

PENGARUH REMBESAN PADA KUAT GESER TANAH JENUH SEBAGIAN

*THE INFLUENCE OF WATER INFILTRATION TO SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SOIL*

Gayuh Aji Prasetyaningtiyas<sup>\*1</sup>, Kuswaji Dwi Priyono<sup>2</sup>, Muhammad Najib Azhom<sup>3</sup>, Muhammad Eryan Anindyaputra<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dosen / Prodi Teknik Sipil / Fakultas Teknik / Universitas Muhammadiyah Surakarta

<sup>2</sup>Dosen / Prodi Geografi / Fakultas Geografi / Universitas Muhammadiyah Surakarta

<sup>3,4</sup>Mahasiswa / Prodi Teknik Sipil / Fakultas Teknik / Universitas Muhammadiyah Surakarta

Korespondensi: gayuh.ap@ums.acid

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memahami interaksi sifat fisis tanah pada tanah jenuh sebagian akibat infiltrasi hujan. Tanah jenuh sebagian memiliki zona kapilaritas yang berpotensi mengalami perubahan kadar air melalui terisinya rongga antar partikel tanah oleh air. Kadar air tersebut mampu mengubah parameter pada kuat gesek tanah. Untuk mengetahui lebih jauh mengenai mekanisme perubahan kadar air terhadap kuat gesek tanah dilakukan sebuah pendekatan menggunakan metode Bishop. Metode Bishop dapat mengaitkan perubahan tegangan hisap air (*suction*) pada tanah dengan perubahan parameter kuat gesek tanah ( $\tau_{ff}$ ). Pengukuran daya hisap tanah dilakukan menggunakan *irrometer* dan metode *drying cycle* sehingga didapatkan karakteristik tanah jenuh sebagian. Pengujian parameter kuat gesek dilakukan pada tanah lanau kepasiran dengan beberapa kondisi kadar air pasca hujan. Hasil studi menunjukkan parameter  $\phi_b$  dan koefisien kejenuhan ( $X$ ) sangat berpengaruh pada nilai pendekatan sehingga menghasilkan sedikit perbedaan dengan hasil pengukuran parameter tanah pada laboratorium. Maka, diketahui bahwa metode Bishop dapat digunakan untuk memprediksi perubahan kuat gesek tanah pada beberapa kadar air pada tanah lanau kepasiran. Parameter kuat gesek tanah yang berubah utamanya adalah sudut gesek tanah efektif ( $\phi'$ ). Penelitian ini bermanfaat pada studi infiltrasi air area yang rentan mengalami kegagalan akibat infiltrasi hujan, seperti lokasi rawan longsor.

**Kata Kunci:** Bishop, kuat gesek tanah, rembesan, tanah jenuh sebagian

ABSTRACT

*This study aims to understand the interaction of engineering properties of unsaturated soil subjected to rainfall infiltration. It influences the variable of soil shear strength along with the alter of soil water content. A series of suction test was subjected to the silty sand layer, then the result was correlated with the change of soil degree saturation. The correlation then was implemented in soil water characteristic curve. A Bishop method was applied in this study to predict soil shear strength ( $\tau_{ff}$ ) in variance of soil water content. Meanwhile, other samples from exiting condition were prepared. The samples were taken in rainy season and subjected shear strength test. The results then compared with the calculation of shear strength prediction by soil water characteristic curve. The research shows any high similarity between the prediction and the shear strength test value. Any change of shear strength value in prediction approach particularly was affected by the change of  $\phi_b$  and  $X$ . The change of both parameters impacted to internal shear angle ( $\phi'$ ) thus, the infiltration mainly affected to the soil with low shear strength internal angle. This study is applicable for an area with unstable slope affected by rainfall infiltration such as landslide area.*

**Keywords:** Bishop, infiltration, shear strength of soil, unsaturated soil

## PENDAHULUAN

Tanah memiliki rongga yang dapat terisi oleh udara dan air. Rongga tersebut apabila terisi dengan udara dan berada dalam kondisi jenuh sebagian ( $w < 100\%$ ) maka memungkinkan adanya fenomena kapilaritas dalam partikel tanah (Zhou dkk., 2016). Fenomena ini terjadi akibat adanya daya hisap air pada tanah. Dengan adanya daya hisap tersebut, perubahan kadar air dalam tanah berkaitan erat dengan volume rongga dalam tanah sekaligus ikatan dalam tanah akibat berubahnya volume rongga tersebut.

