

ANALISIS NUMERIK KELONGSORAN LERENG SISI JALAN AKIBAT HUJAN Studi Kasus Keruntuhan Lereng Sisi Jalan Poros Sungguminasa-Sinjai, Km 109 Makassar

Muhammad Suradi¹⁾, Agus Setyo Muntohar²⁾, Farid Nur Bathi³⁾

¹⁾ Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

²⁾ Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

³⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

ABSTRACT

Every year during the rainy season, rainfall-induced failures of roadside slopes frequently occur in some parts of connecting roads among districts through hilly areas in South Sulawesi, Indonesia. These occurrences particularly endanger people on the roads, people living next to the slopes and distract traffic fluency through the roads. This research aimed at determining main factors triggering the slope failures. One of the sites, a main road connecting between Sungguminasa and Sinjai (both district cities), Km 109 from Makassar (capital city of South Sulawesi Province), was chosen as this research location. Field and laboratory soil testing were conducted to obtain soil parameters required to perform the analyses of the slope failure mechanisms. Rainfall data from the closest rain gauge station to the site were also collected to consider in the analyses. Numerical analyses using commercial software SV Flux coupled with SV Slope were performed to examine the slope failures triggered by rainstorms. The analyses revealed that a particular stratification of surface soils with silt layer (changing its thickness with the slope level, thicker layer into the slope crest) overlying clay layer existing at the roadside slope greatly contribute to the slope failure.

Keywords: *numerical analyses, rainfall, infiltration, slope failure, stratification of soils, connecting road*

1. PENDAHULUAN

Kelongsoran lereng menjadi salah satu dari bencana alam paling sering terjadi di dunia diantara yang lainnya seperti: angin tofan, banjir, letusan gunung berapi, gempa bumi dan tsunami (Alcantara-Ayala, 2002). Keruntuhan lereng ini sering terjadi selama musim hujan dan telah dipahami secara luas bahwa hujan merupakan faktor pemicunya. Pada dekade terakhir ini (2003 – 2010), kelongsoran lereng akibat hujan telah menunjukkan peningkatan dan tahun 2010 merupakan tahun terparah dengan korban meninggal dunia sebanyak 6211 orang yang disebabkan oleh 494 kelongsoran lereng akibat hujan dari seluruh penjuru dunia. Keruntuhan lereng sangat berbahaya khususnya jika kejadiannya dekat infrastruktur umum seperti kelongsoran lereng sisi jalan. Kejadian ini dapat membahayakan masyarakat yang bermukim di sekitar lereng bahkan kadangkala menyebabkan korban meninggal dunia dan seringkali mengganggu kelancaran lalu lintas jalan di sisi lereng tersebut yang menyebabkan kerugian ekonomi.

Banyak studi yang berkaitan dengan kelongsoran lereng akibat hujan seperti yang dilakukan oleh Brand et al. (1984) dan Rahardjo et al. (2007), telah menunjukkan kontribusi faktor-faktor penyebab kelongsoran lereng tersebut. Berdasarkan studi ini, kita dapat membagi 2 kelompok besar faktor penyebab kelongsoran lereng yaitu: hujan sebagai faktor pemicu dan karakteristik lereng sebagai faktor potensial. Hal ini lebih jauh menunjukkan bahwa hampir seluruh kelongsoran lereng dipicu oleh hujan ekstrim (deras dan/atau berkepanjangan). Kelongsoran lereng dangkal merupakan kejadian yang sangat umum selama musim hujan (Guzzetti et al., 2008). Sudah dipahami secara luas bahwa hujan awal berkontribusi besar terhadap kelongsoran lereng tanah dengan permeabilitas rendah tetapi berkontribusi kecil terhadap kelongsoran lereng tanah dengan permeabilitas tinggi (Rahardjo et al., 2008). Brand et al. (1984) secara khusus menunjukkan bahwa kelongsoran lereng di Hong Kong umumnya dipicu oleh hujan keras yang umumnya berdurasi singkat, sementara kelongsoran lereng di Singapura umumnya disebabkan oleh hujan intensitas rendah berkepanjangan (Rahardjo et al.(2007). Hal ini berkaitan dengan umumnya tanah lereng berpasir di Hong Kong yang cenderung merespon cepat hujan karena permeabilitasnya tinggi dan daya tampung airnya kecil. Sebaliknya lereng di Singapura umumnya dari tanah berlempung atau berlanau yang memiliki respon lambat terhadap curah hujan.

