

Pengaruh Retak dan Pelapukan Tanah Terhadap Potensi Kelongsoran Saat Hujan Dengan Uji ERT, IP dan Pemodelan Numerik

The Effect of Cracks and Soil Weathering on Landslide Potential During Rain with ERT, IP and Numerical Modeling Tests

Putu Tantri K.Sari¹⁾, Mila Kusuma Wardani²⁾

¹⁾Departement Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Kampus ITS Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur tantrigeoteknik@gmail.com

²⁾Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya Jl. Arief Rahman Hakim No.100, Klampis Ngasem, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60117 milakusuma@itats.ac.id

Abstrak

Tanah longsor terjadi di daerah perbukitan Tulakan-Pacitan, Jawa Timur. Lokasi longsor berada tepat di bawah tiang SUTT untuk area Jawa dan Bali. Kelongsoran terjadi saat musim hujan dengan intensitas hujan mencapai 1000 mm/bulan dan intensitas maksimal yaitu 300 mm/hari. Pengamatan geoteknik serta pengamatan geofisik yaitu Electrical Resistivity Tomography (ERT) dan Induced Polarization (IP) telah dilakukan di lapangan. Pengujian geoteknik menyatakan bahwa, kondisi tanah di area perbukitan di sekitar kelongsoran adalah cenderung baik. Hasil uji ERT dan IP menunjukkan bahwa terdapat lapisan tanah yang mengalami pelapukan dan retakan yang cenderung dalam di area kelongsoran. Kondisi tanah yang lapuk dan retak tersebut tidak tertangkap pada hasil pengujian geoteknik yang telah dilakukan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui penyebab kelongsoran di lapangan khususnya di area perbukitan dengan kondisi tanah yang dominan baik namun mengalami pelapukan dan retak pada tanah. Pemodelan numerik dengan *coupled program* limit equilibrium (LEM) dan finite element (FEM) dilakukan dengan memodelkan adanya pelapukan tanah dan retak pada tanah. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa retak dan pelapukan pada tanah di lokasi kelongsoran ini dapat menurunkan kestabilan lereng saat terjadinya hujan lebat. Jumlah retak dan nilai parameter *seepage* pada tanah yang melapuk juga dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng hingga menyebabkan terjadinya kelongsoran.

Kata Kunci: Longsor, intensitas hujan, retak pada tanah, *Limit equilibrium method*, *seepage* pada tanah.

Abstract

Landslides occurred in the hilly area of Tulakan-Pacitan, East Java. The landslide location is right under the supplies electricity tower to the Java and Bali. The landslide occurred during the rainy season that the intensity reached 1000 mm/month and the maximum was 300 mm/day. Geotechnical observations and geophysical observations, Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Induced Polarization (IP) have been carried out. Geotechnical testing stated that the soil conditions in the hilly area around the landslide tended to be good. The results of the ERT and IP tests showed that there were layers weathering and cracks in the landslide area. The weathered and cracked soil conditions were not captured in geotechnical tests. This study was conducted to determine the causes of landslides, in hilly areas with predominantly good soil but experiencing weathering and cracks. Numerical modeling based on limit equilibrium (LEM) and finite element (FEM) was carried out by modeling the presence of soil weathering and cracks. The results of this study indicate that the presence of soil cracks and weathering can reduce slope stability, especially during heavy rain. The number of cracks and the seepage parameter in weathered soil can also affect the stability of a slope, causing landslides.

Keyword: *landslide, rainfall intensity, crack soil, limit equilibrium method, soil seepage*

PENDAHULUAN

Tanah longsor di Desa Tulakan, Pacitan, Jawa Timur pada awal Desember 2017, disebabkan oleh hujan deras yang berlangsung beberapa hari sebelumnya. Kabupaten Pacitan berada di ujung barat daya Jawa Timur dan berbatasan dengan beberapa kabupaten lain, yaitu Ponorogo, Wonogiri (Jawa

Tengah), Trenggalek, dan Samudra Hindia. Daerah ini terdiri dari wilayah karst yang merupakan bagian dari Pegunungan Sewu dengan muka air tanah yang rendah, menjadikannya rentan terhadap tanah longsor, terutama di daerah perbukitan seperti Desa Tulakan.

Menurut peta geologi yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi pada tahun 1999, geologi di Pacitan sangat bervariasi.

