yang terjadi di daerah Jatisari. Metode yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengamatan lapangan, pembuatan geometri lereng, pengujian laboratorium, dan pemodelan. Pemodelan yang dilakukan berupa analisis rembesan air hujan dengan perangkat lunak Geostudio SEEP/W dan analisis kestabilan lereng dengan perangkat lunak Geostudio Slope/W. Dari analisis tersebut diketahui hujan yang terjadi selama 12 hari dengan intensitas hujan dengan rentang 1,8 mm/jam atau hujan 6 hari dengan intensitas 60 mm/jam dapat menurunkan faktor keamanan (FK) hingga rentang nilai 0,684 – 0,763. Mekanisme berkurangnya kestabilan lereng ini terjadi akibat hilangnya *matric suction*. Hilangnya *matric suction* merupakan pengaruh dari infiltrasi air hujan ke dalam permukaan lereng.

Kata Kunci: Cianjur, hujan, analisis kestabilan lereng, *matric suction*

ABSTRACT

On 25th April 2024, a landslide happened in Jatisari Village, Bojongpicung Subdistrict, Cianjur Regency, West Java Province. According to locals, the event occurred after a long period of rainfall. This study aims to investigate the relationship between rainfall and the landslide in Jatisari. The methods used in this research include field observation, slope geometry creation, laboratory testing, and modeling. The modeling consists of rainwater seepage analysis using Geostudio SEEP/W software and slope stability analysis using Geostudio Slope/W software. From the analysis, it was found that 12 days of rainfall with an intensity of 1,8 mm/hour or 6 days of rainfall with an intensity of 60 mm/hour can reduce the factor of safety (FoS) to a range of 0,684 – 0,763. The mechanism that reduces slope stability occurs due to the loss of *Matric Suction*. This loss is caused by the infiltration of rainwater into the slope surface.

Keywords: Cianjur, rainfall, slope stability analysis, *matric suction*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang kerap mengalami bencana alam. Indonesia terletak pada pertemuan lempeng tektonik aktif, jalur pegunungan aktif, dan merupakan kawasan beriklim tropis sehingga menjadikan sebagian wilayahnya rawan terhadap bencana alam (Mahdia and Noviyanto, 2013; Rosyida et al., 2019). Berdasarkan data bencana Indonesia yang dihimpun oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), pada tahun 2023, tercatat telah terjadi 5.400 bencana alam. Sekitar 99,35% dari total bencana didominasi oleh bencana

hidrometeorologi, seperti banjir, kekeringan, dan tanah longsor. Dari bencana tersebut, longsor menempati posisi pertama bencana dengan angka kematian tertinggi, hal tersebut membuktikan bahwa longsor merupakan salah satu bencana yang paling mematikan di Indonesia.

Kejadian longsor di Indonesia yang notabenehnya merupakan negara tropis umumnya dipicu oleh tingginya curah hujan. Hal tersebut didukung dengan pendapat dari Filho dan Fernandes (2018) yang menyatakan bahwa hilangnya *matric suction* akibat infiltrasi air hujan merupakan salah satu

mekanisme utama penurunan stabilitas lereng pada daerah tropis. Penurunan *matric suction* hingga mencapai nilai 0 ini yang dapat menyebabkan kelongsoran (Cheng et al., 2010). (Filho and Fernandes, 2019)

Hilangnya *matric suction* ini dipengaruhi oleh infiltrasi air kedalam pori tanah sehingga menyebabkan tanah menjadi jenuh dan mengubah kemampuan tanah dalam menyerap air (Fredlund & Rahardjo, 1993; Hidayat, 2020). Ketika tanah mencapai kejenuhan, *matric suction* mencapai kondisi *air entry value* (AEV). Setelah itu, akan terjadi perubahan nilai *matric suction* secara cepat hingga mencapai nilai 0 bersamaan dengan adanya perubahan kecil pada nilai *volumetric water content* (Sattler et al., 2021).

Besaran nilai *matric suction* dapat ditentukan dari *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) (Brooks and Corey, 1964; Fredlund et al., 1994; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980). Besaran nilai *matric suction* dapat memengaruhi kekuatan geser tanah. Penurunan nilai *matric suction* akan berbanding lurus dengan penurunan nilai kekuatan geser, dengan penurunan nilai tersebut maka kelongsoran pun dapat terjadi (Pangemanan et al., 2014)

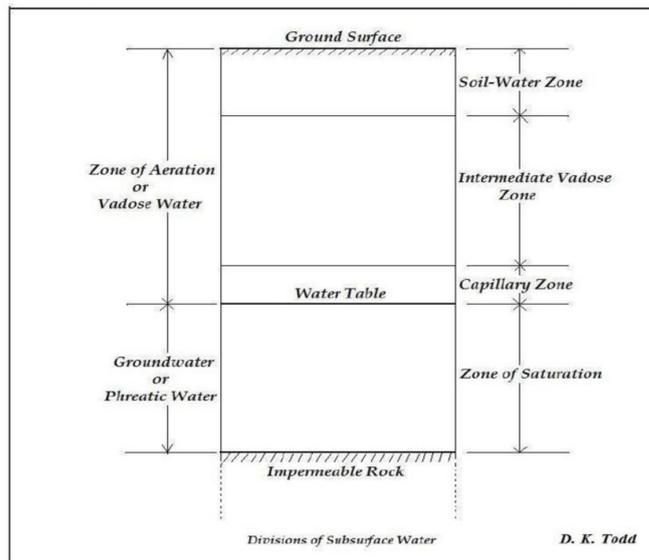
Peristiwa kegagalan lereng kerap terjadi di wilayah berpenduduk, mengakibatkan kerugian pada aspek ekonomi dan sosial yang besar. Pada tanggal 25 April 2024 diketahui

telah terjadi peristiwa gerakan tanah di daerah Jatisari, Kecamatan Bojongpicung, Kabupaten Cianjur. Menurut warga sekitar, longsor tersebut terjadi setelah kejadian hujan dengan durasi yang cukup lama. Berdasarkan data dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Cianjur, pergerakan tanah tersebut menyebabkan puluhan rumah rusak ringan hingga berat, dan beberapa infrastruktur seperti bangunan ibadah, sekolah, serta jalan juga mengalami kerusakan. Maraknya peristiwa kegagalan lereng menuntut pengetahuan ilmiah dan teknis yang luas guna mendukung tindakan mitigasi.

Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian untuk menyelidiki pemicu kegagalan lereng akibat penurunan *matric suction* yang disebabkan oleh infiltrasi air hujan. Dengan menggunakan metode analisis rembesan dan analisis stabilitas lereng. Pola aliran air dan pengaruhnya terhadap Faktor Keamanan (FK) lereng dimodelkan dengan menggunakan Seep/W dan Slope/W dalam perangkat lunak GeoStudio.

Parameter Unsaturated Soils

Unsaturated soils zone atau zona aerasi merupakan zona yang umumnya terletak diatas Muka Air Tanah (MAT) (Gambar 1). Pada zona ini, pori tanah terisi sebagian oleh tanah dan udara (Todd, 1980).



Gambar 1 Skema Unsaturated Soils (Todd, 1980)

Mengkarakterisasi parameter-parameter *unsaturated soil* merupakan hal mendasar yang perlu dilakukan untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan variasi volume air dalam pori tanah serta ketahanan geser (Fredlund, 2002).

Dalam penelitian ini terdapat beberapa parameter *unsaturated soils* yang perlu

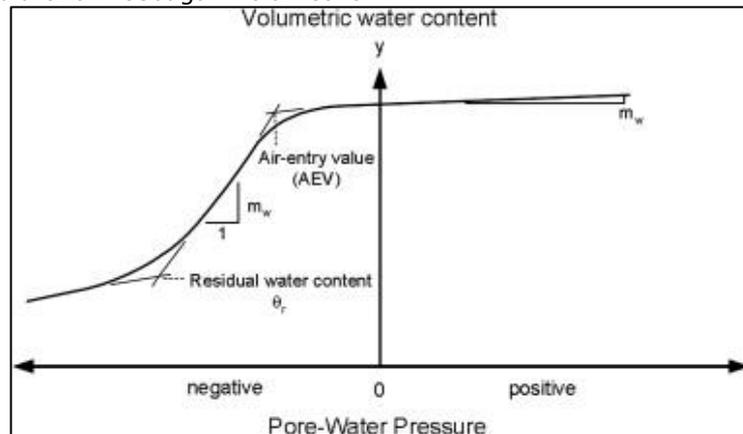
dikarakterisasi. Berikut ini merupakan parameter tersebut.

Soil Water Characteristic Curves (SWCC)

SWCC merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara *matric suction* dan

Volumetric Water Content (VWC). *Matrix suction* merupakan zona tekanan air pori yang terletak di atas permukaan air tanah dan umumnya bernilai negatif. Sedangkan, *Volumetric Water Content (VWC)* dapat didefinisikan sebagai sisa volume pori yang terisi air seiring dengan aliran air tanah dan umumnya dihitung sebagai persentase dari total volume tanah. SWCC merupakan salah satu parameter utama yang digunakan dalam pemodelan aliran air tanah (Fu et al., 2011; Putra, 2014). SWCC sering diartikan sebagai *volumetric*

water content curve yang menggambarkan kemampuan tanah dalam menyimpan dan melepaskan air. SWCC memiliki dua karakteristik utama: *Air entry Value (AEV)* dan *residual water content (θ_r)*. *Air Entry Value (AEV)* didefinisikan sebagai nilai *matrix suction* pada saat udara mulai masuk ke dalam pori-pori dalam tanah, sedangkan *residual water content* didefinisikan sebagai tahap dimana perubahan *suction* diperlukan untuk menambahkan air ke dalam tanah (Yunusa dan Gofar, 2012).



Gambar 2 Soil Water Characteristic Curve (SWCC) (Sinarta, 2016)

Fredlund (2006) menyajikan sebuah persamaan untuk menciptakan grafik SWCC yang dapat menyediakan akurasi tinggi untuk memperkirakan nilai *matrix suction*.

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\{ \ln[e + (\frac{\psi}{a})^n] \}^m} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana θ_s merupakan *saturated volumetric water content*, e merupakan koefisien logaritmik dasar, ψ merupakan suction tanah, a adalah *Air entry Value (AEV)*, dan m adalah gradien kemiringan grafik tekanan air pori.

Fungsi Konduktivitas Hidraulik

Konduktivitas Hidraulik adalah kemampuan tanah untuk melewatkan air baik dalam kondisi *unsaturated* maupun *saturated*. Konduktivitas hidraulik pada *unsaturated soil* sangat dipengaruhi oleh perubahan jumlah pori dan nilai *Volumetric Water Content (VWC)*. Konduktivitas hidraulik pada *unsaturated soils* dapat ditentukan dengan memplot fungsi *matrix suction* pada grafik SWCC dengan data masukan *saturated hydraulic conductivity (Ksat)*. Pendugaan nilai konduktivitas hidraulik dapat dilakukan melalui pendekatan empiris, menurut Fredlund dkk. (1994)

$$Kw = Ksat \frac{\sum_{i=j}^n \frac{\theta(ey) - \theta(\psi) \theta_r(eyi)}{ey^i}}{\sum_{i=a}^n \frac{\theta(ey) - \theta_s}{ey^i} \theta_r(eyi)} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana Kw merupakan konduktivitas yang diperhitungkan dari kadar air dan tekanan air pori negatif, $Ksat$ merupakan konduktivitas

hidraulik jenuh yang didapatkan dari hasil pengukuran sampel, θ adalah *volumetric water content*, e merupakan koefisien logaritmik dasar, y adalah variable yang merepresentasikan logaritma dari tekanan air pori, j adalah interval dari j ke N , i adalah nilai tekanan air pori negatif terendah, N adalah nilai tekanan air pori negatif terbesar, ψ adalah *matrix suction*. θ_s turunan pertama dari persamaan tersebut