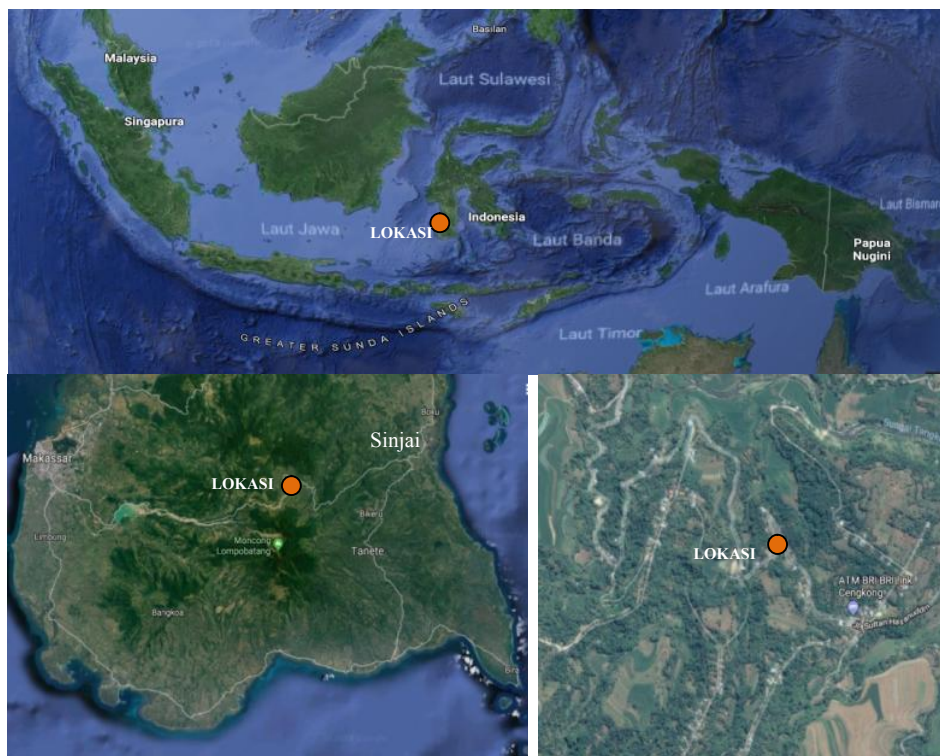
Sehubungan dengan interaksi hujan dengan tanah lereng, setiap kelongsoran lereng memiliki karakteristik khusus mekanisme kelongsorannya. Terdapat karakteristik khusus faktor penyebab yang

¹ Korespondensi penulis: Muhammad Suradi, Telp 081524002000, msuradi@poliupg.ac.id

berkontribusi terhadap kelongsoran lereng khususnya pada karakteristik hujan dan tanahnya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki faktor-faktor penyebab kelongsoran lereng tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Penyelidikan lapangan dan laboratorium dilakukan untuk mendapatkan parameter yang dibutuhkan dalam analisis kelongsoran lereng akibat hujan. Lokasi penyelidikan ini dipilih di sepanjang jalan penghubung antara Sungguminasa dan Sinjai, khususnya pada ruas jalan dimana kelongsoran lereng sisi jalan sering terjadi selama musim hujan, seperti pada Km 109 dari Makassar (Gambar 1). Suatu keruntuhan lereng yang terjadi pada musim hujan tahun sebelumnya dipilih sebagai lokasi untuk kajian lebih detail seperti terlihat pada Gambar 2. Kelongsoran yang terjadi di kaki lereng sisi jalan yang tanah tererosinya dominan berbutir halus. Lereng sisi jalan ini memiliki sudut kemiringan 30° , tinggi total sekitar 60 m dengan tumbuh-tumbuhan pada permukaan lereng yang dapat memperkuat lereng dan mencegah dari kelongsoran. Retak-retak permukaan tampak pada bahu lereng yang kemungkinan dapat menyebabkan kelongsoran lereng lebih besar akibat hujan yang lebih ekstrim lagi. Kelongsoran lereng seperti ini dapat menyebabkan bencana besar terhadap masyarakat yang bermukim dekat bahu dan kaki lereng serta pengendara kendaraan yang melewati jalan di bawah lereng tersebut.

