

Pengaruh *Cracked Soil* terhadap Stabilitas Lereng Desa Bojongkondang–Kabupaten Sumedang dengan Menggunakan *Software Geostudio*

Ratu Salma Nisrina¹⁾, Dewi Amalia^{2*)}, Yacob Astor³⁾, Antonius Siswanto⁴⁾,
Nursyafiril⁵⁾, Iman Ruchyat⁶⁾, Apip Pudin⁷⁾

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)} Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

Email: ratu.salma.mtri20@polban.ac.id¹⁾, dewi.amalia@polban.ac.id²⁾

yacob.astor@polban.ac.id³⁾, ansiswanto@polban.ac.id⁴⁾

nursyafrikanwar@yahoo.com⁵⁾, imanruchyat@gmail.com⁶⁾

apipp055@gmail.com⁷⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v14i1.1023>

(Received: 20 September 2023 / Revised: 17 December 2023 / Accepted: 02 February 2024)

Abstrak

Tanggal 9 Januari 2021, telah terjadi bencana alam tanah longsor terjadi di Dusun BojongKondang, Desa Cihanjuang, Kec. Cimanggung, Kab. Sumedang. Keberadaannya masyarakat di zona merah sangat berbahaya. Ditambah dengan kondisi lereng yang relative curam sehingga perlu dilakukan studi terhadap stabilitas lereng untuk mengetahui faktor keamanan (*SF*) dari lereng tersebut. Pemukiman disekitar lokasi bencana alam tanah longsor dapat dikatakan aman jika nilai factor keamanan (*safety factor*) lerengnya >1,5. Dilakukan analisis terhadap pemodelan keretakan tanah untuk mendapatkan faktor keamanan terkritis di mana tanah dimodelkan sebagai tanah pasir (*behaving like sand*). Hal ini dapat diselesaikan dengan mengaplikasikan *The Concept of Cracked Soil*. Penelitian mengenai keretakan tanah baru dilakukan 10 tahun terakhir. Selanjutnya dilakukan penelitian dengan melakukan kajian lapangan untuk menemukan posisi retakan di lereng, dan pada tahun 2020 dilakukan pemodelan analisis *numeric* untuk stabilitas lereng dalam kondisi retak.

Kata kunci: *Stabilitas Lereng, Tanah Longsor, Behaving Like Sand*

Abstract

On January 9 2021, a landslide occurred in BojongKondang Hamlet, Cihanjuang Village, Cimanggung District, Sumedang Regency. The existence of people in the red zone is very dangerous. coupled with the relatively steep slope conditions. Based on these conditions, it is necessary to carry out a slope stability analysis study to find out what the safety figure (*SF*) of the slope is. Settlements close to landslide disaster locations can be said to be safe if the slope safety factor is >1.5. In the analysis, modeling of soil cracks was also carried out to obtain the value of the critical safety factor by modeling the soil as behaving like sand. This problem can be solved by applying *The Concept of Cracked Soil*. Research related to crack soil has only been carried out in the last 10 years. The next research was a field study to find the position of cracks on the slope, and finally in 2020 numerical analysis modeling was carried out regarding slope stability in cracked conditions.

Keywords: *Landslides, Slope Stability, Behaving Like Sand*

1. Latar Belakang

Kawasan rawan bencana merupakan suatu daerah yang pernah mengalami bencana atau yang mempunyai potensi terjadinya bencana. Tanah longsor dapat didefinisikan sebagai gerakan massa tanah. Pergerakan ini dapat menimbulkan kerusakan yang cukup besar. Kerusakan tentunya dapat diminimalisasi dengan adanya tindakan yang baik, berkelanjutan, dan adanya informasi yang akurat tentang kejadian tanah longsor (Kabupaten Bandung Barat, 2013).

Menurut *The Concept of Cracked Soil*, factor terjadinya kelongsoran tidak hanya kecuraman lereng, melainkan intensitas hujan yang tinggi dan keretakan di lereng. Retakan yang terdapat di dalam lereng bukan hanya mempercepat resapan air hujan ke tanah, tetapi retakan yang terisi oleh air hujan akan mempengaruhi stabilitas lereng tersebut. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, air hujan akan masuk kedalam retakan tanah dengan terus-menerus menyebabkan tanah di dalam retakan akan bersifat seperti pasir (*behaving like sand*). Air hujan yang masuk ke retakan ini akan menyebabkan *pore water pressure build-up*. Dua faktor tersebut yang mengakibatkan lereng berpotensi longsor. Selain menyebabkan *pore water pressure built-up*, air hujan akan masuk ke dalam retakan dan menekan kearah bawah serta samping retakan tersebut. Hal ini mengakibatkan retakan menjalar menjadi lebih dalam dan lebar sehingga lereng dalam kondisi kritis ketika hujan deras, sehingga dapat dinyatakan bahwa intensitas hujan lebih penting dari pada durasi hujan. Retakan yang dimaksud pada konsep ini retakan yang searah dengan kemiringan lereng (Amalia et al., 2020).