Lokasi longsor berada pada formasi geologi Lava Oligo Miosen dan Sedimen Miosen Tengah yang terdiri dari berbagai jenis batuan seperti lava bantal basaltik, batupasir, batulempung, rijang, dan lainnya. Berdasarkan peta potensi longsor dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Badan Geologi, daerah tersebut memiliki potensi longsor yang berkisar dari sedang hingga tinggi. Kejadian longsor di lokasi ini juga menyebabkan pergeseran pondasi menara listrik tegangan tinggi yang berada di dekat lokasi longsor.



Gambar 1. Lokasi kelongsoran di bawah tower SUTT Listrik.

Jika tidak segera diambil tindakan untuk mengantisipasi tanah longsor di masa mendatang, pasokan listrik ke beberapa daerah di Jawa Timur bisa terancam. Lokasi longsor di Desa Tulakan adalah daerah perbukitan yang jarang penduduknya, namun memiliki sejarah tanah longsor kecil yang sebelumnya dianggap tidak perlu tindakan khusus. Namun, longsor baru-baru ini lebih dalam dan terjadi di dekat sumber listrik utama, sehingga membutuhkan penanganan yang lebih serius.

Untuk memahami penyebab longsor ini, beberapa uji lapangan telah dilakukan, termasuk Uji Penetrasi Standar (SPT-N) dan metode geofisika seperti resistivitas dan induced polarisasi. Selain itu, uji laboratorium, seperti uji volumetrik-gravimetri dan uji un-confined, dilakukan untuk mengidentifikasi parameter tanah. Pengukuran topografi juga dilakukan di berbagai lokasi untuk menentukan kontur lereng, yang berguna untuk analisis stabilitas lereng saat ini dan di masa mendatang.

Dari data curah hujan yang diperoleh dari tiga stasiun hujan terdekat, diketahui bahwa wilayah Pacitan mengalami curah hujan yang sangat tinggi pada bulan November sebelum tanah longsor terjadi. Curah hujan bulanan melebihi 1000 mm, dengan intensitas mencapai 300 mm per hari pada akhir bulan. Curah hujan yang tinggi ini diduga menjadi

penyebab utama tanah longsor, diperparah oleh kondisi tanah yang lapuk dan retak.

Pengujian tanah di lapangan dilakukan di empat lokasi berbeda, tiga di antaranya berada dalam satu garis lurus dengan lokasi longsor. Hasil Uji Penetrasi Standar (SPT-N) menunjukkan bahwa sebagian besar kondisi tanah dicirikan oleh lapisan tanah keras dengan nilai SPT-N yang tinggi. Pada kedalaman dangkal hingga sekitar 10 meter, lapisan tanah kohesif keras teridentifikasi, sementara lapisan yang lebih dalam terdiri dari material tidak kohesif dan berbatu. Di lokasi longsor, tanah diklasifikasikan menjadi empat lapisan: lapisan pertama terdiri dari lempung lanau, lapisan kedua dari lempung, lapisan ketiga dari lempung keras lanau, dan lapisan keempat berupa batu.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami mekanisme tanah longsor yang terjadi di Tulakan, Pacitan, Jawa Timur. Analisis difokuskan pada pengaruh parameter tanah, keberadaan retakan dan pelapukan, serta fluktuasi intensitas curah hujan terhadap stabilitas lereng. Untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif, penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan coupled program 2-dimensi SEEP/W dan SLOPE/W.

SEEP/W digunakan untuk menganalisis pola rembesan dan kondisi hidrologi tanah, sedangkan SLOPE/W digunakan untuk menilai stabilitas lereng berdasarkan data tanah dan parameter hidrologi yang dihasilkan. Kombinasi kedua program ini memungkinkan peneliti untuk mensimulasikan interaksi antara air, tanah, dan lereng, termasuk bagaimana perubahan intensitas curah hujan mempengaruhi kondisi rembesan dan, pada akhirnya, stabilitas lereng tersebut (GEO-SLOPE International Ltd, 2008). Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme longsor di Tulakan, serta membantu dalam merancang langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif untuk mencegah longsor di masa depan.

METODE

Model numerik profil lereng dibuat berdasarkan kondisi lapangan, meliputi topografi, lapisan bawah permukaan, dan kondisi hidrologi di lokasi longsor. Analisis dilakukan dengan berbagai pendekatan, termasuk analisis rembesan akibat hujan dan stabilitas lereng, menggunakan Finite Element Method (FEM) dan metode Limit Equilibrium Method (LEM). Analisis dilakukan dalam dua skenario, yaitu dengan dan tanpa mempertimbangkan retakan permukaan dan lapisan tanah yang lapuk.

