

## Analisis Perubahan Faktor Keamanan Lereng Akibat Hujan (Analysis of Changes Safety Factor of Slope Due to Rainfall)

Achmad Hafidz<sup>1\*</sup>, Muhammad Fauzan<sup>1</sup>, Heriansyah Putra<sup>1\*</sup>, dan Annisa Daniswara Santoso<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Jl. Raya Dramaga, Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat Indonesia

<sup>2</sup>Departemen Geografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia. Jl. Margonda Raya, Kampus UI Depok, Depok, Jawa Barat Indonesia

\* Penulis korespondensi: achmadhafidz27@gmail.com (AH); heriansyahptr@apps.ipb.ac.id (HP)

Diterima: 02 Juli 2019

Disetujui: 08 Agustus 2019

### ABSTRACT

*Infiltration causes a decrease in soil shear strength parameters. Decrease in soil shear strength parameters can cause landslides. Landslides often occur in Bogor Regency, one of the landslide locations is Puncak, Bogor. Landslides in Puncak, Bogor on 05 February 2018 at 09.20 WIB must have a safety factor 1.07. Changes in safety factors due to rainfall are observed from 03 February 2018 at 05.00 WIB until 05 February 2018 at 09.20 WIB. This research includes testing soil samples, pore water pressure analysis and slope stability analysis. The software used for this analysis is GeoStudio. The analysis results are the changes in safety factor due to rainfall. The safety factor on 03 February 2018 at 05.00 WIB is 1.602. Safety factor until 05 February 2018 at 03.40 WIB are still above 1.25. So, the slopes are still safe. The decline in safety factor continued until 1.070 due to a decrease in cohesion on 05 February 2018 at 09.20 WIB with cohesion on SW-SM soil and SM soil at 4.01 kPa and 9.18 kPa. So, the duration needed to change a safe slope to landslide is only 5 hours 40 minutes. This can occur because of the intensity of the rain on 05 February 2018 at 07.00 WIB and 08.00 WIB are 34.1 mm/hour and 34.9 mm/hour.*

*Key words: cohesion, landslides, rainfall, safety factor*

### PENDAHULUAN

Air hujan yang membasahi permukaan tanah akan mengalami infiltrasi ke bawah permukaan tanah. Infiltrasi air hujan ini disebabkan oleh adanya tarikan gaya gravitasi (Hutabarat *et al.* 2015). Infiltrasi air hujan ini menyebabkan penurunan parameter kuat geser tanah (Hasrullah 2012). Kuat geser tanah terdiri dari dua parameter tanah yaitu kohesi ( $c$ ) atau gaya tarik-menarik antar partikel dan sudut gesek dalam ( $\varphi$ ) atau gesekan antara butir tanah (Nugroho *et al.* 2012). Penurunan nilai kohesi tanah ini disebabkan oleh penurunan jarak antar butiran partikel tanah akibat peningkatan jumlah air yang mengisi rongga pori tanah. Peningkatan jumlah air yang ada dalam pori tanah menyebabkan derajat kejenuhan menjadi meningkat, sehingga tegangan air pori

yang berlebih akan terbentuk (Hasrullah 2012).

Penurunan parameter kuat geser tanah ini dapat menyebabkan tanah longsor (Nurdian *et al.* 2015). Menurut Suryolelono (2002) dalam Apriyono (2009), tanah longsor merupakan fenomena alam yang berupa gerakan massa tanah dalam mencari keseimbangan baru akibat adanya gangguan dari luar. Tanah longsor merupakan salah satu bencana yang cukup sering terjadi di Kabupaten Bogor. Longsor yang terjadi di Kabupaten Bogor mencapai 102 kejadian dari bulan Januari hingga Juni 2018 (BPBD 2018). Salah satu lokasi di Kabupaten Bogor yang mengalami longsor adalah Puncak, Bogor. Pada tanggal 05 Februari 2018, longsor terjadi di 4 lokasi di Puncak, Bogor.