Ni dkk. (2018) melakukan studi mengenai pengaruh kenaikan muka air tanah pada perilaku tanah jenuh sebagian, dari model yang diajukan didapatkan bahwa kenaikan muka air tanah dapat mempengaruhi penurunan kuat geser tanah melalui perubahan kandungan air pada tanah. Studi ini menggunakan analisis numeris untuk menunjukkan mekanisme perubahan perilaku tanah jenuh sebagian. Penelitian lain dilakukan oleh Hamid dan Miller (2009) dan mendapatkan hasil bahwa tegangan hisap air (*suction*) pada tanah mempengaruhi nilai puncak pada diagram kegagalan *Mohr-Coulomb* pada tanah dengan plastisitas rendah. Jenis tanah plastisitas rendah itu salah satunya tanah granular misalnya tanah kepasiran. Pada tanah jenuh sebagian nilai kejenuhan berpengaruh pada volume rongga tanah baik pada tanah kohesif maupun granular terutama pada lapisan permukaan dan dangkal (Chen dkk., 2020). Dimana lapisan ini merupakan lapisan yang sangat terpengaruh oleh tekanan atmosfer dan infiltrasi.

Secara umum, penelitian yang telah disebutkan sebelumnya melakukan pemodelan baik secara matematis maupun numeris. Hal ini disebabkan penelitian dengan pengujian langsung membutuhkan waktu yang cukup lama karena kondisi lapangan tidak dapat diprediksi. Untuk mendekati pengujian tanah secara langsung di lapangan, dilakukan penelitian laboratorium dengan variasi kadar air (Obasi dan Anyaegbunam, 2005). Uji laboratorium bisa dilakukan dengan metode pembasahan maupun pengeringan tanah. Namun proses pembasahan tanah terkadang tidak cukup mewakili kondisi di lapangan. Oleh karena itu diperlukan pengujian langsung sesuai kejadian hujan lapangan apabila uji tersebut terkait dengan kejadian kegagalan tanah, misalnya longsor.

Pada studi ini dilakukan pengujian geser langsung tanah pada beberapa kejadian hujan pada lokasi rawan longsor untuk mendapat nilai kuat tanah sesungguhnya sesuai kejadian lapangan. Nilai kuat geser tersebut pada akhirnya dicocokkan dengan nilai kuat geser yang didapatkan dengan pendekatan karakteristik tanah jenuh sebagian melalui grafik karakteristik tanah. Grafik tersebut didapatkan melalui uji daya hisap air pada tanah dengan metode *drying*. Lebih lanjut, korelasi antara karakteristik tanah jenuh sebagian dengan kuat geser tanah didekati dengan metode Bishop. Dengan metode tersebut diharapkan dapat diketahui kecocokan metode pengeringan (*drying*) dan asesmen melalui persamaan kuat geser efektif oleh Bishop pada wilayah rawan longsor dalam kaitannya dengan stabilitas lereng di area tersebut.

## TINJAUAN PUSTAKA

Pada tanah jenuh sebagian, kejenuhan tanah dianalisis sesuai keadaannya bahwa terkadang tanah dalam kondisi belum mencapai kejenuhan 100% (Bishop, 1966). Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa penelitian ini menggunakan pendekatan Bishop (1966). Pendekatan tersebut secara umum disajikan pada Persamaan 1. Dimana  $\tau_{ff}$  adalah kuat gesek tanah pada kondisi kritis tanah ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),  $c'$  adalah kohesi efektif ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),  $(\sigma_f + u_a)_f$  adalah tegangan normal akibat adanya tegangan hisap tanah pada kegagalan tanah,  $X$  merupakan parameter yang berkaitan dengan daya hisap air pada tanah dan kejenuhan tanah ( $S_r$ ). Nilai  $X$  didapat sesuai dengan nilai derajat kejenuhan,  $S_r$  (%). Nilai derajat kejenuhan didapat dengan menggunakan Persamaan 3, dimana  $\theta$  merupakan kadar air volumetrik ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $n$  merupakan porositas tanah.  $(u_a - u_w)_f$  adalah nilai tegangan hisap air (*suction*) pada tanah kondisi kegagalan tanah,  $\phi'$  adalah sudut gesek internal efektif ( $^\circ$ ),  $\phi_b$  adalah sudut gesek yang terpengaruh gaya hisap air pada tanah. Kadar air volumetrik ( $\theta$ ) dihitung dengan Persamaan 4, dimana  $w$  adalah kadar air gravimetrik (%),  $\gamma_b$  berat jenis tanah ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) dan  $\gamma_w$  adalah berat jenis air ( $1\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).