Aliran Fluida Bawah Tanah pada Unsaturated Soils

Terdapat dua jenis aliran di alam, yaitu *steady state flow* dan *transient state flow*. Dari persamaan Buckingham, kondisi *steady state* dapat didefinisikan sebagai keadaan dimana *influx rate* sama dengan *outflux rate*. Sedangkan pada *transient state* merupakan keadaan nilai *influx rate* tidak sama dengan *outflux rate*. Hal tersebut dapat terjadi ketika terjadi peristiwa hujan dengan intensitas tinggi, dimana sejumlah air masuk ke dalam tanah dan sebagian air menguap sehingga mengurangi jumlah air asli (Hou et al., 2020) Persamaan Richard (1931) dapat menggambarkan variasi aliran sebagai fungsi dari posisi (*steady state flow*) dan persamaan yang memperhitungkan variasi aliran terhadap fungsi waktu dan juga posisi (*transient state flow*). Persamaan Richard (1931), merupakan persamaan diferensial parsial (PDP) yang menggambarkan aliran

fluida dalam media berpori yang memiliki tingkat kejenuhan yang bervariasi. Persamaan ini didapatkan dengan menggabungkan persamaan Darcy-Buckingham dengan persamaan kontinuitas (Nimmo, 2006; Mawlood & Adnan, 2020)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \frac{\partial \phi t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(\theta) \frac{\partial \phi t}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \frac{\partial \phi t}{\partial z} \right] \dots \dots \dots (3)$$

Dimana $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ merupakan variasi dari *volumetric water content* per satuan waktu (*flow rate*), $k(\theta)$ merupakan fungsi konduktivitas hidraulik, dan $\frac{\partial \phi t}{\partial x}$, $\frac{\partial \phi t}{\partial y}$, dan $\frac{\partial \phi t}{\partial z}$ merupakan variasi dari total potensial air dalam arah x, y, dan z.

Stabilitas Lereng *Unsaturated Soils*

Analisis stabilitas pada lereng dengan material *unsaturated soil* menggunakan kriteria keruntuhan Mohr Coulomb yang diperluas berdasarkan persamaan tegangan efektif (Sattler et al., 2021)

$$\tau = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \dots \dots \dots (4)$$

Dimana c' merupakan kohesi efektif, $(\sigma_f - u_a)_f$ adalah nilai normal stress saat keruntuhan, ϕ' adalah sudut geser dalam, $(u_a - u_w)_f$ adalah nilai *matric suction* saat keruntuhan, dan ϕ^b adalah sudut yang mendeskripsikan laju perubahan *matric suction* seiring peningkatan kuat geser.

Keterkaitan antara parameter *unsaturated soil* dengan stabilitas lereng ditunjukkan dengan hubungan yang berbanding lurus antara *matric suction* dengan kekuatan geser tanah. Dengan hilangnya *matric suction* maka kekuatan geser akan menurun dan dapat menyebabkan keruntuhan lereng.

METODOLOGI

Metodologi pada penelitian ini meliputi observasi lapangan, pengujian laboratorium, analisis curah hujan, analisis rembesan dan analisis kestabilan lereng. Seluruh proses tersebut dilakukan sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan oleh *American Society for Testing Materials* (ASTM).

Observasi lapangan dilakukan dengan pemetaan geologi dan geoteknik, pengambilan citra drone, investigasi kondisi air tanah, dan pengambilan *undisturbed*

sample. Hal tersebut dilakukan guna menyediakan data dalam pembuatan profil lereng dan pelaksanaan analisis rembesan dan kestabilan lereng.

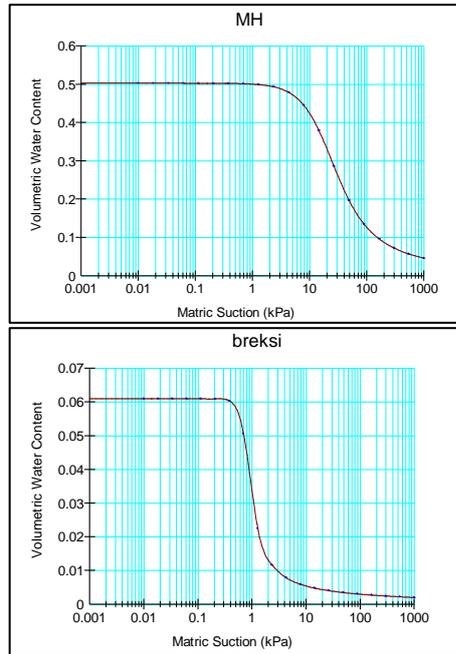
Uji laboratorium dilakukan terhadap *undisturbed sample* (UDS) untuk mendapatkan *material properties*. Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan sifat fisik material yaitu uji kadar air (ASTM D 2116 - 71), uji *unit weight* (ASTM D 7263 - 21), uji *Atterberg limit* ASTM (D 4318 - 05), uji *specific gravity* (ASTM D 854 - 58), *hydrometer analysis* (ASTM D 442 - 63 (98)), dan *sieving analysis* (ASTM D 2487 - 69). Uji sifat mekanik untuk mendapatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam dilakukan dengan *direct shear* (ASTM D 3080 - 03 dan D 3080 - 11). *Falling head test* (ASTM D5084) guna mendapatkan nilai konduktivitas hidraulik jenuh.

Data curah hujan yang akan dianalisis diunduh dari situs *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) *Global Rainfall Watch* dengan rentang satu tahun sebelum kejadian longsor, yaitu pada bulan April 2023 sampai dengan April 2024. Analisis dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai curah hujan maksimum, curah hujan rata-rata, dan curah hujan dominan. Untuk mendapatkan nilai hujan maksimum digunakan rumus =MAX, untuk mendapatkan nilai rata-rata digunakan rumus =AVERAGE. Sedangkan nilai intensitas dominan didapatkan dari pembuatan diagram *rainrose*.