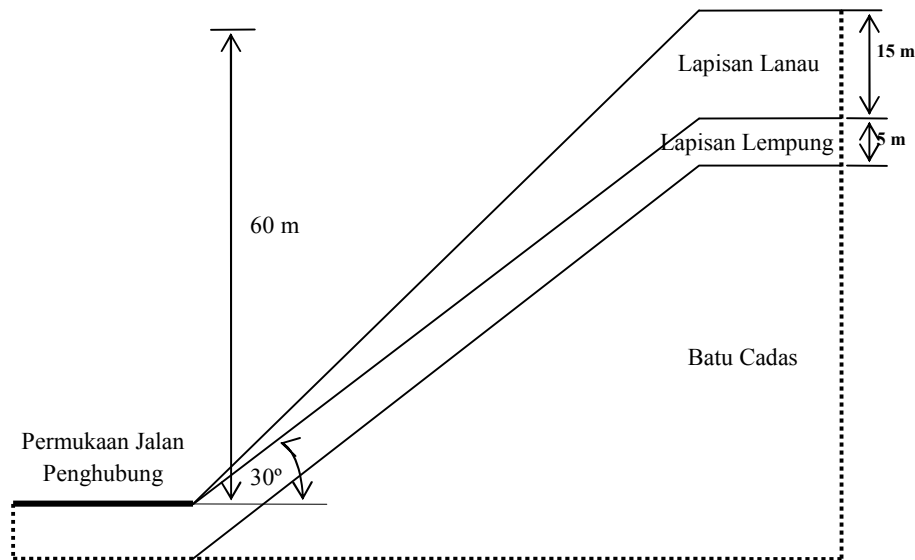


Gambar 1. Lokasi penyelidikan (Km 109 dari Makassar)

Tiga kelompok besar sifat-sifat tanah yang dikumpul dari uji lapangan dan laboratorium termasuk sifat-sifat indeks, hidrolis dan kuat geser. Pengeboran mesin dilakukan untuk menentukan perlapisan tanah dengan pembacaan SPT dan pengambilan sampel tanah.



Gambar 2. Foto kelongsoran lereng sebagai lokasi penelitian



Gambar 3. Geometri lereng longsor yang disederhanakan

1) Sifat-sifat indeks tanah

Sifat-sifat indeks tanah umumnya ditentukan melalui uji laboratorium dasar seperti kadar air, berat volume, berat jenis, analisa saringan dan Batas-batas Atterberg. Resume hasil-hasil uji laboratorium yang tertera pada Tabel 1. Sifat-sifat tanah ini biasanya digunakan untuk mengklasifikasikan tanah.

Tabel 1. Sifat-sifat indeks tanah

Lapisan tanah	w (%)	γ (kN/m ³)	G _s	Lolos #200 (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
Lapisan atas	42	17,8	2,20	51	50	41	9
Lapisan bawah	45	18,0	2,34	70	47	33	14

2) Sifat-sifat hidrolis tanah

Sifat-sifat hidrolis tanah diperoleh dari uji lapangan untuk menyelidiki infiltrasi air hujan ke dalam tanah lereng. Hasil pengujian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data kurva retensi air tanah

ψ (kPa)	1	5	10	20	50	100	200	300	500	800
θ	0,618	0,567	0,500	0,432	0,372	0,342	0,320	0,309	0,298	0,289

Suction awal $\psi_i = 42$ kPa dan kadar air volumetrik awal $\theta_i = 0,2$

Kadar air volumetrik jenuh $\theta_s = 0,618$

Kadar air volumetrik jenuh untuk lapisan atas $k_s = 10^{-5}$ m/s dan lapisan bawah $k_s = 10^{-7}$ m/det.