$$\tau_{ff} = c' + \{(\sigma_f + u_a)_f + X(u_a - u_w)_f\} \tan \phi' \quad 1$$

$$X = \tan \phi_b / \tan \phi' \quad 2$$

$$S_r = \theta / n \times 100\% \quad 3$$

$$\theta = w \times (\gamma_b / \gamma_w) \quad 4$$

Pendekatan Bishop (1966) sudah digunakan

oleh peneliti-peneliti sebelumnya. (Niu dkk., 2021) melakukan studi mengenai pengaruh  $X$ . Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada nilai *suction* yang tinggi, perhitungan seringkali tidak akurat pada tanah dengan kohesif. Cavalcante dan Mascarenhas (2021) menguji pendekatan Bishop secara matematis. Pengujian dilakukan dalam pemodelan tiga dimensi. Hasil studi menunjukkan bahwa parameter  $X$  sangat mempengaruhi akurasi perhitungan peningkatan kuat geser tanah pasir pada tana jenuh sebagian. Oleh karena itu, lebih lanjut penelitian menggunakan tanah lanau kepasiran yang masuk kategori tanah granular untuk memvalidasi pendekatan Bishop pada area rawan longsor.

## METODE

Penelitian dimulai dengan pengambilan sampel pada lokasi rawan Longsor (Gambar 1) yang terletak di Kecamatan Karangobar, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah. Gambar 1 menunjukkan elevasi pada lokasi penelitian yang cukup tinggi pada ketinggian  $>1606\text{m}$ . Dalam penelitian ini dipakai data primer dan data sekunder. Data primer terdiri atas data hasil pengujian pada sampel yang diambil pada bulan Juli 2016 dan Oktober 2016. Pengujian laboratorium terdiri atas pengujian *suction* ( $u_a-u_w$ ), pengujian uji geser langsung (sifat mekanis), pengujian sifat fisis tanah (properties tanah) dan uji kelembaban tanah. Pengujian geser langsung dan sifat fisis tanah dilakukan pada benda uji tak terganggu, sedangkan uji *suction* menggunakan tanah terganggu dan dibentuk kembali di laboratorium dengan berat jenis ( $\gamma_b$ ) sama dengan berat jenis ( $\gamma_b$ ) di lapangan. Lebih jauh, uji *suction* ( $u_a-u_w$ ) dilakukan pada beberapa kondisi kadar air dengan metode pengeringan (drying cycle), dimana benda uji diletakkan pada ruangan yang memiliki akses terhadap cahaya matahari sehingga dapat mempercepat perubahan kadar air pada tanah. Pengujian *suction* dilakukan menggunakan irrometer (Gambar 2a dan Gambar 2b) dengan diameter keramik 22mm yang ditanam pada sampel pada kedalaman -20cm. Pada saat yang sama pengukuran kelembaban tanah dilakukan pada benda uji yang sama, sehingga kedua pengukuran tersebut merupakan pengukuran aktual. Pengukuran kelembaban tanah dilakukan menggunakan *probe* yang ditanam pada kedalaman

yang sama seperti uji *suction* namun pada lubang yang berbeda. Uji kelembaban tersebut nantinya dapat diubah pada data logger menjadi data kadar air ( $w$ ).

Data sekunder merupakan data laporan tanah yang diambil pasca longsoran yang terjadi tahun 2014 yang dilakukan oleh laboratorium mekanika tanah Universitas Diponegoro (Laboratory, 2015). Data sekunder lainnya adalah data hujan *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* yang dapat diunduh pada halaman <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>. Menurut Quirino dkk. (2017) data *TRMM* setidaknya memiliki 0.69% kemiripan dengan data sebenarnya pada stasiun pencatat hujan. Data *TRMM* dipakai karena keterbatasan data pada stasiun hujan yang hanya menyediakan data hujan bulanan. Sedangkan pada penelitian ini dibutuhkan data hujan harian. Di sisi lain keberadaan stasiun pencatat hujan terbatas, hanya tersedia satu stasiun pada satu kecamatan dengan jarak yang jauh dari lokasi pengambilan sampel sehingga tidak mencakup lokasi pengambilan sampel.