Gambar 1 Foto Udara Lokasi Longsor Desa Cihanjuang, Kab. Sumedang (U-Inspire Indonesia, 2021)

Provinsi Jawa Barat bagian selatan merupakan wilayah dengan potensi bencana tanah longsor tinggi. Khususnya di Lereng Bukit Geulis, Dusun Bojongkondang, RT.03, RW. 10, Desa Cihanjuang, Kecamatan Cimanggung, Kabupaten Sumedang pada tanggal 9 bulan Januari tahun 2021 terjadi hujan lebat disertai petir dan angin kencang yang mengakibatkan terjadinya tanah longsor pada lereng setinggi 20 m dengan panjang 40 m. Koordinat lokasi tanah longsor terletak pada posisi -6.9575439 LU dan 107.8184036 BT seperti pada Gambar 1. Tanah longsor ini mengakibatkan 24 unit rumah hancur total, 5 unit rumah rusak berat, 1 masjid rusak sedang, dan 23 rumah berada dalam zona merah. Bencana alam ini

juga mengakibatkan adanya korban dengan 25 jiwa meninggal dunia, luka berat 3 orang, luka ringan 22 orang, dan dalam pencarian sebanyak 15 orang (U-Inspire Indonesia, 2021).

(Zhang et al., 2012) menyatakan bahwa kelongsoran dapat terjadi ketika lereng yang memiliki retakan tanah terkena hujan. Keretakan tanah ini mempengaruhi banyaknya air hujan yang akan masuk ke dalam lereng. Air hujan yang masuk ke dalam tanah retakan arah vertikal lebih signifikan mengakibatkan adanya deformasi pada lereng dibandingkan arah horizontalnya. Dapat disimpulkan hujan dan retakan tanah mempengaruhi stabilitas lereng terhadap kelongsoran tanah. (B. Mochtar&Hutagamissufardal, 2016) mengemukakan bahwa analisis stabilitas lereng pada saat ini masih kurang sesuai dengan kondisi di lapangan. Hal ini menyebabkan kelongsoran masih saja terjadi pada lereng meskipun lereng memiliki kemiringan landai, didominasi lanau-lempung kaku (berbatu), dan telah diperkuat dengan faktor keamanan lereng lebih besar dari satu ($SF > 1$). Hal tersebut terjadi karena pemodelan perkuatan lereng tersebut belum memperhatikan distribusi retakan dalam tanah. Apabila dilakukan analisis, retakan yang dimodelkan hanya retakan tanah pada permukaan lereng saja, sehingga permasalahan ini perlu diselesaikan untuk mencegah terjadinya kelongsoran berulang walaupun telah dilakukan perkuatan pada lereng.

2. Metode Penelitian

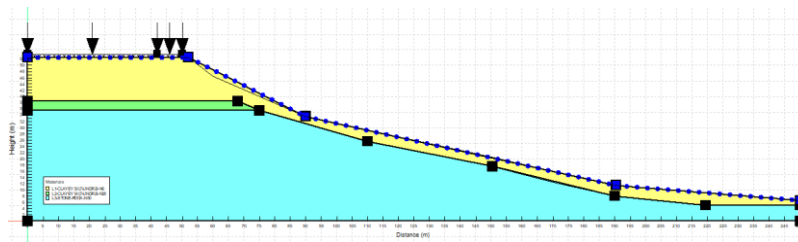
Metode yang digunakan dalam mengaplikasikan *the concept of cracked soil* (Amalia et al., 2022) pada kasus stabilitas lereng Desa Bojongkondang dimulai dari pengamatan langsung kelapangan untuk mengetahui titik lokasi kejadian, kemudian dilakukan pengujian pengambilan sampel tanah untuk dapat mengetahui sifat fisik maupun sifat teknis tanah yang nantinya sebagai data input dalam analisis stabilitas lerengnya. Kemudian dilakukan analisis pemodelan stabilitas lereng pada kondisi kemarau, kondisi hujan, dan kondisi pengaruh adanya retakan tanah.

