



Analisis Kestabilan Lereng *Highwall* Berdasarkan Tingkat Kejenuhan dengan Metode Probabilitas pada Tambang Batubara PT. X Kalimantan Timur

Yudho Dwi Galih Cahyono^{1*}

¹⁾ Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Kelautan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

*email: galih.1453@itats.ac.id

ABSTRAK

Keberadaan air pada lereng akan menimbulkan masalah teknis yang serius khususnya pada kestabilan lereng tambang, untuk itu perlu dilakukan analisis kestabilan lereng demi menjaga lereng tetap dalam kondisi stabil. Lereng di analisis dalam kondisi tak jenuh dan jenuh dengan menghitung nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran. Contoh batuan diuji sifat fisik dan mekanik sebagai data masukan analisis lereng pada program *slide 6.0*. Hasil analisis menunjukkan nilai FK lereng tak jenuh dengan tinggi 120 dan sudut 30 adalah 1,7 dan lereng jenuh dengan geometri yang sama memiliki nilai FK 0,961. Kemudian geometri lereng jenuh diubah menjadi 120 meter dengan sudut 25 derajat mendapatkan nilai FK 1,6. Sedangkan nilai probabilitas kelongsoran untuk lereng tak jenuh adalah 2,3% dan lereng jenuh 3,0%. Terjadi perbedaan signifikan terkait pengaruh air pada lereng yaitu perbedaan nilai FK sebesar 0,846 dan PK sebesar 9,2%. Perbedaan ini terjadi karena keberadaan air telah meningkatkan bobot isi batuan dan menurunkan nilai kohesi sehingga nilai gaya pendorong pada lereng menjadi lebih besar dan menyebabkan potensi longsor tinggi.

Kata Kunci: air, faktor keamanan, probabilitas kelongsoran, stabilitas lereng.

ABSTRACT

The presence of water on the slopes will cause serious technical problems, especially in the stability of mine slopes, for this reason it is necessary to carry out a slope stability analysis in order to keep the slopes in a stable condition. The slope is analyzed under unsaturated and saturated conditions by calculating the value of the safety factor and the probability of sliding. Rock samples were tested for physical and mechanical properties as input data for slope analysis on slide 6.0 program. The results of the analysis show that the FK value of the unsaturated slope with a height of 120 meters and an angle of 30 is 1.7 and the saturated slope with the same geometry has an FK value of 0.961. Then the geometry of the saturated slope is changed to 120 meters with an angle of 25 degrees to get an FK value of 1.6. While the probability of landslides for the unsaturated slope is 2.3% and the saturated slope is 3.0%. There was a significant difference related to the effect of water on the barrels, namely the difference in the FK value of 0.846 and the PK of 9.2%. This difference occurs because the presence of water has increased the density of the rock and decreased the value of cohesion so that the value of the driving force on the slope becomes larger and causes a high potential for landslides.

Keywords: water, safety factor, probability of sliding, slope stability

I. PENDAHULUAN

Aktivitas pelebaran dan pengalihan pada lahan tambang merupakan upaya perusahaan untuk meningkatkan produksi bahan galian. Khusus pada penambangan batubara aktivitas penggalian dan pelebaran lahan tambang tentu akan menambah keuntungan secara ekonomis, dimana harga batubara acuan (HBA) per juni 2021 melesat naik di harga US\$ 100,33/ton (*Kepmen ESDM No. 106.K-HK.02-MEM.B-2021*, n.d.). Proses penggalian yang semakin dalam dan lebar tentu akan menimbulkan masalah teknis yang serius khususnya pada kestabilan lereng tambang, untuk itu perlu dilakukan analisis kestabilan lereng demi menjaga lereng tetap dalam kondisi stabil. Proses penggalian yang semakin dalam ini tentu akan ditemukan masalah serius tentang kompleksitas properti massa batuan. Kompleksitas properti massa batuan ini berkaitan dengan keragaman jenis batuan, kehadiran bidang diskontinu serta keberadaan air tanah (Qi et al., 2017)

Keberadaan air tanah merupakan salah satu faktor penentu pada stabilitas lereng. Hal ini dikarenakan stabilitas lereng sebagian besar dipengaruhi oleh perubahan yang berhubungan dengan air dalam massa batuan (Batali & Andreea, 2016). Beberapa penulis lain menekankan bahwa penyebab paling penting untuk terjadinya longsoran dangkal adalah adanya penurunan tegangan efektif yang ada pada permukaan air (Bittelli et al., 2012). Selain itu pada kondisi curah hujan yang tinggi, derajat kejenuhan di dalam lereng dan di sepanjang permukaan runtuh bisa sangat bervariasi

(Buscarnera & Whittle, 2012). Untuk itu perlu dilakukan analisis stabilitas lereng untuk memastikan lereng dalam kondisi yang stabil

Analisis stabilitas lereng merupakan aspek penting dari penelitian dalam rekayasa pengurangan bencana. Dalam analisis stabilitas lereng, Fungsi utamanya adalah menghitung faktor keamanan lereng (Lin & Cao, 2014; Shen et al., 2013; Zhou & Cheng, 2013). Nilai faktor keamanan (FK) digunakan untuk memastikan bahwa lereng dalam kondisi aman. Nilai dari faktor keamanan diperoleh dari rasio total gaya penahan dengan gaya yang menyebabkan terjadinya keruntuhan pada lereng. Oleh karena itu lereng akan dikatakan stabil jika nilai FK lebih besar dari 1, atau pada umumnya nilai FK antara 1,3 – 1,5.