Selanjutnya, data hasil pengukuran *suction* dan kelembaban tanah dimasukkan dalam *fitting* Van Genuchten (1980) untuk mendapatkan nilai karakteristik tanah atau *Soil Water Characteristics Curve (SWCC)* (Gambar 3). Dengan Persamaan 1 nilai parameter kuat geser pada tanah dapat dicari pada setiap perubahan nilai kadar air. Nilai tersebut divalidasi menggunakan nilai parameter kuat geser yang didapat dari pengujian di laboratorium. Hasil analisis kemudian dihubungkan dengan intensitas hujan rerata harian (Liu et al., 2014)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan uji laboratorium dan investigasi lapangan didapatkan hasil uji properties tanah seperti pada Tabel 1. Hasil tersebut menunjukkan properties tanah yang diambil pada bulan Februari 2015 sesuai data sekunder dari data sekunder (Laboratory, 2015), data tanah pada musim hujan, Oktober 2016 dan akhir musim panas, Juli 2016. Satu data tambahan merupakan tanah tak terganggu yang direndam dalam air sehingga mendapatkan kejenuhan tanah sebesar 95%. Beberapa properties tanah seperti nilai angka pori ( $e$ ) porositas ( $n$ ) dan nilai massa jenis ( $G_s$ ) diambil pada bulan Oktober saja, mengingat tanah diambil pada lokasi dan elevasi yang sama. Oleh

karena itu tanah dianggap memiliki gradasi yang sama.

Data intensitas hujan menunjukkan bahwa pada bulan Februari tahun 2015, hujan rerata harian memiliki intensitas sebesar 50mm/hari dengan rerata durasi >9jam. Pada bulan Oktober 2016 rerata hujan harian pada hari hujan adalah 30mm/jam dengan durasi >9 jam sedangkan pada bulan Juli, rerata harian hujan pada hari hujan lebih rendah menjadi 19mm/hari dengan durasi <5jam.

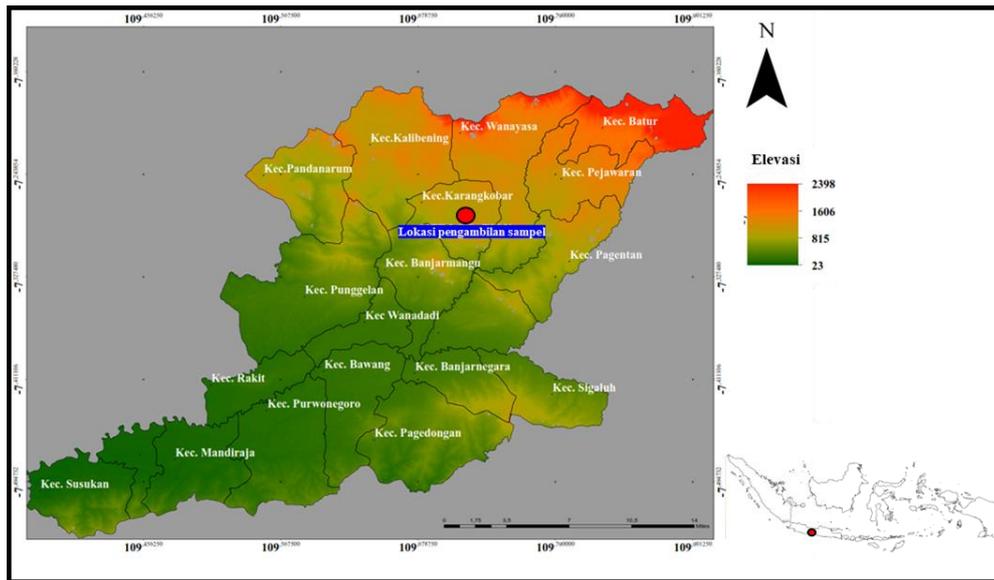
Dengan melihat intensitas dan durasi hujan, sangat wajar jika kejenuhan pada bulan Juli menurun meskipun nilai penurunan tidak cukup besar dari bulan Oktober ke bulan Juli. Hal tersebut kemungkinan disebabkan hujan satu hari sebelum investigasi lapangan dilakukan. Terlebih, pengambilan benda uji dilakukan pada kedalaman yang dangkal, sehingga air zona tersebut merupakan zona yang cepat terkena infiltrasi air hujan.