2.1 Data Tanah

Pada Tabel 1 diperlihatkan parameter tanah yang digunakan dan untuk pemodelan tanah diperlihatkan dalam Gambar 2.

Tabel 1 Parameter Data Tanah

Location		: Kab. Sumedang										
Borelog		: BH-02										
Depth (m)	Soil Type	N - SPT	Undrained B				Undrained A & Drained				ϕ'	γ
			c_u	ϕ'	E_u	ν	c'	ν'	E_d	γ		
			kN/m ²		kN/m ²			kN/m ²		kN/m ²		kN/m ³
0.0 - 13.0	Lanau Lempungan	6	21	28	3150	0.35	2.1	0.25	2520	28	16.2	
13.0 - 19.0	Lanau Lempungan	28	98	35	24500	0.35	10	0.25	19600	38	19.6	
19.0 - 23.0	Cadas	50	-	-	100000	0.15	-	-	100000	-	22.0	



Gambar 2 Pemodelan Lereng

2.2 Pengujian Geolistrik

Geolistrik adalah salah satu ilmu dalam bidang Geofisika di mana mempelajari sifat aliran listrik dalam bumi. Pendeteksian ini meliputi pengukuran medan potensial, arus dan elektromagnetik yang terjadi baik secara alamiah maupun penginjeksian arus ke dalam bumi.. Nilai resistivitas variasi material bumi bagaimana diperlihatkan dalam Tabel 2 dan Gambar 3 memperlihatkan klasifikasi rentang nilai resistivitas dibedakan berdasarkan warna (Alexsander et al., 2019).

Tabel 2 Variasi Nilai Resistivitas Material Bumi

Material	Resistivitas (Ohm.meter)
Lempung lunak	1.5 – 3.0
Lempung lanauan & lanau lunak	3 – 13
Lanauan, lanau pasiran	13 – 150
Lempung lunak kerikilan	150 – 300
Pasir kerikil lanauaan	± 300
Batu pasir	300 – 2400
Batuan keras	>2400
Batuan vulkanik	
Granit	$5 \times 10^3 - 10^6$
Basal	$10^3 - 10^6$
Batu tulis	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Marmer	$10^2 - 2.5 \times 10^6$
Kuarsit	$10^2 - 2 \times 10^8$
Batuan sedimen	
Batuan pasir	$8 - 4 \times 10^3$
Serpih	$20 - 2 \times 10^3$
Batu gamping	$50 - 4 \times 10^2$
Tanah dan air	
Lempung	1 – 100
Aluvial	10 – 800
Air tanah	10 – 100
Air laut	0.2

Sumber: Santoso (2000)

2.3. Analisis Stabilitas Lereng

Dalam analisis stabilitas lereng, dibagi menjadi 3 model dan masing-masing dibagi model sebagai berikut:

- Kondisi lereng kemarau
- Kondisi lereng hujan
- Kondisi lereng pengaruh keretakan

2.4. Pembebanan Analisis Stabilitas Lereng

Dalam analisis stabilitas lereng, perlu memperhatikan beban hidup, beban mati, dan gempa untuk mendapatkan nilai factor keamanan (*safety factor*) terkritis. Adapun pembebanan yang dimasukkan kedalam analisis stabilitas lereng seperti diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Beban Lalu Lintas untuk Stabilitas Lereng
(Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Kelas Jalan	Beban Lalulintas (kPa)	Beban diluar Jalan (kPa)
I	15	10
II	12	10
III	12	10

Seperti diperlihatkan dalam Tabel 3, didapatkan data pembebanan untuk analisis stabilitas lereng pasca bencana tanah longsor adalah sebagai berikut:

- Beban lalu lintas yang terdapat sekitar lereng, berdasarkan kelas jalan III sebesar 12 kPa.
- Beban dari bangunan rumah-rumah sekitar lereng sebesar 10 kPa.