Dalam analisis rembesan menggunakan FEM, dilakukan perhitungan tekanan air pori pada tanah.

Selanjutnya, analisis LEM digunakan untuk menghitung faktor keamanan (SF) sepanjang permukaan bidang longsor prediksi. Studi ini menekankan pada pemodelan rembesan air hujan pada tanah, dengan tujuan untuk menunjukkan metode pengintegrasian rembesan ke dalam analisis stabilitas lereng.

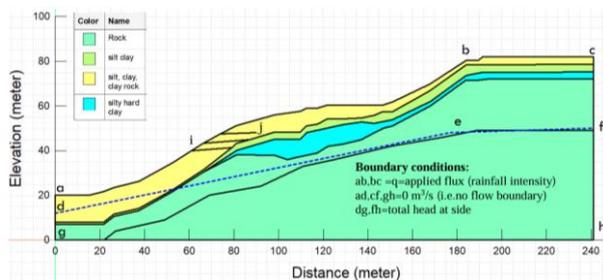
Beberapa faktor yang dianalisis meliputi variasi muka air tanah, konduktivitas hidrolik tanah, kadar air volumetrik, dan faktor keamanan dari massa tanah longsor akibat rembesan yang disebabkan oleh curah hujan (Sangrey dkk (1984), Jianping dkk

(2009), Bronnimann (2011)). Analisis ini menggunakan kondisi batas yang didasarkan pada studi sebelumnya seperti Rahimi (2011), Lin (2016), dan Sari (2023), sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2. Variasi muka air tanah yang digunakan dalam penelitian ini juga divisualisasikan dalam Gambar 3. Dengan menggabungkan metode FEM dan LEM, penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme longsor di lereng, serta mengevaluasi efektivitas berbagai teknik mitigasi dalam menurunkan risiko longsor.

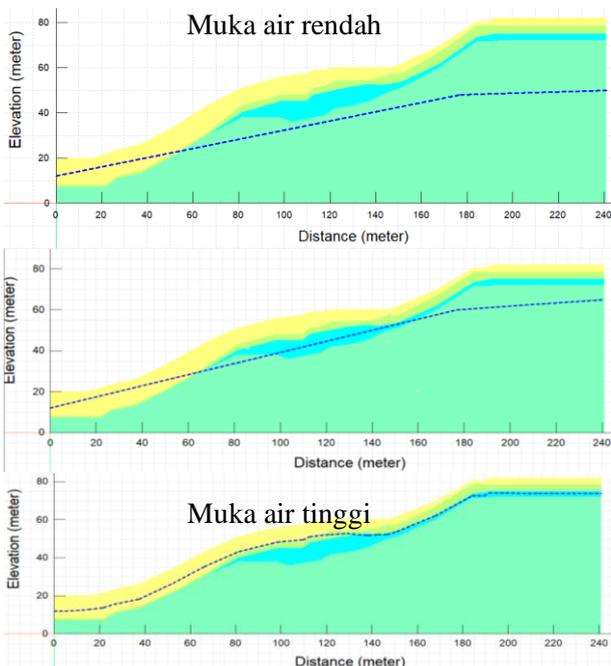
diperoleh melalui korelasi dengan data tanah di lapisan yang tidak memiliki data lengkap. Hasil dari pengujian ini memberikan gambaran mengenai berbagai parameter tanah yang penting untuk analisis stabilitas lereng.

Rentang parameter geoteknis yang ditemukan pada setiap lapisan tanah adalah sebagai berikut:

- Kohesi efektif (c'): 0–90 kPa
- Sudut gesekan internal efektif (ϕ'): 1–40°
- Berat satuan tanah (γ): 17–19 kN/m³