Longsor yang terjadi pada 05 Februari 2018 pukul 09.20 WIB di Puncak, Bogor disebabkan oleh faktor keamanan lereng yang telah lebih kecil dari 1.07. Hal tersebut

dapat terjadi karena faktor keamanan lereng yang kurang dari 1.07 pasti akan mengalami longsor (Bowles 1979). Faktor keamanan ini memiliki hubungan dengan nilai kohesi. Menurut Rouaiguai *et al.* (2018), faktor keamanan ini dipengaruhi oleh nilai kohesi, karena peningkatan nilai kohesi secara linier akan meningkatkan faktor keamanan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan faktor keamanan lereng akibat hujan hingga lereng di Puncak, Bogor menjadi longsor.

## METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Puncak, Bogor, Jawa Barat. Alat yang digunakan adalah *software* GeoStudio 2012. GeoStudio adalah *software* yang menggunakan analisis numerik yang dikembangkan oleh *GeoSlope International* untuk *geo-engineers* dan *earth-science*. GeoStudio ini terdiri dari beberapa aplikasi seperti *TEMP/W*, *SEEP/W*, *CTRAN/W*, *AIR/W*, *SIGMA/W*, *QUAKE/W* dan *SLOPE/W* (GeoSlope 2017). Dua aplikasi digunakan pada penelitian ini yaitu *SEEP/W* dan *SLOPE/W*. Aplikasi *SEEP/W* digunakan untuk menganalisis perubahan tekanan air pori pada lereng (Putra *et al.*, 2017; Subiyanti *et al.* 2011). Sedangkan, *SLOPE/W* dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng tanah maupun batu (Putra *et al.*, 2016; Atikah *et al.* 2017).

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan, mulai dari studi lapangan, analisis data tanah, analisis tegangan air pori, dan analisis stabilitas lereng. Studi lapangan yang dilakukan berupa survei dan observasi lapang untuk memperoleh data primer dan data sekunder yang akan digunakan pada tahap analisis. Data primer yang digunakan berupa data propertis dan kuat geser tanah serta geometri lereng

sebelum dan sesudah terjadinya longsor. Sementara itu, data sekunder berupa data curah hujan jam-jaman tahun 2018 wilayah Puncak Bogor yang diperoleh dari stasiun meteorologi Citeko.

Sampel tanah yang digunakan untuk pengujian laboratorium pada penelitian ini diambil di dua titik pada lokasi longsor di Puncak, Bogor. Kedua titik sampel ini mewakili lapisan tanah yang ada di lokasi longsor. Selanjutnya, sampel tanah diuji di laboratorium dengan alat uji geser langsung untuk memperoleh parameter kuat geser tanah berupa nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) pada saat jenuh, pengujian kadar air lapangan, kepadatan lapangan dan permeabilitas saat tanah jenuh, analisis saringan, penentuan *batas Atterberg* dan *specific gravity*. Sedangkan, pengukuran geometri sebelum dan sesudah longsor menggunakan *electronic total station (ETS)*. Geometri lereng sebelum longsor diperoleh dari pengukuran lereng disebelah lokasi longsor. Sedangkan, geometri lereng setelah longsor diukur pada lokasi longsor. Pengukuran geometri lereng ini meliputi kemiringan dan ketinggian lereng serta bentuk longsor. Selanjutnya, pemodelan lereng dibuat menggunakan data properties tanah, geometri sebelum longsor dan geometri setelah longsor.