Dalam aspek geoteknik, kelas jalan berbeda namun beban pada jalan bebannya tetap sama hal ini dikarenakan merujuk pada Spesifikasi Umum Binamarga Tahun 2018 merupakan suatu ketentuan bahwa tanah dasar lapis perkerasan harus mencapai nilai CBR minimum yang ditetapkan tanpa membedakan kelas jalan mana yang akan digunakan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Geolistrik

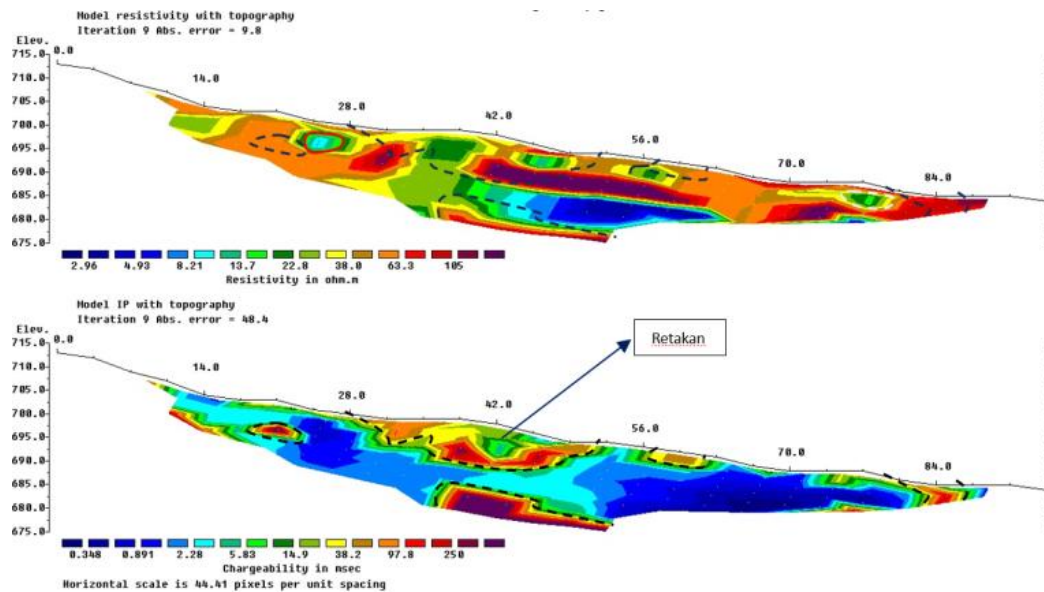
Pengujian geolistrik 2D dilakukan pada line A dengan *layout* pengujian seperti diperlihatkan dalam Gambar 3.



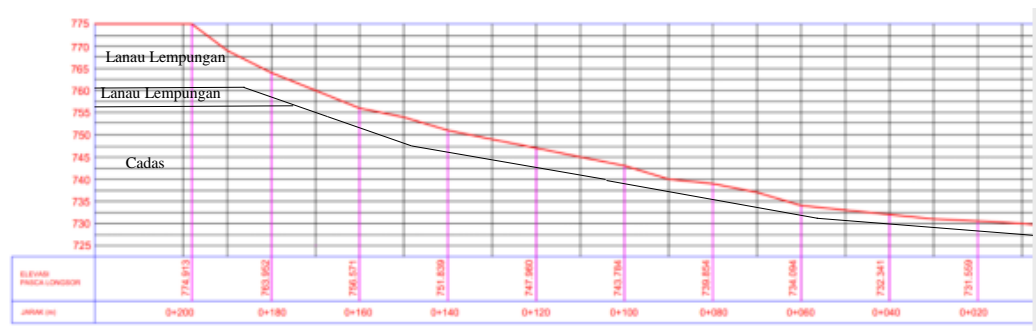
Gambar 3 Layout Pengujian Geolistrik 2D (Google Earth, 2023)

Hasil dilakukan pengujian geolistrik 2D didapatkan nilai resistivitas tanah dan *induced polarization* (IP) tanah. Hasil dari pengujian ini akan

menginterpretasikan dominasi jenis lapisan tanah, posisi air dalam tanah, serta keretakan yang terdapat di dalam tanah. Hasil pengujian geolistrik 2D pada line A.