Gambar 2. Kondisi batas yang digunakan dalam analisa numerik



Gambar 2. Variasi muka air tanah

HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN

Hasil analisa berdasarkan pengujian di lapangan

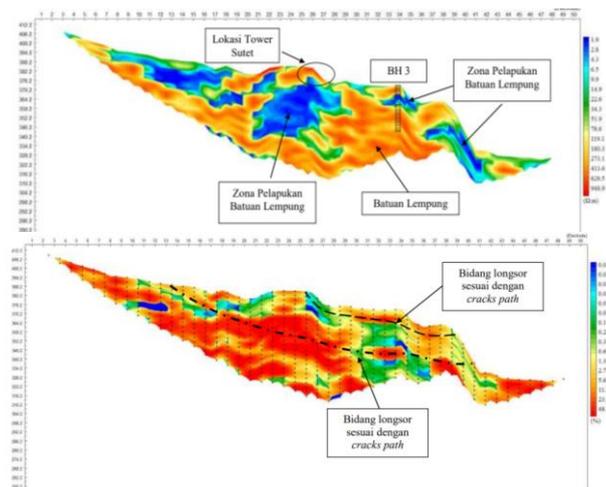
Pengujian geoteknis dan pengujian Electrical Resistivity Tomography (ERT) serta Induced Polarization (IP) telah dilakukan di lapangan untuk memperoleh data yang mendetail mengenai kondisi tanah di lokasi longsor (Alexsander dkk (2017), Alexander dkk (2019)). Data geoteknis lapangan

Rekapitulasi lengkap dari data tanah untuk setiap lapisan ditunjukkan pada Tabel 1, yang mencakup informasi penting seperti jenis tanah, nilai kohesi, sudut gesekan, dan parameter lainnya. Parameter retak vertikal pada tanah dan tanah yang melapuk adalah berdasarkan Gofar dkk (2006), Suryo (2012) dan Sari dkk (2024). Data ini digunakan untuk analisis lebih lanjut dalam pemodelan lereng dan evaluasi stabilitasnya, terutama untuk menilai faktor keamanan dan potensi longsor di masa depan. Parameter geoteknis ini akan menjadi dasar dalam pemodelan numerik dan simulasi menggunakan FEM dan LEM untuk memahami perilaku lereng dan pengaruh kondisi hidrologi terhadap stabilitas lereng.

Tabel 1. Parameter tanah yang digunakan dalam analisa

lapis	Jenis tanah	γ_{soil} (Kn/m ³)	ϕ'	Cu (Kpa)	Ksat (m/s)	n
1	Lempung berlanau dengan batuan lempung	17	1	50	2.34×10^{-8}	0.53
2	Lempung berlanau	17	1	70	2.3×10^{-8}	0.53
3	Lempung kaku berlanau	17.3	1	90	2.13×10^{-8}	0.53
4	Batuan	19	40	0	2.3×10^{-8}	0.33
5	Retak vertikal	15	0	0	0.01	0.53
6	Lapisan yang melapuk	15	17.5	5.4	0.001	0.43

Selain pengujian geoteknik, telah dilakukan pengujian ERT dan IP seperti dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat area yang memiliki nilai resistivity yang rendah yang berdasarkan penelitian yang ada (Sudha dkk (2009), Ghazali (2013), Ronning et al. (2014)) merupakan lapisan tanah yang melapuk. Selain itu, dari hasil pengujian induced polarisasi diketahui bahwa terdapat area yang dicurigai merupakan retakan tanah yang menyebabkan terjadinya