3) Sifat-sifat kuat geser tanah

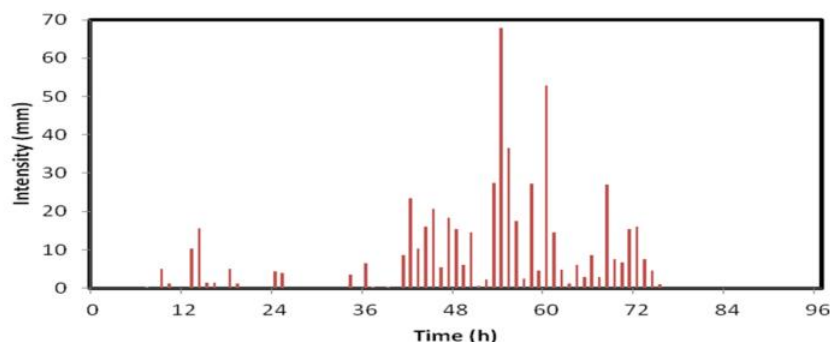
Parameter kuat geser tanah diperoleh dari uji geser langsung yang diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter kuat geser tanah

Lapisan tanah	c' (kPa)	ϕ' (°)	ϕ^b (°)
Lapisan atas	4	35	7
Lapisan bawah	30	30	6

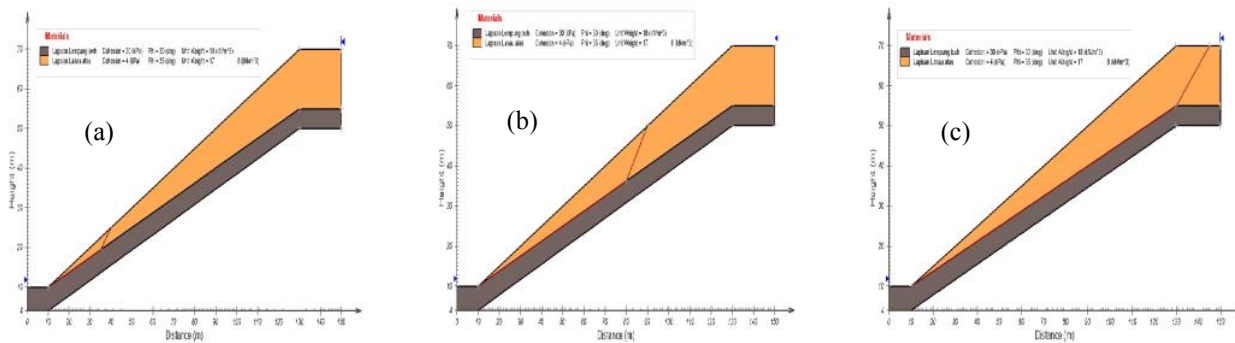
Pemodelan analisis dilakukan untuk menentukan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kelongsoran lereng. Analisis numerik gabungan antara rembesan dan kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan software komersial SVFlux dan SVSlope secara berturut-turut. Pada dasarnya ada 3 tahapan utama pemodelan analisis rembesan yaitu: mengeset geometri lereng, menentukan syarat-syarat batas dan sifat-sifat bahan. Sementara itu, pemodelan analisis kestabilan lereng utamanya mencakup pengesetan geometri lereng serta penentuan bidang longsor dan sifat-sifat bahan. Rincian tahap pemodelan analisis ini disajikan pada paket Manual Software Soil Vision khususnya SVFlux dan SVSlope.

Parameter masukan untuk analisis keruntuhan lereng termasuk data curah hujan sebagai parameter pemicu dan sifat-sifat tanah sebagai parameter potensial karakteristik lereng. Suradi (2015) menunjukkan bahwa curah hujan ekstrim sering memicu terjadinya banyak kelongsoran lereng. Meskipun curah hujan tinggi telah terjadi di berbagai penjuru dunia khususnya wilayah tropis, kemungkinan tidak selalu terekam dalam resolusi tinggi seperti curah hujan per jam. Data curah hujan umumnya berfluktuasi dan tinggi curah hujan relatif terhadap permeabilitas tanah menentukan besarnya infiltrasi air hujan ke dalam permukaan lereng. Oleh karena itu, penggunaan resolusi tinggi berperan penting dalam analisis kelongsoran lereng akibat hujan (Suradi et al., 2015). Akan tetapi resolusi tinggi data curah hujan tidak tersedia di sekitar lokasi penelitian ini sehingga data curah hujan ekstrim yang diperoleh dari Stasiun Sembawang, Sinagapura digunakan dalam analisis ini sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Data curah hujan per jam diperoleh dari Stasiun Sembawang 80, Desember 2006 (Pemerintah Singapura, 2011)