Menurut Fredlund dan Rahardjo (1993) penambahan *suction* berpengaruh pada penambahan kuat geser tanah ( $\tau_{ff}$ ) sehingga nilai kadar air awal (initial condition) dipilih nilai kadar air yang terbesar (95%) diantara sampel yang dipakai dalam Tabel 1. Hal tersebut dilakukan untuk memahami peningkatan nilai kuat geser tanah dengan adanya perubahan nilai *suction* yang didekati melalui grafik *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)* yang dapat dilihat pada Gambar 3. Sebelumnya, nilai kadar air volumetrik perlu diubah kedalam derajat kejenuhan menggunakan Persamaan 3. Selanjutnya, dengan memformulasikan nilai  $\phi'$  kedalam Persamaan 2 didapatkan nilai  $\phi_b$  sebesar  $13.5^\circ$  (Tabel 1). Melalui nilai  $\phi_b$  dan *suction* ( $u_a - u_w$ ) nilai kohesi efektif ( $\phi'$ ) dapat diprediksi.

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai sudut gesek internal ( $\phi'$ ) prediksi dan hasil uji laboratorium memiliki kemiripan >90% untuk bulan Februari dan bulan Juli. Sedangkan untuk bulan Oktober, nilai uji laboratorium dan prediksi memiliki perbedaan sebesar 10%. Nilai  $\phi'$  uji laboratorium adalah  $26^\circ$  dan nilai  $\phi'$  prediksi didapatkan  $23.41^\circ$ . Dalam perhitungan kuat gesek

tanah, perbedaan 10% tidak memberi pengaruh yang signifikan atau mencolok selama nilai parameter selain  $\phi'$  seragam. Perbedaan akan signifikan apabila selisih yang didapatkan >10% (Tamás et dkk., 2013). Perbedaan 10% kemungkinan disebabkan adanya selisih nilai kadar air pada bulan Oktober dan kadar air initial condition cukup besar sekitar 31%. Selain itu nilai kadar air pada kondisi awal (initial condition) seharusnya >100%, namun karena keterbatasan data, menyebabkan grafik *SWCC* yang didapatkan kurang bisa mencapai range angka kadar air volumetrik (*volumetric water content*) yang lebih tinggi (Sreedeepp dkk., 2011). Hal ini menyebabkan nilai kadar air volumetrik terbatas hanya pada 0.53. Kenyataannya, pada data laboratorium yang didapatkan nilai kadar air volumetrik mencapai >0.53 khususnya untuk kondisi awal. Akibat range kadar air volumetrik yang kecil, nilai prediksi  $\phi'$  dan  $c'$  memiliki risiko angka yang meleset.