Gambar 4 Interpretasi Hasil Pengujian Geolistrik 2D Line A



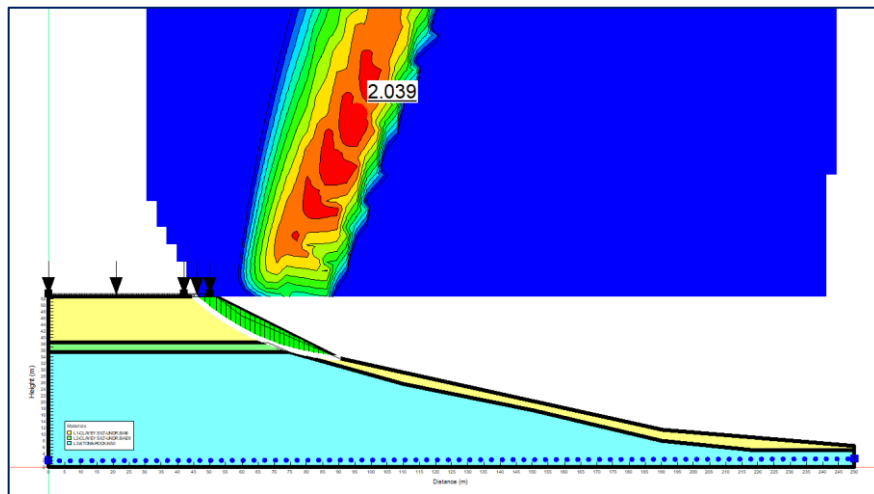
Gambar 5 Potongan Melintang Lereng Bojongkondang

Perubahan kadar air pada lapisan tanah terjadi ketika nilai resistivitas sebesar 61.69 – 78.81 ohm meter, sedangkan untuk keretakan teridentifikasi ketika nilai besaran *induced polarization* sebesar 21.46 – 30.3 ohm meter. Seperti diperlihatkan dalam Gambar 4 bahwa garis yang menunjukkan keretakan yang terdapat di lereng Dusun Bojongkondang (Alexsander et al., 2018).

3.2 Analisis Stabilitas Lereng

Konsep perhitungan analisis stabilitas lereng Dusun Bojongkondang dilakukan dengan dua cara, konvensional dan menerapkan the concept of cracked soil.

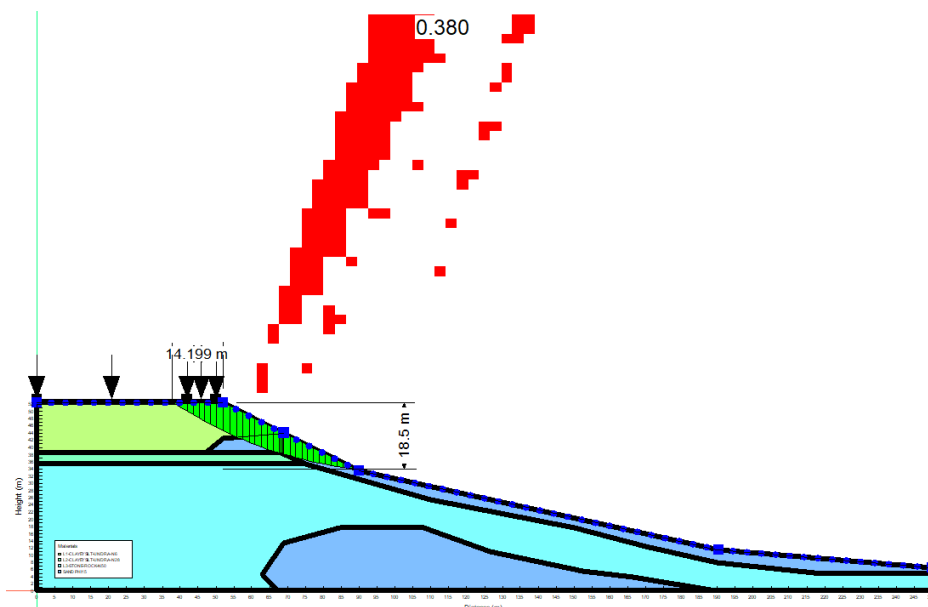
Perhitungan konvensional dilakukan dengan memperhatikan dua kondisi yaitu kondisi kering (kemarau) dan kondisi jenuh (hujan). Adapun perhitungan dengan *the new concept of cracked soil* di mana kedalaman retakan ditentukan dari hasil pengujian geolistrik 2D. Hasil perhitungan tersebut seperti diperlihatkan dalam-Gambar 6 dan Gambar 7.



