

NILAI DERAJAT KEJENUHAN TANAH PADA PENILAIAN ANCAMAN LONGSOR ROMBAKAN (DEBRIS FLOW) PADA BATUAN VULKANIK

I Nengah Sinarta¹, Putu Ika Wahyuni¹, Putu Aryastana^{1,2}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

Email: inengahsinarta@gmail.com

Email: ikawahyuni9971@gmail.com

² International Ph.D. Program in Environmental Science and Technology (University System of Taiwan),

National Central University, Taiwan

Email: aryastanaputu@gmail.com

ABSTRACT

Flow landslides are spatial movements that occur continuously due to the soil surface's direction usually, a short distance away, and the occurrence is not too long. The flow avalanche gradation depends on the intensity of rain, soil type, and vegetation. In contrast, the direction of mobility depends on the slope of the slope and surface soil type. Soil types that are quickly saturated due to high-intensity rain and briefly on the slopes cause the soil layer to be eroded under its weight soon into the valley. This was what makes it difficult for residents to avoid and evacuate. In this case, analysis and technical studies need to be carried out on the effect of the soil's degree of saturation, which causes the threat of landslide of the rubble. Observations were made with borehole, and geoelectric samples carried out in Abang Batu Dinding Village, Kintamani. The surface morphology is hilly, soil type at an average depth of 1-1.5 m sandy silt, and bedrock is volcanic breccia. The hydrological analysis was modeled based on the Thiessen polygon, where the average effective rainfall for 10-50 years is 238 mm/day. The negative pore water stress value increases from 35 kPa-72.44 kPa. There is still water in the soil pores that can keep the bonds of soil grains when the degree of low saturation is around 40%, and then it increases to 78.46%. In this study, the degree of saturation of 40% to 56% of the value of soil shear strength increased and then the shear strength of the soil decreased to 37.62° with a degree of saturation of 78.46%. Rapid changes in the soil surface with minimal vegetation will cause erosion on the soil surface, in spatial conditions with a soil thickness of 1-1.5 m will cause landslides or debris.

Keywords: Debris flow, volcanic breccia rock, sandy silt, degree of saturation, Suction.

ABSTRAK

Longsor aliran adalah gerakan spasial yang terjadi terus menerus akibat bergeraknya permukaan tanah biasanya berjarak dekat dan terjadinya tidak terlalu lama. Gradasi longsoran aliran tergantung pada intensitas hujan, jenis tanah dan vegetasi sedangkan arah mobilitas tergantung dari kemiringan lereng dan jenis tanah permukaannya. Jenis tanah yang mudah jenuh akibat hujan dengan intensitas tinggi dan singkat di lereng menyebabkan lapisan tanah tergerus akibat berat sendiri secara cepat menuju lembah, hal inilah yang menyulitkan bagi penduduk untuk menghindari dan mengungsi. Kasus tersebut perlu dilakukan analisis dan kajian teknis tentang pengaruh nilai derajat kejenuhan tanah yang menimbulkan ancaman longsor bahan rombakan. Pengamatan dilakukan dengan sampel *borehole* dan Geolistrik dilakukan Desa Abang Batu Dinding, Kintamani, morfologi permukaan adalah perbukitan, jenis tanah pada kedalaman rata-rata 1-1,5 m adalah lanau berpasir, dan batuan dasar berupa batuan breksi vulkanik. Analisa hidrologi dimodelkan berdasarkan poligon thiessen dimana curah hujan efektif rata-rata pada 10-50 tahun sebesar 238 mm/hari. Nilai tegangan air pori negatif bertambah dari 35 kPa-72,44 kPa dalam pori-pori tanah masih terdapat air yang dapat menjaga ikatan butiran tanah pada saat derajat kejenuhan rendah sekitar 40% dan selanjutnya naik sampai 78,46%. Pada penelitian ini pada derajat kejenuhan 40% sampai 56% nilai kuat geser tanah meningkat dan selanjutnya kuat geser tanah mengalami penurunan sampai 37,62° dengan derajat kejenuhan 78,46%. Perubahan yang cepat pada permukaan tanah yang minim vegetasi akan menimbulkan erosi dipermukaan tanah, pada kondisi spasial dengan ketebalan tanah 1-1,5 m akan menyebabkan longsor rombakan atau *debris*.