Analisis rembesan pada penelitian ini dilakukan menggunakan SEEP/W dengan *finite element method*. Melalui analisis rembesan, distribusi tekanan air pori baik tanpa pengaruh hujan (*steady state*) ataupun dengan pengaruh hujan (*transient state*) dapat diketahui. Terdapat beberapa tahapan dalam pelaksanaan analisis rembesan yaitu sebagai berikut,

Analisis Parameter *Unsaturated Soil*

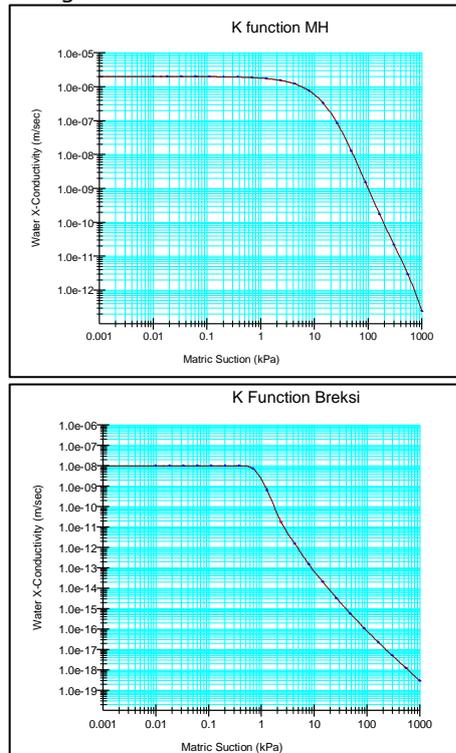
Soil Water Characteristic Curves (SWCC) dan fungsi konduktivitas hidraulik diperlukan untuk melakukan pemodelan aliran fluida bawah tanah pada *unsaturated soil*. Program pada SEEP/W dapat secara otomatis memperkirakan fungsi-fungsi tersebut. Grafik SWCC direpresentasikan pada Gambar 3



Gambar 3 SWCC Material MH dan Breksi Vulkanik (Geo-Slope, 2017)

Fungsi SWCC diestimasi berdasarkan model Fredlund (2006) dengan input data jenis material tanah dan *saturated water content*. Sedangkan, fungsi konduktivitas hidraulik dapat diestimasi menggunakan metode Van Genuchten dengan input data grafik SWCC

serta nilai konduktivitas hidraulik jenuh (K_{sat}). Fungsi konduktivitas hidraulik yang digunakan dalam penelitian ini direpresentasikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Fungsi Konduktivitas Hidraulik Material MH dan Breksi Vulkanik (Geo-Slope, 2017)

Pemodelan Aliran *Steady* dan *Transient State* Untuk melakukan pemodelan aliran kondisi *steady* dan *transient state* pada perangkat lunak SEEP/W, diperlukan penentuan

boundary condition. Kondisi batas itu sendiri menentukan bagaimana air masuk, mengalir, atau keluar dari model lereng yang sedang dianalisis,

Water pressure head boundary condition ditetapkan untuk merepresentasikan Muka Air Tanah (MAT) pada lokasi penelitian. Permukaan lereng menggunakan kondisi batas berupa *Water Flux*. *Potential seepage review* harus diaktifkan untuk menunjukkan kemungkinan adanya aliran air hujan ke dalam model lereng. Pada *steady state*, nilai unit fluks adalah konstan dengan $Q = 0 \text{ m}^3/\text{detik}/\text{m}^2$, ini merepresentasikan kondisi tanpa hujan. Sementara itu, dalam *transient state*, nilai fluks merupakan fungsi dari nilai curah hujan per jam.

Batas kiri dan kanan model lereng diberi batas berupa *Water Rate* dengan nilai 0. Batas-batas ini ditunjukkan untuk merepresentasikan kondisi tanpa aliran.

Perhitungan Tekanan Air Pori Negatif (*Matric Suction*)

Distribusi dan variasi tekanan air pori negatif pada *unsaturated soil* diatur oleh aliran air, yang dipengaruhi pula oleh banyak faktor intrinsik dan eksternal. Faktor intrinsik yang utama adalah sifat hidrolik tanah, termasuk SWCC dan koefisien konduktivitas hidraulik. Sedangkan, faktor eksternal mengacu pada kondisi iklim, seperti intensitas dan durasi curah hujan, pola curah hujan, dan laju evapotranspirasi (Zhan & Ng, 2004). Akibat infiltrasi air hujan ke dalam tanah, tekanan air pori negatif (*matric suction*) dapat hilang dan berubah nilainya menjadi positif. Perubahan tersebut berakibat pada terjadinya penurunan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) sehingga kelongsoran dapat terjadi. Maka dari itu, distribusi tekanan air pori negatif perlu dikalkulasikan untuk mengetahui pengaruh hujan terhadap keruntuhan lereng. Distribusi tekanan air pori negatif dapat diperhitungkan menggunakan perangkat lunak SEEP/W yang melibatkan beberapa prinsip dan metodologi utama yang memanfaatkan hukum aliran fluida melalui media berpori menggunakan persamaan Richard (persamaan 3) (Geo-slope, 2007). Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM), dimana domain dari daerah yang dianalisis dibagi ke dalam sejumlah zona-zona kecil yang dinamakan *mesh*. Kemudian, tekanan air pori dikalkulasikan dengan memecahkan persamaan Richard (persamaan 3) untuk setiap nodul dalam *finite element mesh* tersebut (Geo-Slope, 2017).

Fitur *parent analysis* pada software GEOSTUDIO digunakan untuk mempermudah ekspor data distribusi tekanan air pori dari SEEP/W ke SLOPE/W. Distribusi tekanan air pori diperlukan untuk melakukan analisis kestabilan lereng dengan model keruntuhan Mohr-Coulomb. Selain distribusi tekanan air pori, diperlukan juga berat isi tanah, kuat

geser tanah, dan kohesi untuk melaksanakan analisis ini. Perhitungan faktor keamanan menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) dengan metode Janbu. Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat diperoleh hubungan antara variasi intensitas hujan dengan perubahan nilai Faktor Keamanan (FK).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Material Lereng

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan pengujian laboratorium, diketahui daerah penelitian tersusun atas satuan tanah MH (*Silt High Plasticity*) dan satuan batuan Breksi Vulkanik. Tanah MH memiliki ketebalan sekitar 3 meter dengan warna coklat kemerahan, ukuran butir lanau (Gambar 5).



Gambar 5 Satuan Tanah MH

Tanah tersebut memiliki plastisitas tinggi, konsistensi tanah lepas hingga lunak, kadar air agak lembab hingga lembab, dan struktur homogen, serta tingkat pelapukan sempurna (*Completely Weathered Zone*).