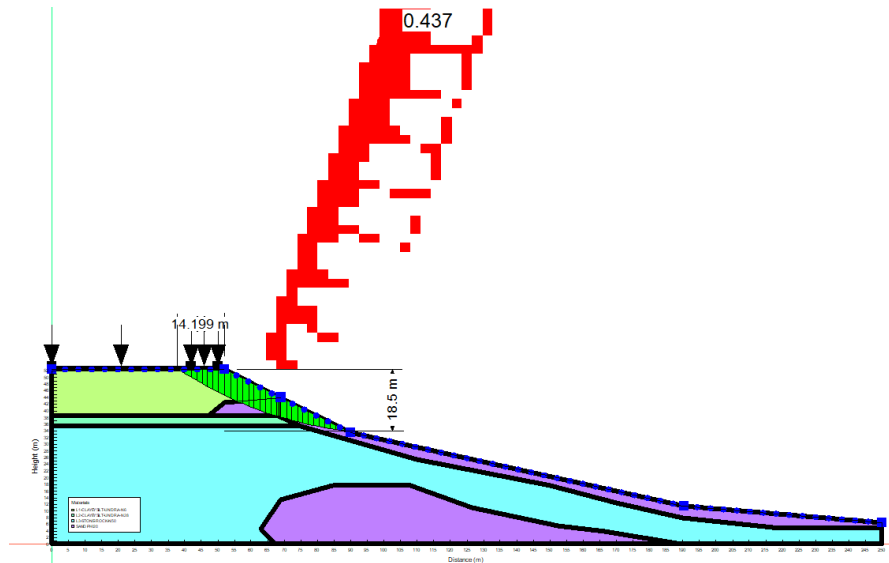
Gambar 6 Analisis Stabilitas Lereng Konvensional Line A pada Kondisi Kering

Didapatkan dari hasil analisis stabilitas lereng secara konvensional pada Line A didapatkan nilai factor keamanan (SF) untuk kondisi kering sebesar 2.039 dan untuk kondisi jenuh nilai factor keamanan (SF) sebesar 1.173 di mana kedua nilai tersebut menyatakan bahwa kondisi lereng dalam kondisi aman ($SF > 1$).

Selanjutnya analisis dilakukan dengan memperhatikan *the new concept of cracked soil* di mana tanah yang memiliki keretakan didalamnya dengan dimodelkan tanah berperilaku sebagai tanah pasir (*behaving like sand*) dengan parameter $c_{crack} \neq c_{tanah}$; $c_c = 0$; dan $\varphi_c = 15^\circ, 20^\circ, \text{ dan } 25^\circ$, hasil analisis seperti diperlihatkan dalam Gambar 6 sampai dengan Gambar 8.

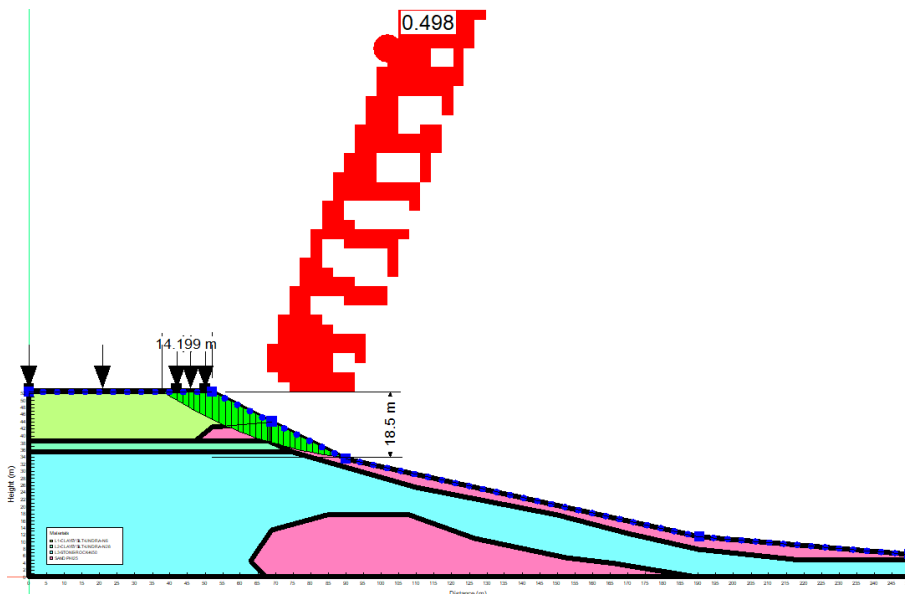


Gambar 7 Analisis Stabilitas Lereng Line A dengan Sudut Geser 15° dengan ; $c_c = 0$