Kata kunci: Aliran bahan rombakan, Batuan briksi vulkanik, Lanau berpasir, Derajat kejenuhan, Hisap tanah

1. PENDAHULUAN

Aliran debris atau Banjir bandang merupakan bagian dari peristiwa alam yang sangat merusak dan mengancam kehidupan manusia. Aliran bahan rombakan atau debris flow didefinisikan sebagai gerakan masa yang mengandung butiran-butiran material padat, air dan udara yang bergerak sebagai sebuah aliran yang bersifat kental (*viscous flow*), (Cruden dan Vernes 1996). *Debris flow*, *debris avalanches* dan *earth flow* merupakan longsoran tipe aliran yang mempunyai kekuatan menghancurkan dan kecepatan alir sangat besar.

Pulau Bali khususnya di Bali tengah adalah daerah pegunungan dan dataran tinggi dan juga terdapat beberapa gunung berapi yang masih aktif. Daerah pegunungan purba Buyan- Beratan dan pegunungan purba Batur menjadi daerah yang rawan terjadi tanah longsor salah satu longsor yang sering terjadi adalah longsor bahan rombakan dengan material lumpur dan bebatuan berpasir (Sinarta dan Basoka, 2019). Kondisi geologi daerah pegunungan purba yang berupa perbukitan dengan jenis tanah lempung organik, lanau berpasir dengan komposisi batuan dasar berupa batuan breksi vulkanik (Sinarta dan Basoka, 2019). Pegunungan purba disekitar dinding kaldera batur bagian selatan dengan batuan penyusun berasal dari batuan gunung api Buyan-Bratan dan Batur (Qpbb) yang terdiri dari pasir batu sampai pasir kelanauan yang bersifat lepas dan *porous*. Kondisi tersebut tanah cenderung mudah lepas, sehingga dengan intensitas hujan sedang dengan frekuensi yang panjang akan menimbulkan gerakan tanah berupa banjir bandang (Sinarta, dkk 2019). Parameter batuan breksi vulkanik komposisi batuan yang tersusun atas endapan vulkanik muda produk Gunung Batur yang terdiri dari patahan dan kekar berpotensi untuk longsor, selain itu curah hujan yang tinggi juga dapat menyebabkan terjadinya tanah longsor rombakan (*debris flow*) (Sinarta, dkk 2020).

Daerah penelitian di Kecamatan Kintamani khususnya dikaldera Gunung Batur pada lereng Gunung Abang dengan Desa Abang Batu dinding, dimana peristiwa alam berupa aliran bahan rombakan atau aliran *debris* sering terjadi terutama pada Bulan Januari-Februari pada saat tanah mencapai jenuh, dengan kerugian harta dan benda bahkan kerusakan lingkungan (Sinarta dkk, 2016), (Tim tanggap darurat gerakan tanah 2017). Intensitas hujan rata-rata sebesar 125 mm/hari dengan durasi 5 jam berpengaruh terhadap besarnya infiltrasi yang menyebabkan keruntuhan lereng (Sinarta dkk., 2017). Semakin tinggi intensitas hujan dan semakin panjang durasi hujan, maka infiltrasi air semakin banyak masuk dalam lereng sehingga meningkatkan kadar kejenuhan dan tekanan air pori. Tekanan air pori yang pada awalnya bernilai negatif akan meningkat hingga bernilai nol kemudian naik sehingga bernilai positif (Sinarta dan Ariyana Basoka, 2019).

Analisis stabilitas lereng tidak hanya membutuhkan pemahaman terhadap intensitas hujan tetapi diperlukan pemahaman terhadap perilaku tanah dalam kondisi jenuh Sebagian (Sinarta, 2016). Akibat adanya infiltrasi tanah jenuh Sebagian menyebabkan perubahan derajat kejenuhan tanah, peningkatan derajat kejenuhan dalam rentang waktu tertentu akan menyebabkan terjadinya longsor rombakan. Kondisi tersebut dibutuhkan pemahaman terhadap sifat teknis tanah jenuh sebagian melalui pendekatan empiris berdasarkan karakteristik hujan sehingga, diketahui perubahan derajat kejenuhan tanah terhadap parameter kuat geser tanah (ϕ^o) dan tegangan air pori (u).