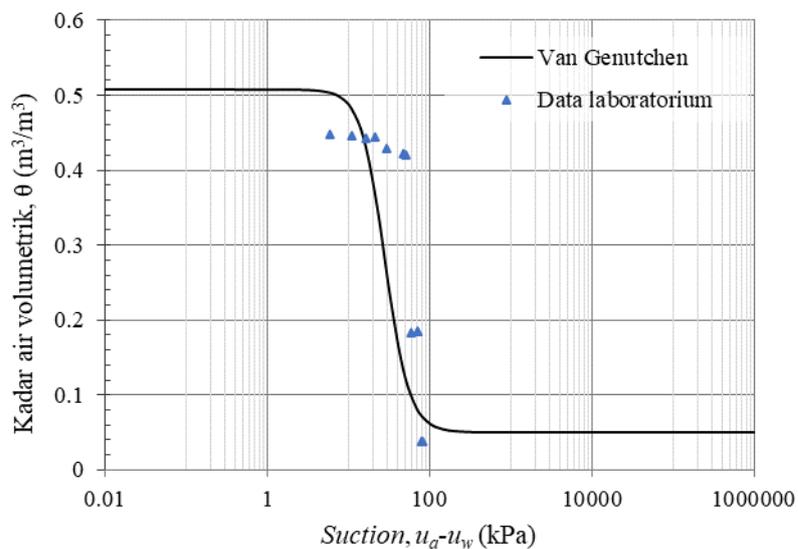
Hal ini juga dimungkinkan menjadi penyebab adanya perbedaan pada nilai kohesi antara nilai prediksi dengan nilai uji di laboratorium (Shen dkk., 2016), pada bulan Juli. Nilai  $c'$  hasil uji laboratorium  $0.1 \text{ kg.cm}^{-2}$  sedangkan pada prediksi nilai kohesi efektif mencapai  $0.3 \text{ kg.cm}^{-2}$  (Gambar 5). Meskipun begitu perbedaan ini sangat tidak signifikan, begitu pula untuk bulan Februari dan Oktober. Seperti diketahui bahwa tanah granular pada umumnya memiliki nilai kohesi yang rendah (Shen dkk., 2016), sehingga sangat wajar apabila peningkatan nilai kohesi dari satu kadar air ke kadar air lainnya dalam uji laboratorium tidak terlalu signifikan dibanding peningkatan sudut gesek internal (Güllü dan Giriskan, 2013). Hal ini disebabkan oleh sifat tanah granular yang dianggap sebagai *chessionless soil* (Sadek dkk., 2011). Hal ini berkaitan dengan permukaan butiran tanah granular yang lebih tebal dibanding dengan tanah non-granular (Nocholson, 2014). Dalam hal ini tanah lanau kepasiran memiliki tegangan air yang rendah pada permukaan mengingat sifat buritannya yang lepas, maka ikatan antar partikel yang diwakili nilai kohesi ( $c'$ )nya pun menjadi rendah.