Sedangkan satuan breksi vulkanik memiliki warna lapuk coklat kehitaman dan warna segar abu kehitaman, ukuran komponen dari kerikil sampai bongkah, kebulatan komponen sub angular - sub rounded, serta memiliki kemas terbuka dan sortasi buruk (Gambar 6).

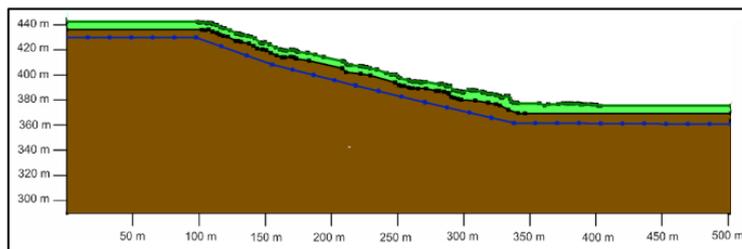


Gambar 6 Satuan Breksi Vulkanik

Breksi vulkanik ini tersusun atas fragmen batuan beku dan matriks batuan piroklastik. Fragmen batuan beku berupa andesit dengan warna lapuk coklat, warna segar abu gelap, memiliki granularitas porfiritik dan indeks

warna mesokratik, serta struktur yang didapati merupakan struktur masif. Matriksnya adalah batuan piroklastik berupa tuff halus dengan warna lapuk coklat kemerahan, warna segar putih keabuan. Memiliki ukuran butir abu halus dan bentuk butir sub angular - angular. Kemasannya terbuka dengan sortasi baik. Struktur yang didapati berupa massif dan memiliki kekompakan keras.

Berdasarkan hasil observasi lapangan didapatkan model geometri lereng dengan jarak horizontal 310 meter, jarak vertikal 60 meter dan *overall slope* sebesar 14°. Ketebalan lapisan tanah diasumsikan setebal 3 meter dan kondisi Muka Air Tanah (MAT) diasumsikan berada pada kedalaman 12 meter (Gambar 7)



Gambar 7 Geometri Lereng

Dari hasil uji laboratorium didapatkan *material properties* yang nantinya akan digunakan dalam proses analisis rembesan dan analisis kestabilan lereng (Tabel 1) Tabel 1 Material Properties MH dan Breksi Vulkanik

Analisis	Parameter	MH	Breksi Vulkanik
Rembesan	Saturated Water Content (Wsat)	48,6%	6%
	Grain Size	Silt	Gravel
	Konduktivitas Hidraulik Jenuh (Ksat) yd (kN/m ³)	2,4x10 ⁻⁴ cm/s 16,18 kN/m ³	1x10 ⁻⁸ cm/s 18 kN/m ³
Kestabilan Lereng	Kohesi (kPa)	3,88 kPa	30 kPa
	Sudut Geser Dalam (°)	13,92°	44°

392,79 mm/bulan, sedangkan intensitas curah hujan terendah berada pada Agustus 2023 yaitu sebesar 0,03 mm/bulan.

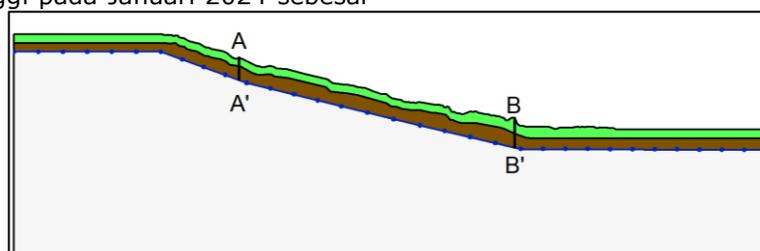
Durasi hujan terpanjang diketahui sebesar 22 jam dan terjadi pada April 2024. Durasi hujan terpendek pada Agustus 2023 dengan durasi 1 jam. Sedangkan untuk durasi hujan rata-rata yaitu sebesar 12 jam. Hal ini menunjukkan puncak dari musim penghujan pada daerah penelitian berada pada bulan April 2024 sedangkan musim kemarau berpuncak pada bulan Agustus 2023.

Dari analisis terhadap data curah hujan, didapatkan nilai intensitas maksimum sebesar 60 mm/jam, intensitas rata-rata sebesar 1,8 mm/jam, dan intensitas dominan sebesar 10 mm/jam. Ketiga informasi tersebut kemudian akan dijadikan input nilai *unit flux* dalam analisis rembesan guna melihat perubahan *matric suction* terhadap waktu. Durasi hujan dalam penelitian ini ditetapkan selama 30 hari.

Kondisi Awal Tekanan Air Pori Untuk melihat distribusi tekanan air pori, dua garis peninjauan ditetapkan pada *unsaturated zone* (Gambar 8). Garis peninjauan A-A' merepresentasikan perubahan *matric suction* (tekanan air pori negative) pada bagian puncak lereng sedangkan garis peninjauan B-B' akan merepresentasikan bagian kaki lereng.

Analisis Hujan Daerah Penelitian

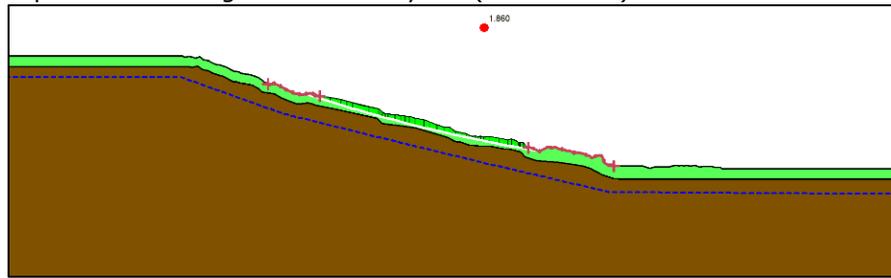
Berdasarkan pengamatan yang dilakukan pada data curah hujan, daerah penelitian memiliki curah hujan dengan intensitas bulanan tertinggi pada Januari 2024 sebesar