2. LANDASAN TEORI

Soil water characteristic curve (SWCC)

Analisis rembesan (*seepage*) membutuhkan data *SWCC* untuk menentukan perubahan jumlah air yang di dalam tanah untuk berbagai kondisi tanah sehingga satu parameter utama yang digunakan untuk pemodelan aliran air tanah (Fu et al. 2011). Untuk mendapatkan parameter tanah jenuh sebagian seperti *SWCC* dan *hydraulic conductivity function* perlu dilakukan *fitting* berdasarkan informasi dasar dari properties tanah dan distribusi ukuran butiran. *SWCC* adalah hubungan *matrix suction* dengan *gravimetric water content*, *volumetric water content* atau derajat kejenuhan. Kurva *SWCC* menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan suction tanah (L'Heureux, 2005), kurva ini menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air serta menggambarkan distribusi ukuran butir tanah yang berhubungan mengenai hidrolik, karakteristik mekanik dan perilaku tanah jenuh sebagian (Hung, Leroueil, dan Picarelli, 2014). Sifat tanah yang diperlihatkan berdasarkan *fitting SWCC* seperti; kuat geser tanah, tegangan air pori, derajat kejenuhan dan lain-lainnya.

Penggambaran kurva *SWCC* dapat dibantu oleh *SoilVision Database*, merupakan program yang diaplikasikan pada bidang geoteknik berisi sistem database tanah yang dapat digunakan untuk memperkirakan properties tanah jenuh maupun jenuh sebagian (*saturated or unsaturated soil properties*) dan perilaku tanah dalam model matematisnya. Representasi model matematis dari perilaku tanah disediakan dalam bentuk *fitting* persamaan matematis dari data tanah yang tersedia. Persamaan standar matematis digunakan untuk mewakili perilaku tanah sesuai dengan data laboratorium. Konduktivitas hidraulik tanah merupakan kemampuan tanah untuk meloloskan air ke dalam tanah. Nilai konduktivitas hidraulik berbanding terbalik dengan nilai *suction*, dimana penurunan nilai konduktivitas hidraulik akan menyebabkan peningkatan nilai *suction* (Sinarta, 2018).

Tegangan air pori negatif

Tanah pada kondisi setengah jenuh (*partially saturated*), tegangan air pori dapat bernilai negatif sehingga tanah menyerap air atau timbul gaya serap (*soil suction* atau *matrix suction*) kondisi ini menyebabkan perubahan kuat geser tanah. Tanah jenuh air, seluruh ruang pori tanah terisi air. Kondisi *partially saturation* tidak kenyang air ruang pori sebagian terisi air yang merupakan matik suction ($u_a - u_w$) dan dapat membentuk maniskus air, yang timbul karena fenomena tegangan permukaan (Fredlund dan Rahardjo, 1993).

Kemampuan hisap tanah maximum berada dekat permukaan tanah terjadi pada akhir musim kering sehingga kapasitas infiltrasi maximum terjadi dekat muka tanah selama musim kering, sebaliknya suction minimum terjadi pada akhir musim penghujan sehingga keruntuhan lereng sering terjadi pada saat itu karena kapasitas infiltrasinya juga mencapai minimum.

Parameter kuat geser tanah

Kuat geser tanah merupakan fungsi dari kohesi tanah (c) dan sudut gesek internal tanah (ϕ). Persamaan umum kuat geser tanah berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb adalah:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

dengan; τ = kuat geser tanah (kN/m^2), c = kohesi tanah (kN/m^2), σ_n = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m^2), ϕ = sudut gesek internal tanah ($^\circ$).

Infiltrasi hujan menyebabkan tekanan air pori meningkat, akibatnya stabilitas lereng turun. Menurut Ho dan Fredlund (1982) dalam peningkatan kuat geser tanah akibat tekanan air pori negatif dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

dengan; c = kohesi tanah (kN/m^2), c' = kohesi efektif (kN/m^2), $(u_a - u_w)$ = matric suction (kN/m^2), ϕ^b = sudut menunjukkan variasi penambahan kuat geser relatif terhadap matric suction ($^\circ$).