Gambar 3. Hasil pengujian *resistivity* dan *induced polarisasi*

Hasil analisa dari pemodelan numerik

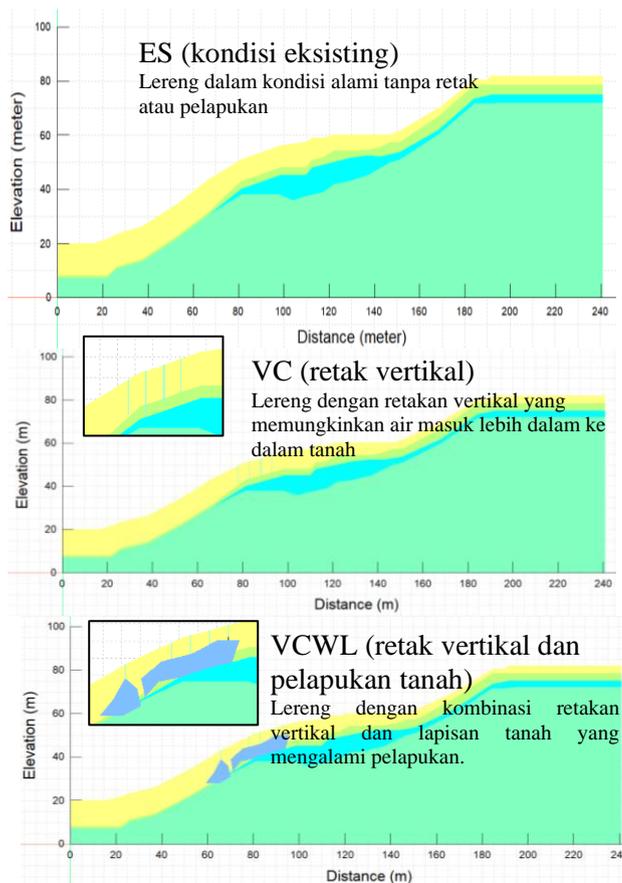
Analisis menggunakan program gabungan SEEP/W dan SLOPE/W dilakukan untuk memahami pengaruh rembesan air hujan terhadap perubahan faktor keamanan (safety factor) dan kestabilan lereng. Pengamatan difokuskan pada tiga kondisi lereng yang berbeda. Ilustrasi dari ketiga kondisi lereng ini dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan hasil analisis kestabilan lereng untuk masing-masing kondisi ditunjukkan pada Gambar 5. Analisis ini menghasilkan beberapa temuan penting:

- Pengaruh muka air tanah: Semakin tinggi muka air tanah, nilai faktor keamanan lereng semakin kecil. Ini menunjukkan bahwa keberadaan air di dalam tanah memiliki dampak negatif terhadap kestabilan lereng.
- Pengaruh curah hujan: Faktor keamanan lereng berkurang seiring dengan hujan yang berlangsung selama sehari-hari, yang menyebabkan peningkatan rembesan air dan saturasi tanah.
- Pengaruh retakan: Keberadaan retakan di permukaan tanah cenderung menurunkan faktor keamanan lereng. Retakan

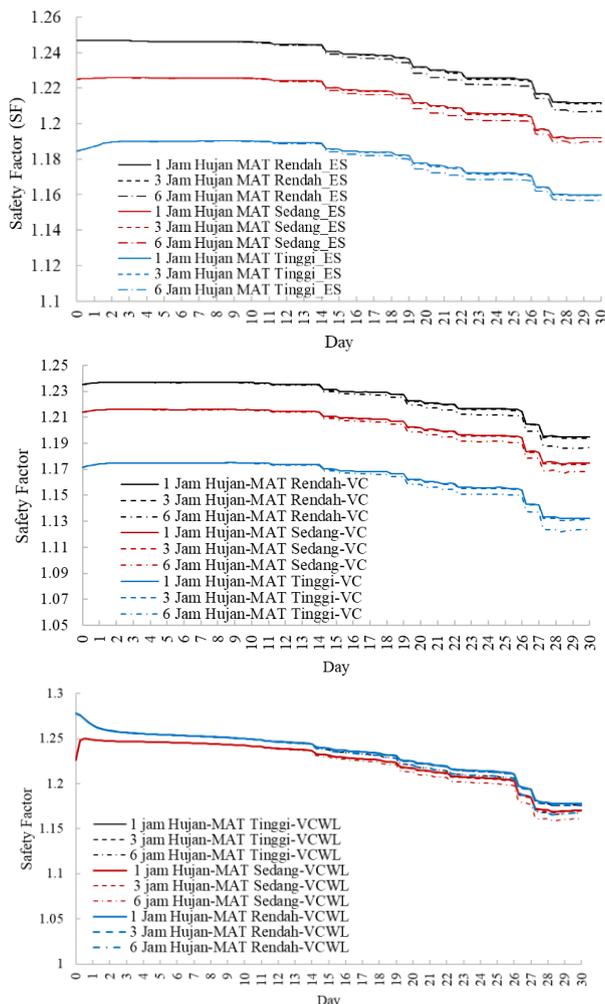
kelongsoran di lapangan (Alexander (2017)). Retak pada tanah dapat menyebabkan perubahan parameter geser tanah hingga menyebabkan penurunan stabilitas suatu lereng dan berakibat pada terjadinya kelongsoran (Hutagamisufardal (2018), Amalia dkk (2020), Alexander (2018)). Retak pada tanah dibarengi dengan intensitas hujan yang tinggi dan parameter rembesan tanah yang tinggi menyebabkan penurunan suatu angka keamanan lereng (Sari dan Mochtar (2022)).

memungkinkan air hujan meresap lebih cepat ke dalam tanah, meningkatkan tekanan air pori dan mengurangi kestabilan lereng.