Analisis tegangan air pori dilakukan menggunakan aplikasi *SEEP/W*. Analisis *transient* digunakan pada model lereng yang telah dibuat. Kemudian, analisis *transient* ini dilakukan dari beberapa hari sebelum terjadinya longsor. Analisis ini tegangan air pori menghasilkan kontur tegangan air pori yang disebabkan oleh pengaruh hujan. Selanjutnya, nilai tegangan air pori negatif (*suction*) dapat diperoleh. Nilai *suction* ini akan dimasukkan kedalam grafik hubungan derajat kejenuhan dengan *suction*, sehingga nilai derajat kejenuhan diperoleh. Kemudian, derajat kejenuhan ini akan dimasukkan kedalam grafik hubungan parameter Bishop *stress* ( $\chi$ ) dengan derajat kejenuhan. Sehingga, nilai kohesi, sudut

gesek internal akibat peningkatan *suction* ( $\phi^b$ ), dan kepadatan tidak jenuh ditentukan berdasarkan nilai *suction* dan parameter kuat geser tanah saat jenuh. Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan aplikasi *SLOPE/W*. Pemodelan yang telah dibuat dan hasil analisis tegangan air pori digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Properties Tanah**

Pengambilan sampel tanah dilakukan pada dua lapisan tanah pada lokasi longsor. Sampel tanah ini akan menghasilkan beberapa properties tanah seperti kadar air, berat jenis tanah, kepadatan, porositas, angka pori, permeabilitas, *Atterberg limit*, analisis saringan dan klasifikasi jenis tanah. Hasil pengujian properties tanah dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan sistem klasifikasi *unified soil classification*

*system* (USCS), tanah lapisan permukaan ini termasuk jenis tanah bergradasi baik-pasir berlanau (SW-SM) dan lapisan dalam ini termasuk jenis tanah pasir berlanau (SM).

Kurva karakteristik air tanah dapat diperkirakan dengan metode *modified Kovacs* yang tersedia pada *SEEP/W*. Metode ini dikembangkan oleh Aubertin *et al.* (2013). Metode ini digunakan karena dapat memperkirakan kurva karakteristik air tanah menggunakan properties tanah yang umum (Aubertin *et al.* 2013). Oleh karena itu, properties tanah yang digunakan untuk memperkirakan kurva karakteristik air tanah meliputi kadar air saat jenuh,  $D_{10}$ ,  $D_{60}$ , dan batas cair. Kurva karakteristik air tanah untuk tanah SW-SM dan tanah SM dapat dilihat pada Gambar 1. Sedangkan, *hydraulic conductivity function* diperkirakan dengan menggunakan model Van Genuchten yang tersedia pada *SEEP/W*. *Hydraulic conductivity function* untuk tanah SW-SM dan tanah SM dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1 Data propertis tanah

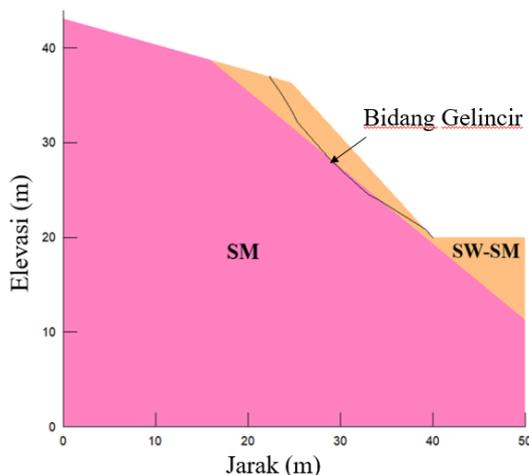
No	Parameter Tanah	Satuan	Pasir bergradasi baik-Pasir Berlanau (SW-SM)	Pasir Berlempung (SM)
1	Berat jenis partikel, Gs	-	2.593	2.508
2	Kadar air lapang, w	%	62.50	52.00
3	Derajat kejenuhan lapang, Sr	%	86.20	92.70
4	Porositas, n	-	0.70	0.63
5	Angka pori, e	-	2.33	1.70
6	Kohesi saat jenuh, c	kN/m <sup>2</sup>	0.09	0.42
7	Sudut gesek internal saat jenuh	°	6.30	9.94
8	Permeabilitas, k	cm/det	0.3500	0.0036
9	Batas cair, LL	%	56.70	66.60
10	Batas plastis, PL	%	32.30	34.20
11	$D_{60}$	mm	1.20	0.70
12	$D_{10}$	mm	0.074	0.063
13	Residual water content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.198	0.257
16	Kepadatan basah, $\gamma_b$	kN/m <sup>2</sup>	13.82	14.82



mm/jam kecuali pada jam 06.00 WIB, yaitu sebesar 0.6 mm/jam. Pada hari tersebut ini, intensitas hujan terbesar terjadi pada pukul 08.00 WIB sebesar 34.9 mm/jam.