Fredlund dan Rahardjo (1993) mengusulkan sebuah persamaan kuat geser tanah untuk kondisi jenuh sebagai berikut:

$$\tau = c' + \{(\sigma - u_a) + X(u_a - u_w)\} \tan \phi \quad (3)$$

dengan; $(\sigma - u_a)$ = tekanan normal pada bidang runtuh (kN/m^2), $\chi = \frac{\phi^b}{\phi}$ = parameter derajat kejenuhan.

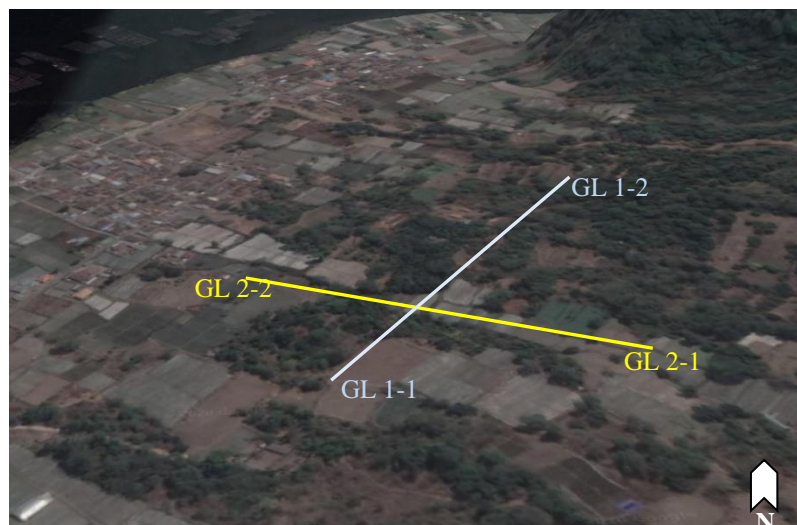
3. METODELOGI

Penelitian dilaksanakan di Lereng Gunung Abang yang mengarah ke Desa Abang Batudinding dan Desa Terunyan. Analisa kajian terhadap potensi *debris flow* dilakukan di Desa Abang Batudinding akibat adanya sungai intermitten yang setiap tahunnya mengalami banjir bandang seperti pada Gambar 1. Analisa hidrologi berdasarkan curah hujan bulanan maksimum selama 10 tahun yaitu dari tahun 2009 sampai dengan 2018. Data curah hujan tersebut diperoleh dari Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III, 1 yaitu; pos hujan Kintamani, pos hujan Besakih, pos hujan Kubu, pos hujan Kerta. Analisa hujan seperti metode *poligon thiessen*, luas area polygon Kintamani = 201,9 km^2 , luas area *polygon* Kubu = 100,8 km^2 , luas area polygon Besakih = 130,7 km^2 , luas area polygon Kerta = 208,6 km^2 .

Penyelidikan terhadap lapisan tanah menggunakan metode Geolistrik dengan konfigurasi wenner alfa dengan 2 section berada di Desa Abang Batudinding seperti terlihat pada Gambar 2. Pengujian dengan *borehole* dan pengamatan singkapan batuan serta situs-situs juga dilaksanakan di sekitar sungai *intermitten*.



Gambar 1. Desa Abang Batudinding



Gambar 2. Lokasi bentangan geolistrik di Desa Abang Batudinding.

Estimasi *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)* berdasarkan *SoilVision Database*, data yang digunakan sebagai input adalah data propertis tanah dan distribusi ukuran butiran yang diperoleh dari pengujian di laboratorium. Hasil fitting distribusi ukuran butiran digunakan sebagai input untuk memprediksi SWCC menggunakan *software Seep/W*. Hasil SWCC akan digunakan sebagai input dalam menganalisis fungsi *hydraulic conductivity* terdapat parameter konstanta dan indeks distribusi ukuran butiran. Nilai parameter konstanta dan indeks distribusi ukuran butiran digunakan untuk mendapatkan nilai *air entry value* dan nilai *suction* pada tanah untuk setiap kondisi kejenuhan. Nilai derajat kejenuhan tanah ini akan menunjukkan perubahan terhadap kuat geser tanah.