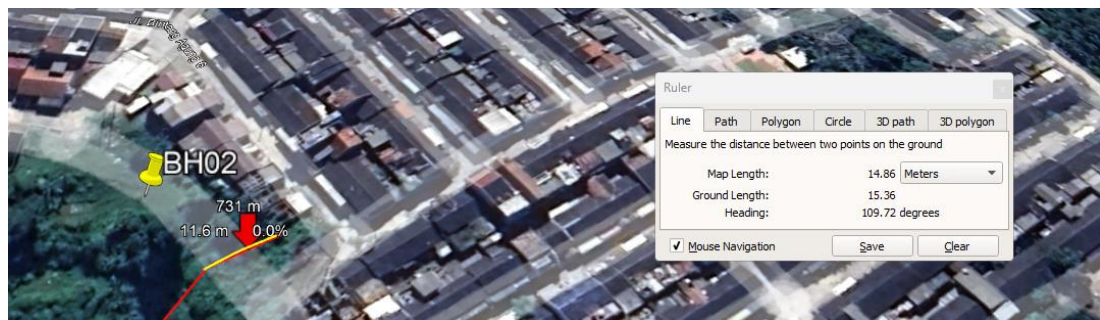
Gambar 8 Analisis Stabilitas Lereng Line A dengan Sudut Geser 20° dengan ; $c_c = 0$

Didapatkan dari hasil analisis stabilitas lereng dengan menerapkan *the new concept of cracked soil* pada line A didapatkan nilai factor keamanan untuk sudut geser 15° sebesar 0.380, untuk sudut geser 20° sebesar 0.437, dan untuk sudut geser 25° nilai factor keamanan sebesar 0.498.



Gambar 9 Analisis Stabilitas Lereng Line A dengan Sudut Geser 25° dengan ; $c_c = 0$

Kedalaman kelongsoran terjadi sekitar 18,5 m dari mahkota kelongsoran dan panjang horizontal kelongsoran terjadi sepanjang 14 meter. Apabila dibandingkan dengan pengukuran menggunakan Google Earth dengan kondisi yang terjadi di lapangan, hasil analisis ini menyerupai dengan fenomena yang terjadi seperti diperlihatkan dalam Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 Area Horizontal Dekat Area Kelongsoran



Gambar 11 Elevasi dan Panjang Kelongsoran Desa BojongKondang

Dari hasil analisis tersebut, penerapan *racked soil*, dengan adanya pengaruh kondisi tanah yang membuat tanah akan menjadi jenuh air apabila hujan dan dapat meresap keseluruhan tanah. Pada kondisi tersebut, kekuatan geser tanah sangat tergantung pada tegangan pori-pori (*pore water pressure*) dan tegangan udara – pori (*pore-air pressure*) yang masing – masing terjadi pada bidang geser ketika tanah mengalami keruntuhan. Kekuatan geser tanah dan tegangan air-pori serta udara-pori sangat tergantung dari jenis tanah aslinya (tanah granular/berbutir kasar atau butir halus), kecepatan pergeseran (cepat atau lambat).

Pada hasil analisis line A, disimulasikan pada saat hujan, air merembes masuk melalui retakan dan mudah mengalir keluar atau merembes keluar dari tebing. Pada saat hujan besar debit air yang keluar sehingga bidang retakan terjadi *pore water pressure build-up* (kenaikan tegangan air di dalam rongga bidang retakan). Dorongan tekanan air yang berlebihan disertai dengan arah bidang retakan yang searah kemiringan lereng inilah yang diperkirakan kelongsoran lereng.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Faktor utama kelongsoran bukan hanya kecuraman lereng, tetapi intensitas hujan yang tinggi dan keretakan yang ada di dalam lereng. Retakan pada lereng bukan hanya dapat mempercepat resapan air hujan ke tanah, tetapi retakan yang terisi oleh air hujan akan mempengaruhi stabilitas lereng tersebut. Seperti dijelaskan sebelumnya, air hujan akan masuk ke dalam retakan tanah dengan terus-menerus menyebabkan tanah di dalam retakan akan bersifat seperti pasir (*behaving like sand*). Air hujan yang masuk ke dalam tanah dengan intensitas tinggi akan menyebabkan *pore water pressure build-up*. Kondisi ini yang menyebabkan lereng berpotensi longsor. Tidak hanya mengakibatkan *pore water pressure built-up*, air hujan yang masuk ke dalam retakan akan menekan ke arah bawah dan samping retakan tersebut.

Dilakukan pengujian Geolistrik 2D pada Line A di mana kedalaman retak didominasi pada permukaan lereng. Hasil analisis dengan software Geostudio menunjukkan bahwa nilai safety factor kurang dari 1. Sehingga hal tersebut terkonfirmasi juga dengan tragedi yang terjadi di lapangan dan dibutuhkan kekuatan strategi untuk mengeluarkan air yang terinfiltrasi dalam retakan.