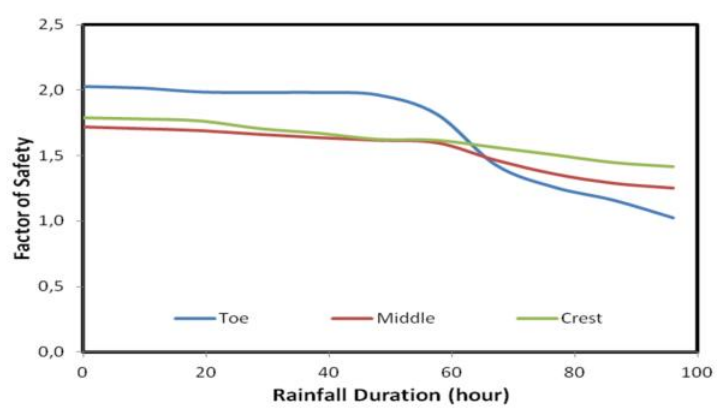
Berdasarkan mekanisme infiltrasi air hujan dan perlapisan tanah pada lereng tersebut, kelongsoran lereng akibat hujan dapat terjadi melalui berbagai bidang longsor berkaitan dengan tebal lapisan permukaan lereng *permeable* yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Kondisi jenuh dapat tercapai lebih awal pada lapisan tanah di sekitar kaki lereng dari pada di sekitar bahu lereng, yang menyebabkan kelongsoran lereng di sekitar kaki lereng. Oleh karena itu, 3 posisi bidang longsor yang berbeda pada lereng sisi jalan ditentukan seperti pada Gambar 5 untuk mengevaluasi kelongsoran lereng akibat hujan.



Gambar 5. Penerapan 3 bidang longsor berbeda, mulai dari kaki lereng (a), pertengahan lereng (b), dan bahu lereng (c), dalam analisis kelongsoran lereng tersebut

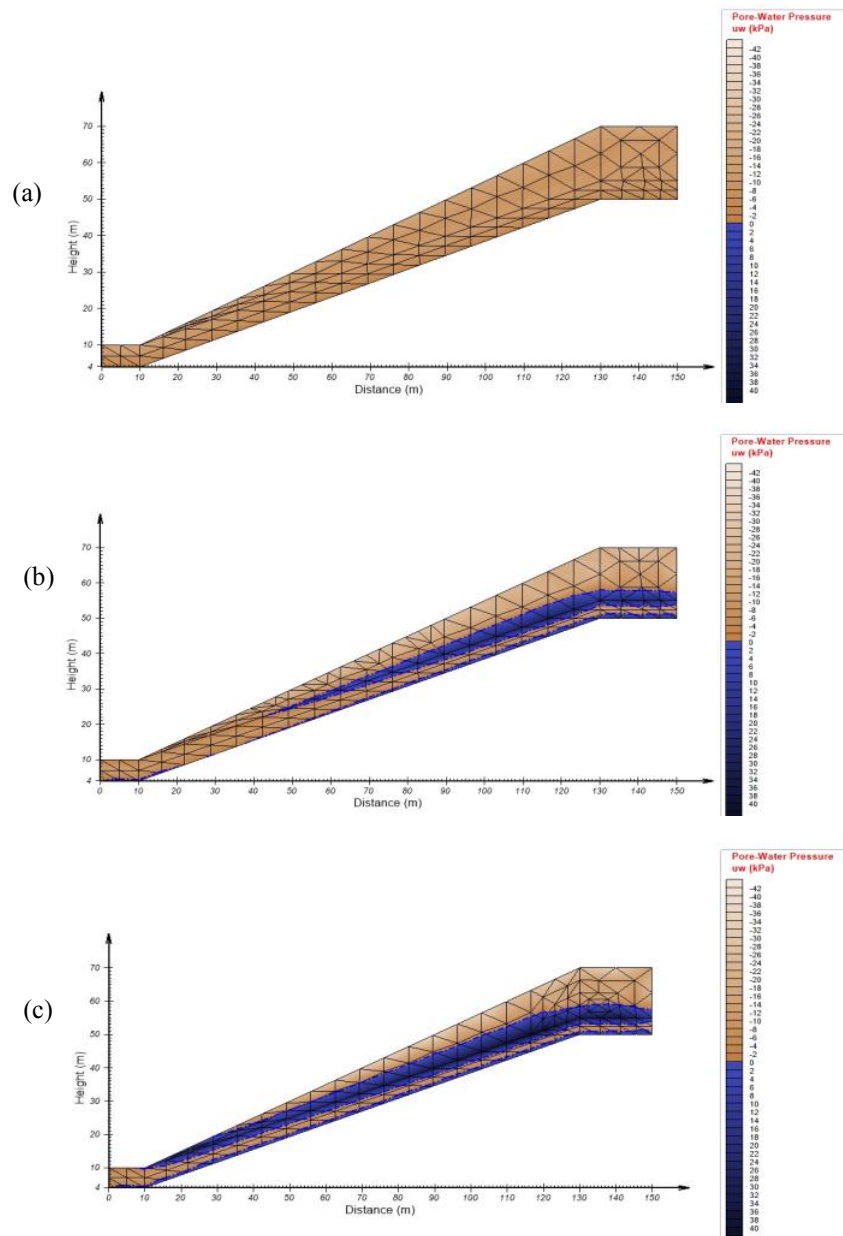
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan curah hujan ekstrim pada lereng dengan ketebalan lapisan tanah permukaan yang berubah sepanjang lereng (ketebalan berkurang ke arah kaki lereng) menunjukkan pengaruh berbeda terhadap kelongsoran lereng sebagaimana faktor keamanan yang ditunjukkan pada Gambar 6. Faktor keamanan awal lereng terhadap kelongsoran akibat hujan untuk kasus yang ditunjukkan pada Gambar 6b dan 6c (massa tanah longsor yang berat) agak lebih rendah ($F = 1,7$) dari yang ditunjukkan pada Gambar 6a (massa tanah longsor yang ringan) ($F = 2,0$). Faktor keamanan berkurang secara perlahan dengan bertambahnya infiltrasi air hujan ke dalam lereng selama durasi hujan 100 jam untuk kasus pada Gambar 6c. Begitu pula 55 jam pertama hujan menyebabkan sedikit penurunan faktor keamanan, kemudian periode tersisa menyebabkan penurunan signifikan faktor keamanan. Infiltrasi dari curah hujan ekstrim tidak cukup untuk memicu kelongsoran lereng sebagaimana ditunjukkan untuk kasus pada Gambar 6b dan 6c. Akan tetapi faktor keamanan menurun signifikan akibat infiltrasi air hujan untuk kasus pada Gambar 6a hingga kelongsoran lereng terjadi setelah 4 hari hujan ($F = 1$).