4. HASIL DAN DISKUSI

Analisis hujan efektif seperti pada Tabel 1, merupakan hasil hitungan curah hujan harian dengan berbagai kala ulang yang dikalikan dengan koefisien limpasan berdasarkan koefisien limpasan metode rasional Mc Guen (1989) dalam Suripin (2004). Deskripsi lahan dilokasi penelitian merupakan lahan hutan yang kondisinya berbukit dengan kemiringan 10 - 30%, sehingga nilai koefisien limpasan yang digunakan antara 0,30 – 0,60. Curah hujan efektif digunakan untuk perhitungan distribusi hujan jam-jaman dengan metode nisbah pada Tabel 2.

Tabel 1. Curah hujan efektif

Kata Ulang Tahun	2	5	10	25	50	100	200	1000
CH Harian (mm/hari)	276	350	374	390	397	400	402	405
Koefisien pengaliran (C)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
CH Efektif (mm/hari)	165,6	210	224,4	234	238,2	240	241.2	243

Tabel 2. Distribusi Hujan Jam-Jaman

Kala Ulang	2	5	10	25	50	100	200	1000	
T (Jam)	Nisbah	Curah Hujan Tiap Jam							
1	0,693	114,82	145,61	155,59	162,25	165,16	166,41	167,24	168,49
2	0,180	29,84	37,85	40,44	42,17	42,93	43,25	43,47	43,79
3	0,126	20,94	26,55	28,37	29,58	30,11	30,34	30,49	30,72

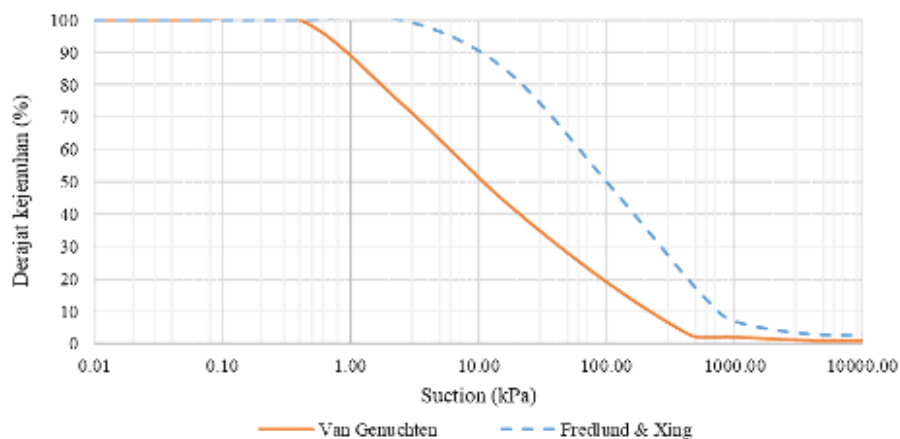
Pengujian ini dapat dilihat kondisi tanah di daerah Desa Abang Batudinding didominasi oleh warna kuning dengan nilai resistivitas berkisar ± 516 ohm m, kemudian warna hijau dengan resistivitas berkisar ± 252 ohm m, kemudian terdapat warna merah dan coklat yang memiliki nilai resistivitas berkisar antara ± 516 ohm m sampai dengan ± 1057 ohm m. Berdasarkan korelasi nilai resistivitas pengujian dengan material tanah dapat dilihat bahwa nilai yang diberikan oleh pengujian geolistrik dapat diperkirakan bahwa lapisan tanah berupa lanau berpasir, batu pasir, dan andesit dengan kepadatan yang berbeda. Lapisan permukaan yang terdiri dari lapisan lempung kepasiran atau lempung kepasiran bercampur kerikil dan batuan lepas.

Sifat fisik tanah telah diselidiki dengan *borehole* dengan pengamatan hasil laboratorium disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Properties Tanah

No	Parameters Tanah	Nilai
1	Berat jenis, G_s	2,61
2	Batas Cair, L_L	82 %
3	Indeks Plastisitas, P_t	39,15%
4	Batas Susut, S_L	21,72%
5	Kadar air tanah asli, w	32,20%
6	Berat volume tanah asli, γ_b (g/cm ³)	1,9
7	Berat volume kering/Kepadatan, γ_d (g/cm ³)	0,85
8	Angka Pori, e	1,2
9	Klasifikasi tanah (USCS)	MH