**Pemodelan Geometri Lereng**

Model geometri lereng dapat dilihat pada Gambar 4. Model ini memiliki panjang dan tinggi sebesar 50.00 m dan 43.11 m. Model geometri ini telah disederhanakan dari model yang telah diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan alat total station. Penyederhanaan model bertujuan untuk menghasilkan solusi yang dapat dipahami. Selain itu, model geometri yang rumit tidak selalu menghasilkan solusi yang benar dan akurat (GeoSlope 2012). Kemiringan lereng bagian pertama sebesar 47°. Kemiringan ini terjadi sepanjang 22.37 m dengan ketinggian 16.35 m. Kemudian, kemiringan lereng berubah menjadi 15°.



Gambar 4 Model geometri lereng

Longsor yang terjadi ini memiliki kedalaman hingga 3.73 m dari permukaan lereng. Berdasarkan Gambar 4, longsor ini terjadi pada tanah yang didominasi oleh pasir berlanau bergradasi baik (SW-SM). Total luas longsor yang terjadi sebesar 40.97 m<sup>2</sup>. Bidang gelincir longsor dimodelkan pada menggunakan fitur *fully specified slip surface* berdasarkan bidang gelincir yang terjadi di lapangan.

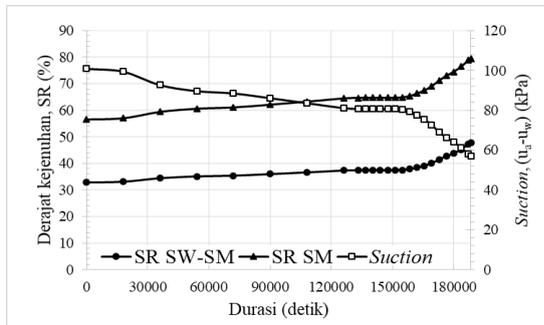
**Analisis Tegangan air pori**

Analisis *transient* dilakukan untuk memperoleh kontur tegangan air pori pada saat intensitas hujan telah dimasukkan kedalam aplikasi *SEEP/W*. Tegangan air pori pada bidang longsor akan digunakan untuk menentukan nilai kohesi untuk tanah SW-SM dan SM. Lokasi bidang longsor yang dipilih karena lokasi ini memiliki bidang *interface* antara dua jenis tanah yang berbeda. Sehingga, tanah yang berbeda jenis ini memiliki nilai  $R_{interface}$  pada bagian kedua lapisan tanah. Menurut Rifa'i (2009), propertis pada *interface* berhubungan dengan propertis pada lapisan tanah. Hubungan ini dinyatakan dengan  $R_{interface}$ . Nilai ini merupakan faktor reduksi kekuatan. Selain itu, air yang menembus sampai ke bidang longsor akan membuat tanah menjadi licin dan tanah yang berada di atasnya akan bergerak mengikuti sepanjang badan lereng (Atikah *et al.* 2017). Oleh karena itu, tegangan air pori yang terbentuk pada bidang longsor ini akan digunakan untuk memperoleh parameter kuat geser tanah.