- Pengaruh pelapukan: Lereng dengan lapisan tanah yang melapuk menunjukkan faktor keamanan yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi yang hanya memiliki retakan. Namun, hasil ini diduga dipengaruhi oleh parameter lapisan tanah yang melapuk yang mungkin belum sepenuhnya disesuaikan dengan kondisi lapangan.



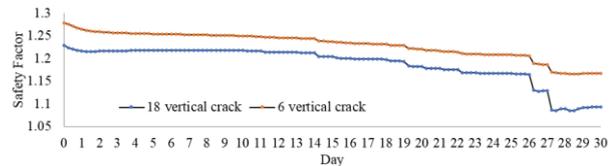
Gambar 4. Ilustrasi dari ketiga kondisi lereng



Gambar 5. Hasil analisis kestabilan lereng untuk masing-masing kondisi

Berdasarkan hasil analisis numerik ini, dapat disimpulkan bahwa keberadaan retakan pada tanah merupakan faktor utama yang memicu penurunan faktor keamanan lereng. Retakan memungkinkan air hujan masuk dan merembes melalui retakan, membentuk jebakan air pada lapisan bawah permukaan, yang dapat mempercepat proses pelapukan tanah. Seiring waktu, hal ini menyebabkan penurunan angka keamanan lereng hingga akhirnya terjadi kelongsoran. Semakin banyak retakan pada permukaan tanah, semakin rendah nilai safety factor lereng, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Adanya retakan tanah inilah yang menyebabkan kelongsoran di area study mengingat kondisi tanah dari hasil pengujian geoteknik adalah dominan tanah keras dan berbatu. Adanya retak permukaan yang merupakan jalan air untuk merembes masuk ke lapisan yang lebih dalam menyebabkan terjadinya pelapukan-pelapukan tanah di lapisan tanah yang lebih dalam. Adanya pelapukan dan prediksi retak baru dapat diketahui dari hasil pengujian ERT dan IP yang telah dilakukan di lokasi study ini.



Gambar 6. Semakin banyak retakan pada permukaan tanah, semakin rendah nilai *safety factor* lereng

KESIMPULAN

Kelongsoran dilokasi study terjadi pada daerah perbukitan yang memiliki kondisi tanah yang cenderung baik berdasarkan hasil uji geoteknik dimana semestinya tidak mengalami kelongsoran. Namun, berdasarkan hasil pengujian geofisika yaitu ERT dan IP, menunjukkan bahwa di lokasi kelongsoran terdapat lapisan tanah yang retak dan mengalami pelapukan tanah. Adanya retak dan pelapukan pada tanah tidak terbaca dari hasil pengujian geoteknik di lapangan. Analisa numerik yang dilakukan dengan coupled program SEEP/W dan SLOPE/W berdasarkan hasil uji geofisik dan geoteknik menunjukkan bahwa, adanya retak pada tanah dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng saat musim hujan.

Penurunan safety factor dapat terjadi apabila terdapat retak di permukaan tanah. Semakin banyak jumlah retak, maka semakin rendah nilai safety factor yang terjadi. Hujan deras di hari ke-26 pengamatan dengan intensitas 300 mm/hari dapat menurunkan nilai safety factor dari SF=1.2 menjadi SF=1.1. Dari hasil pengamatan di lapangan dan analisa numerik membuktikan bahwa adanya retak pada tanah dapat menjadi jalan bagi air hujan untuk merembes masuk ke lapisan yang lebih dalam sehingga dapat memicu terjadinya pelapukan serta dapat menurunkan safety factor pada slope khususnya saat terjadinya hujan lebat. Selain itu, jumlah retak pada tanah dan nilai parameter seepage pada tanah yang melapuk juga dapat mempengaruhi kestabilan suatu lereng hingga menyebabkan terjadinya kelongsoran.

Study ini menunjukkan bahwa, kelongsoran yang terjadi pada area perbukitan dengan kondisi tanah yang cukup baik dari hasil pengamatan geoteknik seperti yang terjadi di lokasi study dapat disebabkan oleh adanya retak di permukaan tanah dan pelapukan tanah. Gabungan pengamatan dengan geofisik diperlukan untuk mengetahui adanya retak dan pelapukan pada suatu slope untuk mengantisipasi adanya kelongsoran khususnya saat musim hujan.