Fitting distribusi ukuran butiran tanah, dalam hal ini distribusi ukuran butiran yang digunakan adalah ukuran butiran dari lokasi pemboran sampel tanah dipilih dari pengujian laboratorium terbaik, *fitting* distribusi ukuran dilakukan dengan menggunakan bantuan data dasar dalam *software SoilVision*. *Fitting* distribusi ukuran butiran menggunakan dua persamaan yaitu bimodal dan unimodal. Kajian *fitting* untuk distribusi ukuran butiran pada lokasi penelitian menggunakan persamaan *unimodal*, Kajian terhadap nilai SWCC diperoleh dari estimasi menggunakan dua persamaan yaitu persamaan Fredlund dan Xing dan persamaan Van Genuchten berdasarkan output dari *software Soilvision* dapat dilihat dalam Gambar 3.

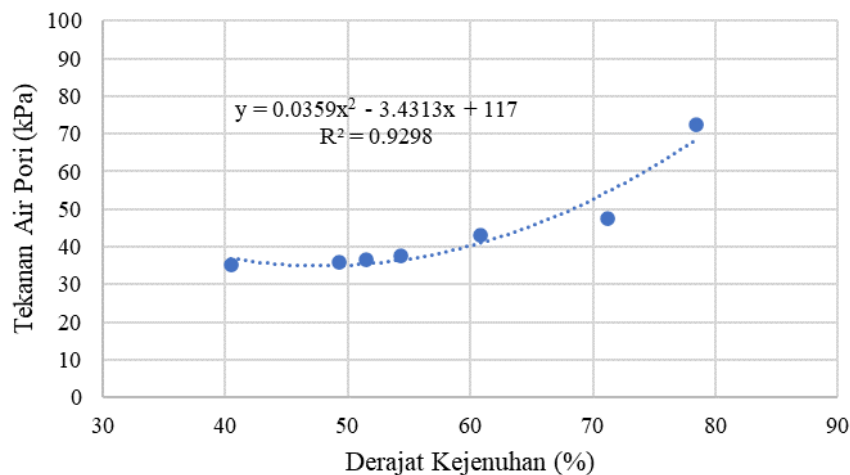


Gambar 3. SWCC Desa Abang Batudinding.

Berdasarkan hasil estimasi SWCC di atas, dipilih persamaan Fredlund dan Xing yang akan digunakan untuk menentukan nilai *suction* tanah. Persamaan Fredlund dan Xing dipilih karena hasil estimasi mendekati nilai estimasi SWCC menggunakan hasil *fitting* distribusi ukuran butiran menggunakan metode *Modified Kovacs*. Grafik SWCC di atas menggambarkan hubungan antara nilai derajat kejenuhan dan *suction* tanah. Gambar 3 memperlihatkan bahwa semakin besar nilai derajat kejenuhan tanah maka nilai *suction* semakin kecil, sebaliknya semakin kecil nilai derajat kejenuhan tanah maka nilai *suction* tanah semakin besar. Nilai *suction* tanah tinggi terjadi pada saat tanah dalam

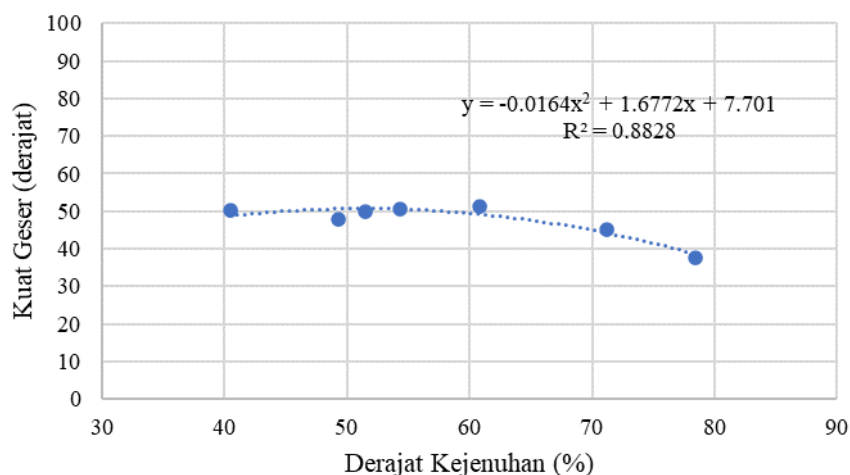
kondisi kering karena pada kondisi ini tanah akan menyerap air sehingga pori-pori tanah yang berisi udara akan terisi oleh air. Pada saat kondisi tanah jenuh, pori-pori tanah akan terisi oleh air, sehingga nilai *suction* tanah akan menurun yang berarti kemampuan tanah untuk menyerap air juga berkurang.