Tegangan air pori pada bidang longsor akan dihasilkan dari analisis *transient*. *Suction* merupakan selisih antara tekanan udara pori ( $u_a$ ) dengan tekanan air pori ( $u_w$ ) (Sinarta 2016). Tegangan udara pori diasumsikan memiliki nilai sama dengan nol (Uchaipichat 2012). Hasil analisis tegangan air pori menghasilkan grafik hubungan antara durasi hujan dan perubahan derajat kejenuhan dan *suction*, seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Hasil ini menunjukkan bahwa derajat kejenuhan mengalami peningkatan pada tanah SW-SM dari 32.87% menjadi 47.86%. Sedangkan, peningkatan pada tanah SM dari 56.56% menjadi 79.56%. Peningkatan derajat kejenuhan yang cukup besar ini terjadi karena intensitas hujan dari tanggal 03 Februari 2018 hingga 05 Februari 2018 pukul 09.20 WIB memiliki intensitas hujan lebih dari 60 mm/hari.

Peningkatan derajat kejenuhan pada kedua jenis tanah ini sebanding dengan

penurunan *suction*. Penurunan *suction* yang terjadi dari 100.43 kPa menjadi 57.00 kPa. Hal tersebut dapat terjadi karena *suction* pada rentang ini ingin memasuki zona transisi pada kurva karakteristik tanah.



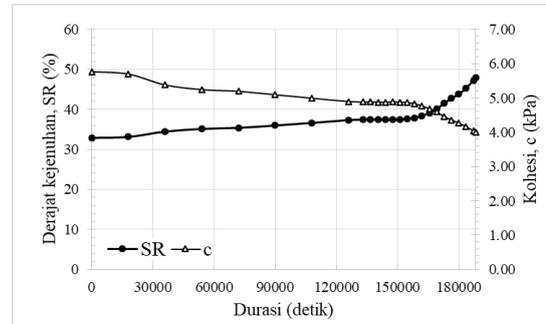
Gambar 5 Grafik hubungan durasi hujan, derajat kejenuhan dan *suction*

Perubahan nilai *suction* akibat hujan selanjutnya dihubungkan dengan nilai kohesi tanah, seperti ditunjukkan oleh Gambar 6 dan 7. Penurunan kohesi yang terjadi mengikuti peningkatan derajat kejenuhan. Hal ini terjadi karena penentuan nilai kohesi ini dipengaruhi oleh *suction* dan sudut gesek internal akibat peningkatan *suction* ( $\phi^b$ ).

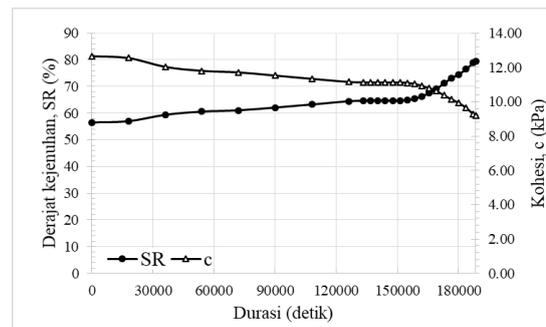
Perubahan *suction* ini memiliki hubungan dengan perubahan derajat kejenuhan. Sementara itu, sudut gesek internal akibat peningkatan *suction* ( $\phi^b$ ) dipengaruhi oleh perubahan derajat kejenuhan. Semakin besar derajat kejenuhan, maka semakin besar parameter Bishop *stress* akibatnya sudut gesek internal akibat peningkatan *suction* ( $\phi^b$ ) semakin besar. Seharusnya, peningkatan derajat kejenuhan ini menyebabkan kenaikan nilai kohesi tanah, karena sudut gesek internal akibat peningkatan *suction* ( $\phi^b$ ) semakin besar. Hal tersebut tidak terjadi karena penurunan kontribusi *suction* terhadap kuat geser tanah disebabkan oleh kadar air tanah yang mendekati kadar air residual (Murray dan Sivakumar 2010).