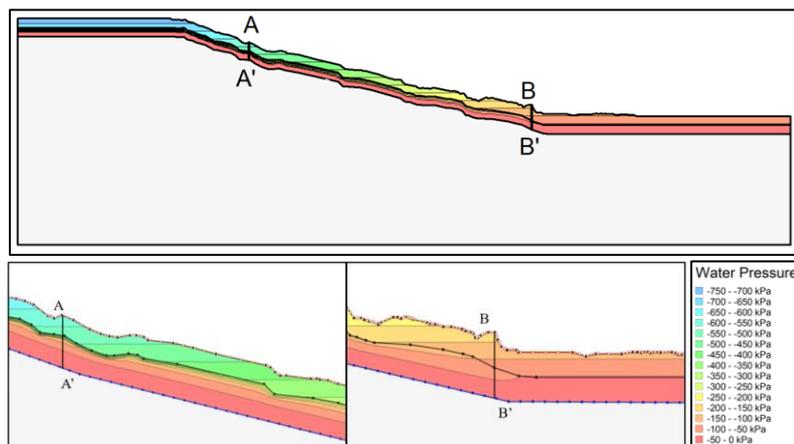
Gambar 8 Letak Garis Peninjauan

Pada kondisi lereng tanpa hujan (*steady state*), tekanan air pori akan bernilai positif pada *saturation zone* (zona di bawah Muka Air Tanah). Sedangkan, pada *unsaturated zone*, tekanan air pori bernilai negatif dan nilainya

semakin kecil mendekati permukaan. Pada keadaan awal, FK awal (tanpa hujan) sebesar 1,86 (Gambar 9) dengan nilai *matric suction* berada dikisaran 0 sampai dengan -750 kPa (Gambar 10).



Gambar 9 Nilai Faktor Keamanan (FK) Pada Steady State



Gambar 10 Kondisi Tekanan Air Pori Negatif (*Matric Suction*) Sepanjang Garis Peninjauan A-A' dan B-B' Kondisi Steady State

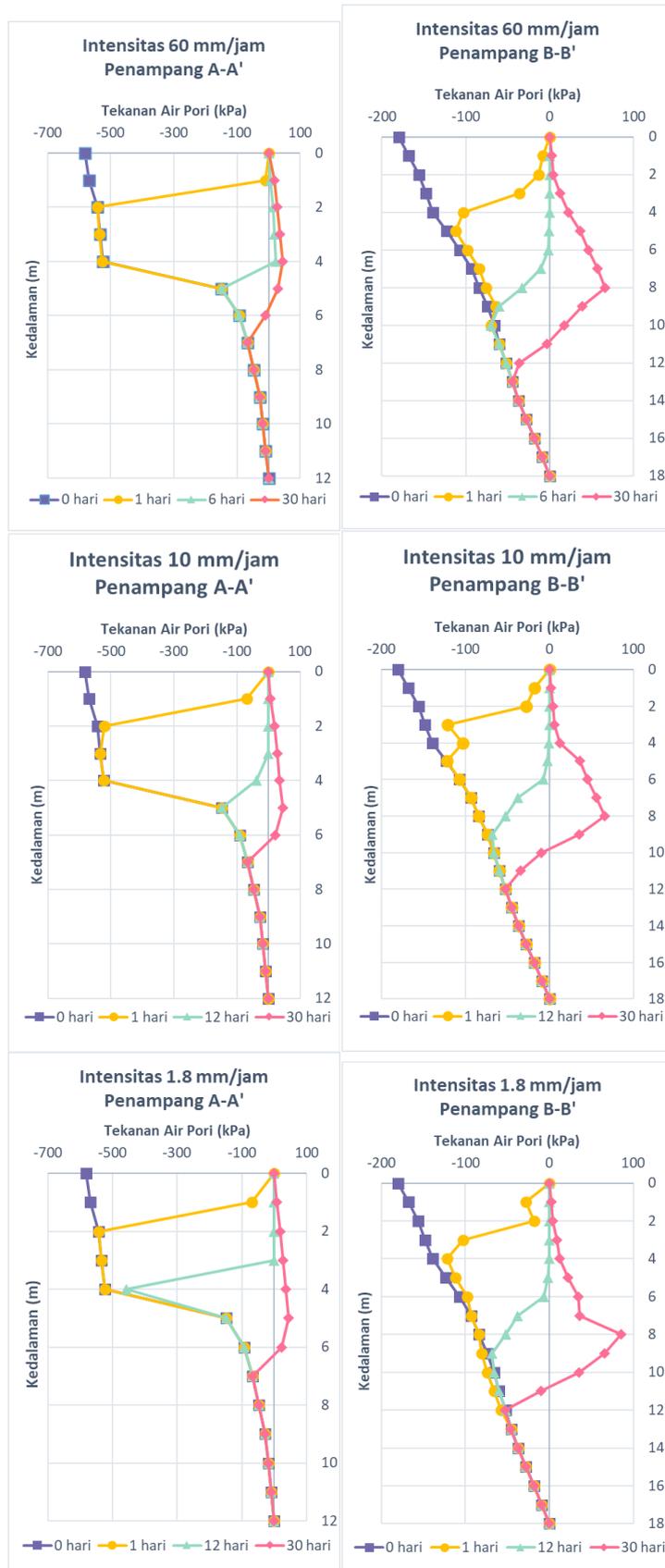
Nilai tersebut mengindikasikan bahwa lereng belum mengalami kejenuhan khususnya pada bagian permukaan lereng, dibuktikan dengan nilai *suction* yang sangat tinggi.

Pada zona Muka Air Tanah (MAT), tekanan air pori akan bernilai 0. Dengan nilai 0 tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai tekanan air sama dengan nilai tekanan udara sehingga pori terisi sebagian oleh air dan sebagian oleh udara. Sehingga dapat disimpulkan bahwa zona MAT merupakan peralihan dari zona *saturated* menjadi zona *unsaturated*.