Proses menghisapnya tanah akibat intensitas hujan dapat meningkatkan tegangan air pori tanah, dengan peningkatan kadar air yang mendekati jenuh, pori-pori tanah akan lebih banyak terisi oleh air sehingga tegangan air pori menjadi meningkat yang dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai tegangan air pori negatif bertambah dari 35 kPa sampai 72,44 kPa dalam pori-pori tanah masih terdapat air yang dapat menjaga ikatan butiran tanah pada saat derajat kejenuhan rendah sekitar 40% dan selanjutnya naik sampai 78,46%. Tegangan air pori yang tersisa inilah sering disebut tegangan air pori negatif.



Gambar 4. Hubungan antara derajat kejenuhan (S_r) dengan tegangan air pori (u).

Gambar 5 menunjukkan bahwa, proses pembasahan akibat infiltrasi air hujan dimana S_r mendekati kondisi jenuh akan menurunkan kekuatan geser dari kondisi initial, karena kadar air yang berlebihan akan mengurangi ikatan butiran tanah atau kohesi sehingga kekuatan geser tanah juga akan menurun. Nilai derajat kejenuhan (S_r) pada kondisi initial yaitu 40% dimana massa tanah berkurang sebagian besar pori-pori tanah akan terisi udara yang menyebabkan ikatan butiran tanah berkurang serta kekuatan geser tanah menjadi menurun. Seiring dengan hisap air akibat adanya hujan kejenuhan tanah meningkat demikian juga bahwa kuat geser tanah meningkat pada kejenuhan tertentu, pada penelitian ini pada derajat kejenuhan 56% dan selanjutnya kuat geser tanah mengalami penurunan sampai 37,62° dengan derajat kejenuhan 78,46%.



Gambar 5. Hubungan antara derajat kejenuhan (S_r) dengan kuat geser tanah (ϕ)

5. KESIMPULAN

Morfologi lereng Gunung Abang dengan kemiringan lereng lebih dari 40% dan litologi batuan vulkanik yang telah lapuk yang terdiri dari breksi vulkanik, dan breksi tufaan dalam kondisi agak lapuk hingga lapuk sedang dan pasir berlempung atau lanau berpasir dengan curah hujan efektif rata-rata pada 10-50 tahun sebesar 238 mm/hari akan menyebabkan larutnya lapisan permukaan tanah yang memicu longsor rombakan.

Adanya infiltrasi air hujan pada tanah berdasarkan analisa poligon thiessen curah hujan efektif sebesar 238 mm/hari, mengakibatkan perubahan kadar air meningkatkan tegangan air pori tanah, dengan peningkatan kadar air yang mendekati jenuh, pori-pori tanah akan lebih banyak terisi oleh air sehingga tegangan air pori menjadi meningkat, Nilai tegangan air pori negatif bertambah dari 35 kPa sampai 72,44 kPa dalam pori-pori tanah masih terdapat air yang dapat menjaga ikatan butiran tanah pada saat derajat kejenuhan rendah sekitar 40% dan selanjutnya naik sampai 78,46%. Tingkat kejenuhan tanah menurunkan kekuatan geser tetapi tidak serta merta mulai dari kondisi initial, karena kadar air yang berlebihan akan mengurangi ikatan butiran tanah atau kohesi sehingga kekuatan geser tanah juga akan menurun, Nilai derajat kejenuhan (S_r) pada kondisi initial yaitu 40% dimana massa tanah berkurang sebagian besar pori-pori tanah akan terisi udara yang menyebabkan ikatan butiran tanah berkurang serta kekuatan geser tanah menjadi menurun, Seiring dengan hisap air akibat adanya hujan kejenuhan tanah meningkat demikian juga bahwa kuat geser tanah meningkat pada kejenuhan tertentu, pada penelitian ini pada derajat kejenuhan 56% dan selanjutnya kuat geser tanah mengalami penurunan sampai 37,62° dengan derajat kejenuhan 78,46%.