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7, penurunan kohesi untuk kedua jenis tanah memiliki pola yang sama. Kohesi pada tanggal 03 Februari 2018 pukul 05.00

WIB hingga tanggal 05 Februari 2018 pukul 09.20 WIB mengalami penurunan pada tanah SW-SM sebesar 1.69 kPa dari 5.76 kPa menjadi 4.01 kPa. Sedangkan, penurunan nilai kohesi sebesar 3.48 kPa pada tanah SM dari 12.66 kPa menjadi 9.18 kPa.



Gambar 6 Grafik hubungan durasi hujan, derajat kejenuhan dan kohesi SW-SM

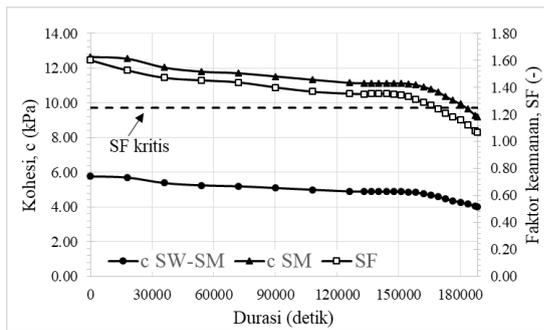


Gambar 7 Grafik hubungan durasi hujan, derajat kejenuhan dan kohesi SM

### Analisis stabilitas lereng

Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk mengetahui pengaruh hujan dan perubahan parameter tanah terhadap faktor keamanan lereng (SF). Dari hasil analisis menggunakan aplikasi SLOPE/W diperoleh nilai faktor keamanan awal terjadinya hujan (03 Februari 2018 pukul 05.00 WIB) sebesar 1.602. Selanjutnya nilai ini mengalami penurunan hingga kondisi kritis yaitu SF 1.25 pada tanggal 05 Februari 2018 pukul 03.40 WIB. Kondisi ini termasuk kedalam kategori kritis, karena faktor keamanan sebesar 1.25 (Bowles 1979). Akan tetapi, hujan terus terjadi sehingga nilai faktor keamanan terus mengalami penurunan hingga menjadi

1.070 pada pukul 09.20 WIB. Hal ini bisa terjadi karena faktor keamanan dapat meningkat secara linier dengan peningkatan nilai kohesi (Rouaiguai *et al.* 2008). Sehingga, penurunan kohesi ini menyebabkan penurunan faktor keamanan. Faktor keamanan lereng sebesar 1.07 memiliki kemungkinan longsor (Bowles 1979).



Gambar 8 Grafik hubungan durasi, kohesi dan faktor keamanan

Perubahan nilai faktor aman dari 1.602 menjadi 1.25 membutuhkan durasi hujan yang relatif panjang, yaitu 46 jam 40 menit, sementara itu perubahan status lereng dari kondisi kritis menjadi longsor hanya membutuhkan waktu selama 5 jam 40 menit. Hal ini terjadi karena pada tanggal 05 Februari 2018 pukul 05.00 WIB hingga 09.20 WIB, intensitas hujan cukup besar terjadi pada pukul 07.00 WIB dan 08.00 WIB dengan intensitas hujan sebesar 34.1 mm/jam dan 34.9 mm/jam. Tipe hujan seperti ini efektif memicu longsor pada lereng yang tanahnya mudah menyerap air seperti tanah lempung pasir dan tanah pasir (Subiyanti *et al.* 2011).

### KESIMPULAN

Analisis perubahan faktor keamanan lereng akibat pengaruh intensitas dan durasi hujan telah dilakukan pada lokasi longsor di daerah Puncak Bogor. Analisis perubahan faktor keamanan dilakukan menggunakan data hujan sebelum kejadian longsor yaitu

pada tanggal 03 Februari 2018 sampai dengan 5 Februari 2018. Pada awal kejadian hujan, faktor keamanan lereng sebesar 1.602. Nilai ini mengalami penurunan menjadi 1.250 setelah penerapan hujan selama 46 jam 40 menit. Selanjutnya, faktor keamanan terus mengalami penurunan hingga mencapai kondisi tidak aman dengan SF 1.070 pada tanggal 05 Februari 2018 pukul 09.20 WIB.

Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa durasi yang dibutuhkan menurunkan status kewanaman lereng dari kondisi aman menjadi kondisi kritis lebih panjang dari pada waktu untuk kondisi kritis menjadi runtuh, yaitu 46 jam 40 menit berbanding 4 jam 40 menit. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi bahwa dalam analisis stabilitas lereng perlu mempertimbangkan hujan yang terjadi beberapa hari sebelum kejadian longsor, sehingga mekanisme terjadinya keruntuhan dan kondisi kritis lereng dapat diketahui sejak dini.

### DAFTAR PUSTAKA

Apriyono A., 2009. Analisis penyebab tanah longsor di Kalitlaga Banjarnegara. *Jurnal Dinamika* 5(1), pp. 1-5.

Atikah, D., P. T. Juwono, A. P. Hendrawan, 2017. Pengaruh hujan pada stabilitas lereng di jalan tol Gempol-Pandaan. *Jurnal Teknik Pengairan* 8(1), pp. 79-88.

Aurbertin, M., M. Mbonimpa, B. Bussierr, R. P. Chapuis, A physically-based model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal* 40(6), pp. 1-65.

Bowles, J. E., 1979, *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. Kosaido Printing, Tokyo.

[BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Bogor, 2018.

- Publikasi Kinerja Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Bogor Tahun 2018. BPBD, Bogor.
- GeoSlope International, 2012. Seepage Modelling with *SEEP/W*. GeoSlope International, Canada.
- GeoSlope International, 2017. Heat and Mass Transfer Modelling with GeoStudio 2018, GeoSlope International, Canada
- Hasrullah, 2012. Studi pengaruh infiltrasi terhadap stabilitas lereng. *Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik* 5(2), pp. 1-13.
- Hutabarat, A. H., Sumono, N. Ichwan, 2015. Kajian laju infiltrasi pada berbagai penggunaan lahan di kebun percobaan Kwala Bekala USU Desa Durin Tonggal Kecamatan Pancur Batu Kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Rekayasa dan Pertanian* 3(4), pp. 503-512.
- Murray, E. J., V. Sivakumar, 2010. *Unsaturated Soils A Fundamental Interpretation of Soil Behaviour*. Wiley-Blackwell, West Sussex
- Nugroho, S. A., A. I Putra, R. Ermin, 2012. Korelasi parameter kuat geser tanah hasil pengujian triaksial dan unconfined compression strength (UCS). *Jurnal Sains dan Teknologi* 11(1), pp. 1-10.
- Nurdian S, Setyanto, L. Afriani, 2015. Korelasi parameter kekuatan geser tanah dengan menggunakan uji triaksial dan uji geser langsung pada tanah lempung substitusi pasir. *Jurnal JRSDD* 3(1), pp. 13-26.
- Putra, H., Rifa'i, A., Sujono, J., Silarukmi, A., 2017. Analysis of unsaturated soil parameters as slope stability mitigation. *Jurnal Teknologi* 79(7-2), pp. 21-27
- Rifa'i, A., 2009. Perilaku interaksi tanah-geotekstil terhadap parameter kuat geser. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil* 9(1), pp. 92-100.
- Rouaiguia, A., M. A. Dahim, 2008. Numerical modelling of slope stability analysis. *Journal of Engineering and Innovative Technology (IJESIT)* 2(3), pp. 553-542
- Sinarta I. N., 2016. Tegangan pori negatif sebagai parameter stabilitas lereng tanah tak jenuh. *Jurnal PADURAKSA* 5(1), pp. 31-43.
- Subiyanti, H., A. Rifa'i, R. Jayadi, 2011. Analisis kelongsoran lereng akibat pengaruh tekanan air pori di saluran induk Kalibawang Kulonprogo. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik* 14(1), pp. 15-25.
- Uchaipichat, A., 2012. Infinite slope stability analysis for unsaturated granular soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 17(30), pp. 361-368