Gambar 6. Variasi faktor keamanan terhadap durasi hujan pada 3 posisi bidang longsor yang berbeda (kaki, pertengahan dan bahu lereng)

Analisis kestabilan lereng yang diterpa hujan menunjukkan bahwa lereng tetap stabil (tidak terjadi kelongsoran lereng) selama periode hujan ekstrim meskipun faktor keamanan lereng berkurang akibat infiltrasi air hujan ke dalam lereng untuk kedua kasus yang ditunjukkan pada Gambar 9b dan 9c, bahkan berkurang secara signifikan untuk kasus 6b. Pada kasus ini, relatif sedikit jumlah air hujan berinfiltrasi ke dalam lereng berkaitan dengan volume massa tanah permukaan, sehingga tidak cukup untuk memicu kelongsoran lereng seperti ditunjukkan pada Gambar 7b dan 7c. Akan tetapi infiltrasi air hujan dapat membuat tanah permukaan cukup jenuh di sekitar kaki lereng sehingga menyebabkan kelongsoran lereng sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7a.



Gambar 7. Kontur tekanan air pori pada tanah permukaan lereng untuk 3 tahap periode hujan yang berbeda: awal (a), pertengahan (b) dan akhir (c)

Penelitian sebelumnya (Brand et al., 1984; Fourie, 1996) telah menunjukkan bahwa hujan awal berkontribusi signifikan terhadap kelongsoran lereng yang tanahnya dominan berbutir halus seperti lempung dan lanau. Sebaliknya curah hujan deras berpotensi menyebabkan kelongsoran lereng yang tanahnya dominan berpasir. Kelongsoran lereng seringkali terjadi selama hujan ekstrim apakah hujan intensitas rendah berkepanjangan atau hujan deras berdurasi singkat (Suradi et al., 2016). Oleh karena itu, menarik untuk diteliti lebih jauh kemungkinan interaksi antara hujan dan tanah lereng yang dapat menyebabkan kelongsoran yang lebih besar seperti kasus pada Gambar 5b dan 5c.