DAFTAR PUSTAKA

- Cruden, David M, and David J Vernes. 1996. "Landslide Types and Processes." In *Landslides: Investigation and Mitigation*, edited by Transportation Research Board.
- Fredlund, D. G., and H. Rahardjo. 1993. "Soil Mechanics for Unsaturated Soils." *John Wiley & Sons, Inc.* 30 (2): 113–23. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>.
- Fu, Xiaoli, Mingan Shao, Dianqing Lu, and Huimin Wang. 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>.
- Hungr, Oldrich, Serge Leroueil, and Luciano Picarelli. 2014. "The Varnes Classification of Landslide Types, an Update." *Landslides* 11 (2): 167–94. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- L'Heureux, Jean-Sébastien. 2005. "Unsaturated Soils and Rainfall Induced Landslides." University of Oslo.
- Sinarta, I Nengah. 2016. "Tegangan Pori Negatif Sebagai Parameter Stabilitas Lereng Tanah Tak Jenuh (Soil Mechanics on Unsaturated Soil)." *Paduraksa* 5: 31–42.
- Sinarta, I Nengah. 2018. *Tingkat Ancaman Gerakan Tanah Pada Batuan Vulkanik Di Bali Berdasarkan Pendekatan Geoteknik Komprehensif*. 1st ed. Yogyakarta: Desertasi.
- Sinarta, I Nengah and I Wayan Ariyana Basoka. 2019. "Safety Factor Analysis of Landslides Hazard as a Result of Rain Condition Infiltration on Buyan-Beratan Ancient Mountain Safety Factor Analysis of Landslides Hazard as a Result of Rain Condition Infiltration on Buyan-Beratan Ancient Mountain." *Journal of Physics: Conference Series* 1402 (2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022002>.
- Sinarta, I Nengah dan I Wayan Ariyana Basoka. 2019. "Keruntuhan Dinding Penahan Tanah Dan Mitigasi Lereng Di Dusun Bantas, Desa Songan B, Kecamatan Kintamani." *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas* 3 (0): 23–32. <https://doi.org/10.12962/j26151847.v3i0.5188>.
- Sinarta, I Nengah, Putu Ika Wahyuni, and Putu Aryastana. 2019. "Debris Flow Hazard Assessment Based on Resistivity Value and Geological Analysis In Abang Mountain, Geopark Batur, Bali." *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10 (11): 11–18. <http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=11>.
- Sinarta, I Nengah, Ahmad Rifa'i, Teuku Faisal Fathani, dan Wahyu Wilopo. 2016. "Indeks Ancaman Gerakan Tanah Dengan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP) Untuk Penataan Infrastruktur Kepariwisata Di Kawasan Geopark Gunung Batur, Kabupaten Bangli, Bali." *Seminar Nasional KonsepSi#2 (Konsep Dan Implementasi 2)* 1: 110–20.
- Sinarta, I Nengah, Ahmad Rifa'i, Teuku Faisal Fathani, and Wahyu Wilopo. 2017. "Landslide Hazards Due To Rainfall Intensity in the Caldera of Mount Landslide Hazards Due To Rainfall Intensity In." *The 1st Warmadewa University International Conference on Architecture and Civil Engineering SUSTAINABILITY, DESIGN AND CULTURE 20th October 2017, Faculty of Engineering, Warmadewa University, Bali* LANDSLIDE 1: 160–67.
- Sinarta, I Nengah, Ahmad Rifa'i, Teuku Faisal Fathani, and Wahyu Wilopo. 2020. "Spatial Analysis of Safety Factors Due to Rain Infiltration in the Buyan-Beratan Ancient Mountains." *International Review of Civil Engineering (IRECE)* 11 (2): 90. <https://doi.org/10.15866/irece.v11i2.17668>.
- Suripin. 2004. *Sistem Drainase Perkotaan Yang Berkelanjutan*. 2nd ed. Yogyakarta.
- Tim tanggap darurat gerakan tanah, Bali. 2017. "Laporan Singkat Bencana Gerakan Tanah Kecamatan Kintamani, Kabupaten Bangli, Provinsi Bali." Bali.