**Gambar 1.** Peta lokasi pengambilan sampel  
Sumber: hasil analisis (2022)



**Gambar 2.** (a) Irrometer dan (b) datalogger yang dipakai dalam pengujian *suction*  
Sumber: dokumen pribadi (2022)

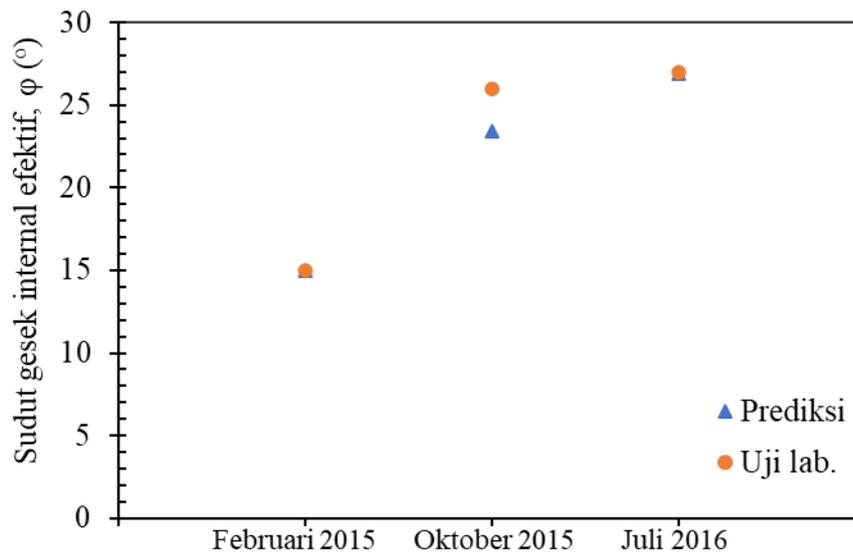


**Gambar 3.** Soil Water Characteristic Curve (SWCC) dari sampel tanah  
Sumber: hasil analisis (2022)

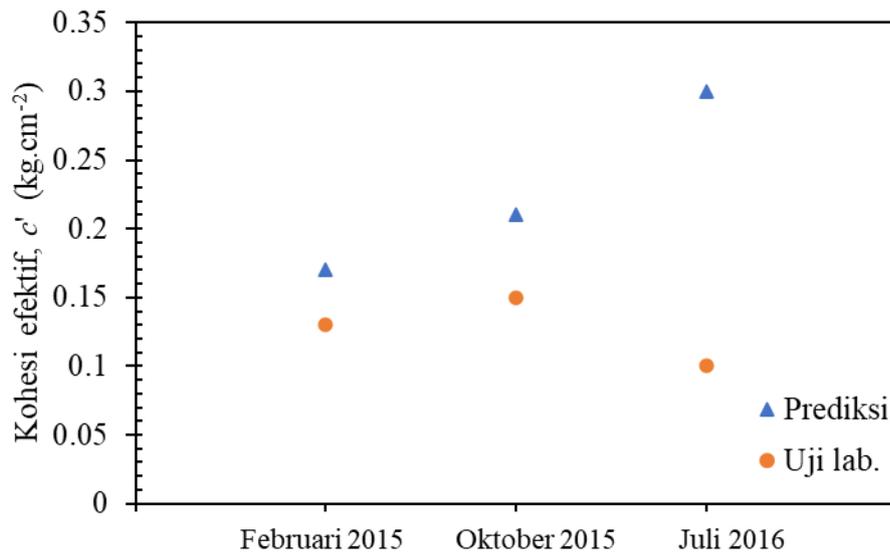
**Tabel 1.** *Properties* tanah dari data sekunder untuk bulan Februari dan primer untuk bulan Oktober, Juli dan *initial condition*

<i>Properties</i>	Bulan, Intensitas hujan			<i>Initial condition</i>	Satuan	Standar uji
	Februari	Oktober	Juli			
	50mm./hari	30mm/hari	19mm/hari			
$G_s$	2.59	2.5	-	-	-	(ASTMD54, 02)
$n$	0.659	0.74	-	-	-	(ASTMD54, 02)
$e$	1.93	2.35	-	-	-	(ASTMD54, 02)
$w$	80.97	46	40	95	(%)	(ASTM D2216, 2016)
$\gamma_b$	1.5985	1.49	-	1.59	(g.cm <sup>-3</sup> )	(ASTM D698, 2003)
$\gamma_d$	0.8835	0.74	-	0.83	(g.cm <sup>-3</sup> )	(ASTM D698, 2003)
$c'$	0.12	0.15	0.1	0.01	(kg.cm <sup>-2</sup> )	(ASTM D3080,2012)
$\varphi'$	15	26	27	14	°	(ASTMD3080,2012)
$\varphi_b$		13.5	13.5	13.5	°	

Sumber: Laporan uji tanah Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Diponegoro, untuk bulan Februari (2015) dan hasil analisis untuk bulan Oktober, Juli dan *initial condition* (2016)



**Gambar 4.** Nilai sudut gesek internal efektif ( $\varphi'$ ) antara prediksi dan perhitungan laboratorium  
Sumber: hasil analisis (2022)



**Gambar 5.** Nilai kohesi gesek internal efektif ( $c'$ ) antara prediksi dan perhitungan  
Sumber: hasil analisis (2022)

## KESIMPULAN

Setelah melakukan uji laboratorium dan investigasi tanah, studi ini menghasilkan beberapa hal yang ditulis dalam kesimpulan sebagai berikut,

1. Untuk tanah pada kedalaman dangkal nilai intensitas hujan cukup berpengaruh dalam perubahan kadar air, terbukti pada bulan Juli 2016, meskipun bulan tersebut merupakan bulan peralihan antara musim panas dan musim hujan, nilai kadar air teridstraksi oleh hujan di hari sebelumnya meskipun rerata hujan bulanan pada hari hujan tidak terlalu tinggi. Akibatnya, perubahan tersebut dapat mempengaruhi nilai perubahan parameter kuat gesek tanah ( $\phi'$ ). Hal tersebut terbukti pada nilai  $\phi'$  yang dihasilkan hanya memiliki selisih  $1^\circ$  dibandingkan pada musim hujan.
2. Nilai kuat geser tanah pada tanah jenuh sebagian memiliki karakteristik yang dapat ditentukan oleh perubahan *suction* yang diformulasikan dalam bentuk *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)*. Nilai *SWCC* dapat pula mewakili perubahan angka pori dan volume void di dalam lapisan tanah. Perubahan volume tersebut mengakibatkan perubahan kuat geser tanah akibat adanya penambahan rembesan air hujan.
3. Perubahan parameter kuat geser tanah sangat ditentukan oleh range kadar air volumetrik yang tergambar dalam *SWCC* tanah dan nilai initial kejenuhan tanah itu sendiri. Dimana

range kadar air volumetrik akan menentukan batas atas kejenuhan tanah yang dapat diprediksi, sehingga semakin tinggi batas atas kadar air volumetrik maka semakin tinggi nilai initial yang dapat diakomodir. Begitu pula nilai kadar air volumetrik pada *initial condition* mempengaruhi range pada peningkatan kuat gesek tanah pada setiap penurunan kadar air volumetrik. Apabila nilai kadar air awal kecil maka akan menimbulkan jarak yang dekat dengan kadar air selanjutnya pada perhitungan kuat geser tanah.