REFERENSI

- A. Rahimi, H. Rahardjo, and E.-C. Leong, 2011, "Effect of antecedent rainfall patterns on

- rainfall - induced slope failure Effect of Antecedent Rainfall Patterns on Rainfall-Induced Slope Failure,” *ASCE J. Geotech. Eng. Div.*, vol. 137.
- C. S. Bronnimann, 2011, “Effect of Groundwater on Landslide Triggering,”
- D. Lin, S. Hung, C. Ku, and H. Chan, 2016, “Evaluating the Efficiency of Subsurface Drainages for Li-Shan Landslide in Taiwan,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, vol. 1, no. January, pp. 1–22.
- D. A. Sangrey, W. Harrop, and J. A. Klaiber, 1984, “Predicting Ground-Water Response to Precipitation,” *J. Geotech. Eng.*, vol. 110, no. 7.
- D. Amalia, P. N. Bandung, I. B. Mochtar, and N. E. Mochtar, 2018, “Penerapan Konsep Baru Cracked Soils Pada Penanggulangan Kelongsoran Lereng (Studi Kasus : Pembangunan Gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan),” no. August.
- E. A. Suryo, 2013, “Real-time Prediction of Rainfall Induced Instability of Residual Soil Slopes Associated with Deep Cracks,”
- Hutagamissufardal, I. B. Mochtar, and N. E. B. Mochtar, 2018, “The Effect of Soil Cracks on Cohesion and Internal Friction Angle at Landslide,” *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–5.
- K. Sudha, M. Israil, S. Mittal, J. Rai, 2009, “Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations”, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 67, Issue 1 , Pages 74-79,
- M. A. Ghazali, A. G. Rafek, K. Desa, and S. Jamaluddin, 2013, “Effectiveness of Geoelectrical Resistivity Surveys for the Detection of a Debris Flow Causative Water Conducting Zone at KM 9 , Gap-Fraser ’ s Hill Road (FT 148), Fraser ’ s Hill , Pahang , Malaysia,” *J. Geol. Res.*
- N. Gofar, L. M. Lee, and M. Asof, 2006, “Transient Seepage and Slope Stability Analysis for Rainfall-Induced Landslide: A Case Study,” *Malaysian J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–13.
- P. T. K. Sari and I. B. Mochtar, 2023, “Causes of Landslides in Road Embankment with Retaining Wall and Pile Foundation : A Case Study of National Road Project in Porong-Sidoarjo , Indonesia,” *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 42–48.
- P. T. K. Sari and I. B. Mochtar, 2024, “Special Case on Landslide in Balikpapan , Indonesia Viewed from Crack Soil Approach,” *KSCE J Civ Eng* 28, 2173–2188.
- P. T. K. Sari, Y. Lastiasih, I. B. Mochtar, and Soewarno, 2023, “The Effect of Changes in Rainfall Patterns due to Climatic Change on the Cutting Slope Stability of Landslides Case in East Java , Indonesia,” in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1276 (2023) 012049 IOP, pp. 1–9.
- P. T. K. Sari, I. B. Mochtar, and S. Chaiyaput, 2023, “Effectiveness of Horizontal Sub - drain for Slope Stability on Crack Soil Using Numerical Model,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 41, no. 8, pp. 4821–4844.
- Rønning, J.S., Ganerød, G.V., Dalsegg, E. et al, 2014 “Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model”. *Bull Eng Geol Environ* 73, 1225–1244.
- S. U. N. Jianping, L. I. U. Qingquan, L. I. Jiachun, and A. N. Yi, 2009, “Effects of rainfall infiltration on deep slope failure,” *Sci. China Ser. G Physics, Mech. Astron.*, vol. 52, no. 2002.
- S. Aleksander, I. B. Mochtar, and W. Utama, 2017, “The Measurements of Water Intrusion through Cracks Propagation Inside Slopes to Explain the Cause of Slope Failure — Case Study of Embankment in the Sanggu- Buntok Airport , Central Kalimantan , Indonesia,” *EJGE*, pp. 5347–5363.
- S. Aleksander, I. B. Mochtar, and W. Utama, 2019, “Field validated prediction of latent slope failure based on cracked soil approach,” *Lowl. Technol. Int.* 2018;, vol. 20, no. June, pp. 245–258.