4.2 Saran

Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi perhatian pemerintah dan warga sekitar untuk lebih waspada terhadap bencana longsor dan bagaimana mitigasinya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi penelitian ini dalam Skema Penelitian Pascasarjana DIPA POLBAN 2023.

Daftar Kepustakaan

- Alexsander, S., B. Mochtar, I., & Utama, W. (2019). *Usulan Penambahan Sub Pasal 7 (Tujuh) dalam RSNi Geoteknik untuk Penempatan Bor dan Inklinometer pada Slope Tanah berdasarkan Pendekatan Cracks Soil*.
- Alexsander, S., Mochtar, I. B., & Utama, W. (2018). Field validated prediction of latent slope failure based on cracked soil approach. In *International Association of Lowland Technology* (Vol. 20, Issue 3). IALT.
- Alexsander, S. M. (2016). Jebakan Air dan Sebaran Cracks dalam Talud Tanah bermanfaat untuk Membuktikan Sejarah Kelongsoran Talud. *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik*.

- Alexsander, S. M. (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*.
- Ali, R. K. (2017). Analisis Peningkatan Faktor Keamanan Lereng pada Areal Bekas Tambang Pasir dan Batu di Desa Ngablak, Kecamatan Cluwak, Kabupaten Pati. *Prommine Jurnal*, 10-19.
- Amalia, D. d. (2019). Application of Digital Image Technology for Determining Geometry, Stratigraphy, and Position of Cracks Inside Earth Slope. *International Journal of GEOMATE*, 297-306.
- Amalia, D. I. (2018). Penerapan Konsep Baru Cracked Soil pada Penanggulangan Kelongsoran Lereng (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan). *Industrial Research Workshop and National Seminar*, 55-63.
- Aryaseta, B. d. (2017). Aplikasi Metode Induced Polarization untuk Mengidentifikasi Akifer di Daerah Sutorejo, Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*.
- Atikah, D. J. (2017). Pengaruh Hujan pada Stabilitas Lereng di Jalan Tol Gempol - Pandaan. *Jurnal Teknik Pengairan*.
- Amalia, D., B. Mochtar, I., & Endah Mochtar, N. (2020). *Application of a New Concept of Cracked Soils in Slope Stability Analysis with Heavy Rain and the Pattern of Cracks as the Governing Factors*. <http://www.springer.com/series/15087>
- Amalia, D., B. Mochtar, I., Mochtar, N. E., & Pudín, A. (2022). *Model Analisis Stabilitas Lereng menggunakan The Concept of Cracked Soil*.
- B. Mochtar, I., & Hutagamissufardal. (2016). Cracks in Soils and Their Implication for Geotechnical Engineering. *Annual National Conference on Geotechnical Engineering*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017*.
- Bujung, D. T. (2019). Pengaruh Intensitas Curah Hujan terhadap Kuat Geser Tanah. *Jurnal Tekno*.
- Chandrasasi, D. d. (2018). Penerapan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner-Schlumberger untuk Analisis Rembesan pada Maindam Waduk Greneng, Kabupaten Blora. *Jurnal Teknik Pengairan*, 114-124.
- Fauzi, A. d. (2019). Analisa Stabilitas Lereng dan Alternatif Penanganannya Studi Kasus Proyek Pekerjaan Kanal Utama Row 80 Kawasan Industri JIPE-Gresik. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*.
- Hardiyatmo, H. (2006). *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah*. Erlangga.
- Irdiana R., M. I. (2021). Shear Strength Parameter Correlation of Cracked Soil From Modified Direct Shear. *Journal of Civil Engineering*.
- Marga, K. P. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018*. Jakarta.

- Mochtar, H. I. (2018). The Effect of Cracks Propagation on Cohesion and Internal Friction Angle for High Plasticity Clay. *International Journal of Applied Engineering Research*.
- Kabupaten Bandung Barat, P. (2013). *Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Kabupaten Bandung Barat*.
- U-Inspire Indonesia. (2021). *Situation Report #5 Respon Bencana Longsor*.
- Santoso, B. (2016). Penerapan Metode Geolistrik-2D untuk Identifikasi Amblas Tanah dan Longsor di Jalan Tol Semarang-Solo KM 5+400 - KM 5+800. *Jurnal fisika dan Aplikasinya*.
- Zhang, G., Wang, R., Qian, J., Zhang, J. M., & Qian, J. (2012). Effect study of cracks on behavior of soil slope under rainfall conditions. *Soils and Foundations*, 52(4), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.005>