Perubahan *Matric Suction* Pada Lereng Gambar 11 menunjukkan *trend* perubahan *matric suction* akibat intensitas hujan 60 mm/jam, 10 mm/jam, dan 1,8 mm/jam selama 30 hari. Perubahan nilai *suction* terbesar terletak pada bagian kaki lereng, dengan perubahan terbesar pada nilai *matric suction* yaitu di hari ke-30 yang mencapai nilai 66 kPa apabila dibandingkan dengan puncak lereng yang mencapai 45 kPa. Hal ini mungkin disebabkan akibat jenuhnya bagian puncak lereng sehingga limpasan air hujan yang semula vertikal menjadi horizontal menyebabkan akumulasi air pada kaki lereng. Dari gambar tersebut dapat dilihat laju penurunan nilai *matric suction* tercepat ketika

dikenakan hujan adalah intensitas 60 mm/jam. Dibuktikan dengan perubahan *matric suction* dari nilai -569 kPa menjadi -11 kPa pada kedalaman satu meter setelah 1 hari dikenakan hujan. Sedangkan, intensitas 10 mm/jam dan 1,8 mm/jam menurunkan *matric suction* ke nilai yang lebih kecil yaitu -69 kPa. Hal ini menunjukkan adanya hubungan besaran intensitas hujan dan laju penurunan *matric suction* yang berbanding lurus. Semakin besar intensitas hujan maka semakin cepat pula laju penurunan *matric suction*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa lereng mengalami penurunan FK sesaat setelah terkena hujan (Gambar 11). Penurunan tersebut memiliki nilai berbeda bergantung pada nilai intensitas hujan. Intensitas hujan 60 mm/jam dapat menurunkan nilai FK dari 1,860 menjadi 1,452, intensitas 10 mm/jam dapat menurunkan menjadi 1,633, sedangkan intensitas 1,8 mm/jam dapat menurunkan menjadi 1,773. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar intensitas hujan maka semakin besar pula penurunannya.



Gambar 11 Grafik Distribusi Tekanan Air Pori Terhadap Kedalaman Pada Penampang A-A' (Puncak Lereng) dan B-B' (Kaki Lereng) di Lereng Penelitian

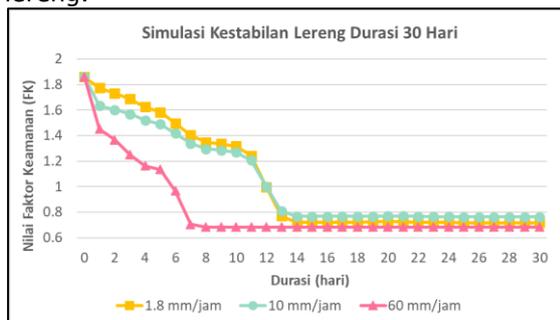
Pada intensitas maksimum (60 mm/jam), lereng mengalami kondisi labil berdasarkan klasifikasi Bowles (1989) (Tabel 2) pada hari ke-6 dengan nilai FK sebesar 0,966. Pada hari ke-6, terdapat perubahan tekanan air pori dari nilai negatif menjadi positif pada bidang longsoran dari kondisi awal sebesar -524 Kpa menjadi 22 Kpa. Hal ini menunjukkan bahwa hilangnya *matric suction* dapat menurunkan kekuatan geser yang dapat menyebabkan keruntuhan lereng.

Tabel 2 Hubungan Nilai Faktor Keamanan Lereng dan Intensitas Longsor (Bowles, 1989 dalam Zakaria, 2009)

Nilai Faktor Keamanan	Kejadian Longsor
$FK \leq 1,07$	Lereng Labil (Longsor terjadi)
$1,07 \geq FK \geq 1,25$	Lereng Kritis (Longsor pernah terjadi)
$FK \geq 1,25$	Lereng Relatif Stabil (Longsor jarang terjadi)

Setelah itu lereng terus mengalami penurunan FK hingga mencapai nilai 0,684 hingga hari ke-9 dan setelah itu terjadi *trend* nilai FK stagnan hingga hari ke-30. Dari hasil analisis rembesan didapati tekanan air pori bernilai positif pada bidang longsoran, ini menunjukkan bahwa lereng telah mengalami kejenuhan setelah hari ke-9 yang menyebabkan *trend* nilai FK stagnan

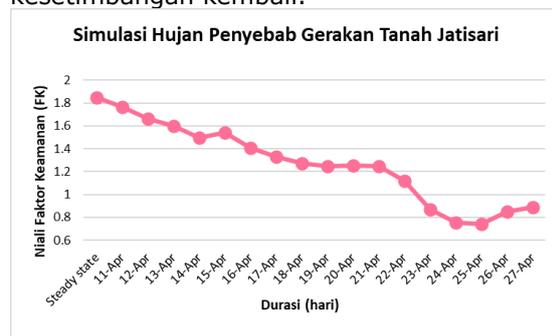
Pada curah hujan dominan (10 mm/jam) dan curah hujan rata-rata (1,8 mm/jam), lereng mencapai kondisi kritis pada hari ke-12 dengan nilai FK yang relatif tidak jauh berbeda yaitu, 0,717 dan 0,763. Hal ini sebanding dengan perubahan tekanan air pori yang relatif sama antara kedua intensitas tersebut dengan penurunan terbesar dari kondisi awal senilai -543 kPa menjadi 0,5 kPa setelah dikenakan hujan selama 12 hari. Setelah hari ke-12 lereng mengalami *trend* FK stagnan dimana hal tersebut diakibatkan oleh penjumlahan lereng.



Gambar 12 Grafik Nilai FK Hasil Simulasi Kestabilan Lereng Dalam Pengaruh Variasi Intensitas Hujan

Hujan Penyebab Longsor Jatisari
 Dari hasil simulasi kestabilan lereng, diketahui bahwa gerakan tanah yang terjadi di daerah Jatisari cenderung disebabkan oleh hujan selama 15 hari dengan total hujan 210,382 mm. Setelah dikenakan hujan dengan durasi 15 hari, terjadi penurunan nilai FK hingga mencapai nilai 0,744. Berdasarkan klasifikasi Bowles (1989) (Tabel 2), FK tersebut bernilai kurang dari 1,07 maka lereng ini masuk dalam kategori lereng labil.

Hujan dengan durasi 15 hari tersebut terjadi mulai dari tanggal 11 April sampai dengan 25 April 2024, tanggal tersebut bertepatan dengan peristiwa gerakan tanah di lokasi penelitian. Setelah terjadi peristiwa gerakan tanah, pada tanggal 26 dan 27 April 2024 terjadi kenaikan nilai FK. Diasumsikan kenaikan nilai FK tersebut merupakan proses lereng untuk mencapai kesetimbangan kembali.