4. Pada tanah granular dengan nilai initial kohesi yang kecil, tidak terjadi peningkatan yang cukup signifikan pada perubahan nilai kohesi tanah efektif ( $c'$ ). Fenomena ini lebih banyak dipengaruhi oleh sifat butiran tanah granular itu sendiri yang memiliki permukaan lebih tebal dan lepas, sehingga menghasilkan rendahnya ikatan antar partikel tanah yang diwakili oleh nilai kohesi tanah ( $c'$ ). Sebaliknya nilai sudut gesek internal efektif ( $\phi'$ ) terpengaruh cukup signifikan dengan perubahan *suction*.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D D2216. (2016). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. American Society for Testing and Materials

- ASTM D2487. (2012). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).” Annual book of ASTM standards, ASTM international
- ASTM D698. (2003). Standard practice for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)). Book of Standards 04.08
- ASTM D 854 – 02. (2002). Standard Test Method For Specific Gravity Of Soil Solids by Water Pycnometer. American Society for Testing and Materials
- bishop, A. W. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Geotechnique*, 16, 91-130.
- Cavalcante, A. L. B. & Mascarenhas, P. V. S. (2021). Efficient approach in modeling the shear strength of unsaturated soil using soil water retention curve. *Acta Geotechnica*, 16, 3177-3186.
- Chen, Y., Withanage, K. R., Uchimura, T., Mao, W. & Nie, W. (2020). Shear deformation and failure of unsaturated sandy soils in surface layers of slopes during rainwater infiltration. *Measurement*, 149, 107001.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons.
- Güllü, H. & Giriskan, S. (2013). Performance of fine-grained soil treated with industrial wastewater sludge. *Environmental earth sciences*, 70, 777-788.
- Hamid, T. B. & Miller, G. A. (2009). Shear strength of unsaturated soil interfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 595-606.
- Laboratory, U. D. S. (2015). *Laporan Pnyelidikan Tanah Pada Penanganan Longsoran Banjarnegara-Wanayasa*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Liu, Y.-J., Wang, T.-W., Cai, C.-F., Li, Z.-X. & Cheng, D.-B. (2014). Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the Total Environment*, 485, 93-102.
- Ni, P., Mei, G. & Zhao, Y. (2018). Influence of raised groundwater level on the stability of unsaturated soil slopes. *International Journal of Geomechanics*, 18, 04018168.
- Niu, G., Cui, Y.-J., Pereira, J.-M., Shao, L. & Sun, D. A. (2021). Determining Bishop's parameter  $\chi$  based on pore-size distribution. *Géotechnique Letters*, 11, 74-79.
- Obasi, N. & Anyaegbunam, A. (2005). Correlation of the undrained shear strength. *Nigerian Journal of Technology*, 24, 1-11.
- Quirino, D. T., Casaroli, D., Jucá Oliveira, R. A., Mesquita, M., Pego Evangelista, A. W. & Alves Júnior, J. (2017). Evaluation of TRMM satellite rainfall estimates (algorithms 3B42 V7 & RT) over the Santo Antônio county (Goiás, Brazil). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 70, 8251-8261.
- Sadek, M. A., Chen, Y. & Liu, J. (2011). Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions. *Journal of Terramechanics*, 48, 451-458.
- Shen, Z., Jiang, M. & Thornton, C. (2016). Shear strength of unsaturated granular soils: three-dimensional discrete element analyses. *Granular matter*, 18, 1-13.
- Sreedeeep, S., Singh, D. N. & Asce, F. (2011). Critical review of the methodologies employed for soil suction measurement. *mechanics*, 11.
- Tamás, K., Jóri, I. J. & Mouazen, A. M. (2013). Modelling soil-sweep interaction with discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 134, 223-231.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44, 892-898.
- Zhou, A., Huang, R. & Sheng, D. (2016). Capillary water retention curve and shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 53, 974-987.