4. KESIMPULAN

Analisis numerik telah membuktikan kelongsoran lereng sisi jalan penghubung Sungguminasa-Sinjai, Km 109 dari Makassar, dan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kelongsoran lereng tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Ketebalan lapisan tanah permukaan lereng berubah sepanjang lereng (ketebalannya berkurang ke arah kaki lereng) membawahi lapisan lempung yang relatif kedap air. Curah hujan dapat membuat tanah permukaan di sekitar kaki lereng jenuh lebih awal dari bagian lainnya yang dapat menyebabkan kelongsoran lereng.
- 2) Curah hujan ekstrim dapat menjenuhkan tanah permukaan lereng yang cukup *permeable* (tanah berlanau) hanya di sekitar kaki lereng.
- 3) Tanah permukaan plastisitas rendah (tanah berlanau) memiliki kuat geser rendah untuk menahan kelongsoran lereng yang disebabkan oleh curah hujan.
- 4) Curah hujan yang lebih ekstrim, hujan deras berkepanjangan, dapat menyebabkan seluruh tanah permukaan sepanjang lereng dari bahu hingga kaki lereng menjadi jenuh yang dapat menimbulkan kelongsoran lereng lebih besar dan memberikan dampak kerusakan dan korban lebih besar pula. Oleh karena itu, menarik untuk dikembangkan penelitian ini lebih jauh tentang interaksi hujan dan tanah yang dapat memicu kelongsoran lereng seperti ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Alcantara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability, and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*. 47:107-124.
- Brand, E.W., Premchit., J. and Phillipson, H.B. (1984). Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides*. Toronto, Canada. 1:377-384.
- Campbell, G.S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*. 117:311-314.
- Cho, S.E., and Lee, S.R. (2002). Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 128(9): 756-763.
- Fourie, A.B. (1996). Predicting rainfall-induced slope instability. *Proceedings of Institutional Civil Engineer, Geotechnical Engineering*. 119:211-218.
- Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*. 31:521-532.
- Fourie, A.B., Rowe, D. and Blight, G.E. (1999). The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. *Geotechnique*. 49(1):1-13.
- Gavin, K., and Xue, J. (2008). A simple method to analyse infiltration into unsaturated soil slopes. *Computers and Geotechnics*. 35: 223-230.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Landslides*. 5:3-17.
- Muntohar, A.S., Ikhsan, J. and Liao, H.J. (2013). Influence of rainfall patterns on the instability of slopes. *Civil Engineering Dimension*. 15(2):120-128.
- Petley, D. (2014). The Landslide Blog. AGU (American Geophysical Union) Blogosphere. Available from blogs.agu.org (accessed 19 February 2014).
- Pradel, D., and Raad, G. (1993). Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*. 119(2):315-332.
- Rahardjo, H., Leong, E.C., and Rezaur, R.B. (2008). Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall. *Hydrological Processes*. 22:506-503.
- Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leong, E.C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes during rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*:1532-1543.
- Singaporean Government, National Environment Agency (2011). Hourly Rainfall Data for Sembawang (Station 80) 2006.
- Suradi, M. (2015). Rainfall-induced failures of natural slopes in tropical regions. Ph.D. Thesis, The University of Western Australia.
- Suradi, M., Fourie, A.B. and Hasan, A. (2015). The role of rainfall resolution in slope failure mechanism. *International Conference on Landslides and Slope Stability*. Bali, Indonesia:
- Suradi, M., Fourie, A.B. and Saynor, M.J. (2016). An experimental and numerical study of a landslide triggered by an extreme rainfall event in northern Australia. *Landslides*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 13(5):1125-1138.
- Tholin, A.L., and Kiefer, C.J. (1959). The hydrology of urban runoff. *Proceedings of ASCE Journal Sanitary Engineering Division*. 84 (SA2): 56.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi atas pemberian bantuan riset kompetitif ini dengan skema Penelitian Pasca-Doctor (PPD). Terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya pula kepada Pimpinan Politeknik Negeri Ujung Pandang khususnya Unit Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (UPPM) atas dukungan dan bantuannya dalam pelaksanaan penelitian ini.