Gambar 13 Grafik Nilai FK Hasil Simulasi Kestabilan Lereng Daerah Jatisari

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil observasi lapangan didapati bahwa lereng di daerah penelitian tersusun atas dua lapisan, yaitu lapisan tanah lanau plastisitas tinggi (MH) dan lapisan batuan breksi vulkanik. Perbedaan jenis material tersebut menyebabkan terbentuknya bidang gelincir diantara keduanya yang dapat mengakibatkan gerakan tanah. Gerakan tanah tersebut dapat berkembang menjadi longsor dengan tipe translasi.

Dengan intensitas hujan yang berbeda yang dikenakan pada lereng, dapat disimpulkan bahwa semakin besar intensitas, maka semakin cepat suatu lereng mengalami perubahan tekanan air pori dari yang bernilai negatif ke nilai positif. Semakin kecil intensitas, maka semakin lambat suatu lereng mengalami perubahan tekanan air pori dari negatif menjadi positif. Mekanisme yang disebabkan oleh hilangnya tekanan air pori negatif akibat naiknya muka air tanah tidak terjadi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa hilangnya tekanan air pori negatif lebih

berpengaruh dalam menurunkan kestabilan pada lereng yang diakibatkan oleh hujan.

Dari hasil simulasi diketahui hujan yang terjadi selama 12 hari dan intensitas dalam rentang 1,8 mm/jam hingga 10 mm/jam atau hujan 6 hari dengan intensitas 60 mm/jam dapat menyebabkan keruntuhan lereng.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan Terimakasih kepada pihak PVMBG yang telah membantu memfasilitasi pengambilan data di daerah penelitian.

Selain itu, penulis juga ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak Laboratorium Geologi Teknik Universitas Padjadjaran yang telah memberikan izin untuk pelaksanaan uji laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper Colorado State University.
- Cheng, Q., Chen, Xi, Chen, Xunhong, Zhang, Z., Ling, M., 2010. Water infiltration underneath single-ring permeameters and hydraulic conductivity determination. *J Hydrol (Amst)* 398, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.017>
- Filho, Fernandes, 2019. Landslide analysis of unsaturated soil slopes based on rainfall and matric suction data. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 4167-4185. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1392-5>
- Fredlund, D.G., 2002. Use of the soil-water characteristic curve in the implementation of unsaturated soil mechanics, in: Third International Conference on Unsaturated Soils. Brazil, pp. 10-13.
- Fredlund, D.G., 2006. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING* 132, 286-321. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:3286>
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S., 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotech Journal* 31, 533-546.
- Fu, X., Shao, M., Lu, D., Wang, H., 2011. Soil water characteristic curve measurement without bulk density changes and its implications in the estimation of soil hydraulic properties. *Geoderma* 167-168, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.012>
- Geo-Slope, 2017. SEEP/W Tutorial-Getting Started [WWW Document]. URL www.geo-slope.com
- Hidayat, R., 2020. Analisis Numerik Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng Di Pangkalan, Sumatera Barat. *JURNAL TEKNIK HIDRAULIK* 11, 25-36. <https://doi.org/10.32679/jth.v11i1.630>
- Hou, X., Vanapalli, S.K., Li, T., 2020. Water flow in unsaturated soils subjected to multiple infiltration events. *Canadian Geotechnical Journal* 57, 366-376. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0566>
- Mahdia, F., Noviyanto, F., 2013. Pemanfaatan Google Maps Api untuk Pembangunan Sistem Informasi Manajemen Bantuan Logistik Pasca Bencana Alam Berbasis Mobile Web (Studi Kasus : Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kota Yogyakarta). *Jurnal Sarjana Teknik Informatika* 1, 162-171.
- Mawlood, D.K., Adnan, K., 2020. Comparison of the water movement by Richard and Darcy. *Journal of Pure and Applied Sciences* 32, 1-6. <https://doi.org/10.21271/zjpas>
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res* 12, 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Nimmo, J.R., 2005. Unsaturated Zone Flow Processes, in: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa161>
- Pangemanan, V.G.M., Turangan, A.E., Sompie, O.B.A., 2014. Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Fellenius (Studi Kasus: Kawasan Citraland). *Jurnal Sipil Statik* 2, 37-46.
- Putra, H., 2014. Pengaruh Infiltrasi terhadap Perubahan Parameter Tanah Jenuh Sebagian dalam Analisis Stabilitas Lereng. Yogyakarta.

- Rosyida, A., Nurmasari, R., Suprpto, 2019. Analisis Perbandingan Dampak Kejadian Bencana Hidrometeorologi Dan Geologi Di Indonesia Dilihat Dari Jumlah Korban Dan Kerusakan (Studi: Data Kejadian Bencana Indonesia 2018). *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana* 10, 12-21.
- Sattler, K., Elwood, D., Hendry, M.T., Huntley, D., Holmes, J., Wilkinson, P.B., Chambers, J., Donohue, S., Meldrum, P.I., Macciotta, R., Bobrowsky, P.T., 2021. Quantifying the contribution of matric suction on changes in stability and displacement rate of a translational landslide in glaciolacustrine clay. *Landslides* 18, 1675-1689.
<https://doi.org/10.1007/s10346-020-01611-3>
- Sinarta, N.I., 2016. Tegangan Pori Negatif Sebagai Paramater Stabilitas Lereng Tanah Tak Jenuh (Soil Mechanics On Unsaturated Soil). *Paduraksa* 5, 31-42.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*, 2nd edition. John Wiley, New York.
- van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Yunusa, G.H., 2012. Influence of evaporation on transient suction distribution in unsaturated soil. *International Journal of the Physical Sciences* 7.
<https://doi.org/10.5897/ijps11.1651>
- Zakaria, Z., 2009. Analisis Kestabilan Lereng Tanah. Jatinangor
- Zhan, T.L.T., Ng, C.W.W., 2004. Analytical Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism in Unsaturated Soils. *International Journal of Geomechanics* 4, 273-284.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2004\)4:4\(273\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2004)4:4(273))