Namun ketidakpastian yang terdapat pada massa batuan menjadikan penggunaan nilai faktor keamanan yang bersifat deterministik menjadi kurang efektif. Ketidakpastian ini disebabkan oleh variabilitas yang pasti terdapat pada propertis massa batuan (Ching & Phoon, 2013; Lloret-Cabot et al., 2014) dan hal ini berpengaruh secara signifikan pada analisis kestabilan lereng (Ji & Low, 2012; D. Q. Li et al., 2014; Tabaroki et al., 2013; Wang et al., 2011). Oleh karena itu, FK tidak efektif dalam menjelaskan tingkat variabilitas dan ketidakpastian yang sering ditemui dalam massa batuan. Untuk itu perlu dilakukan analisis secara probabilistik untuk menilai semua parameter masukan yang didasarkan pada perhitungan probabilitas kelongsoran (PK) lereng. Konsep analisis dengan pendekatan probabilitas kelongsoran menjadi solusi untuk mengatasi kurang telitinya model deterministik (Cahyono & Santosa, 2020). Tulisan ini menggambarkan kondisi stabilitas lereng batubara yang dipengaruhi oleh adanya keberadaan air tanah dengan menggunakan analisis probabilitas kelongsoran untuk menilai prosentase kelongsorannya.

II. METODE

Metode penelitian yang digunakan merupakan pengumpulan data yang diperoleh dari data primer. Pengumpulan data dimulai dari pengambilan sampel di lapangan yang merupakan bagian dari akuisisi data geologi, klasifikasi penyusun massa batuan, pengujian laboratorium, desain lereng dengan kondisi air tanah yang berbeda-beda, analisis kestabilan lereng dengan metode probabilitas kelongsoran (PK).

Akuisisi Data Geologi

Pengambilan sampel batuan dilakukan dengan melakukan pemboran geoteknik untuk mendapatkan data sifat fisik dan mekanik batuan. Pemboran dilakukan pada 15 lubang bor dengan jarak antar lubang bor 100 sampai 500 meter yang berlokasi pada koordinat 56° 99' 98'' E dan 85° 52' 0'' N. Arah pemboran dilakukan dengan mengikuti arah *stike* dan *dip* dari batubara. Dari hasil pemboran diperoleh data deskripsi batuan antara lain soil, lempung, lanau, batubara, karbon, dan batu pasir. Kemudian sampel yang diperoleh dari hasil pemboran dimasukkan kedalam *corebox* sebagai informasi data geologi dan sampel yang lain dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanik.

Pengujian Laboratorium

Pada pengujian laboratorium sampel yang diperoleh dari lapangan dibagi dalam beberapa bagian yang digunakan untuk uji sifat fisik dan mekanik. Berikut adalah pembagian sampelnya.

Tabel 1. Panjang Sampel Batuan Berdasarkan Jenis Pengujian

No.	Jenis Pengujian	Panjang Sampel (cm)
1	Sifat Fisik	4-6
2	Kuat Geser Langsung	8-10
3	Kuat Tekan uniaksial	12-13

Tabel 2. Banyak Sampel Batuan per Litologi pada Setiap Pengujian

No.	Jenis Pengujian	Jumlah Sampel
1	Sifat Fisik	5 buah
2	Kuat Geser Langsung	5 buah
3	Kuat Tekan uniaksial	5 buah

Preparasi dan pengujian sampel dilakukan dengan menggunakan standar yang ditetapkan oleh ISRM (Brown, 1981).

Desain Lereng dan Analisis

Desain lereng yang digunakan merupakan lereng keseluruhan atau *overall slope* dengan tinggi dan sudut kemiringan yang berbeda-beda. Tinggi lereng diatur mulai 120 m, 130 meter dan 140 meter. Sedangkan sudut kemiringan lereng bervariasi antara 30° – 45°. Selain itu kondisi lereng dibuat pada kondisi kering dan jenuh. Kondisi ini dibuat agar pengaruh hidrologi pada air tanah diketahui, faktor hidrologi merupakan faktor yang patut dipertimbangkan untuk menjaga tingkat kejenuhan sehingga lereng dalam kondisi stabil (Putra et al., 2020; Tohari et al., 2017).

Dalam analisis stabilitas lereng, metode kesetimbangan batas biasanya digunakan untuk menghitung faktor keamanan lereng berdasarkan kriteria Mohr-Coulomb (Lin et al., 2014). Hongjun dan Longtan membuktikan bahwa Kestimbangan batas adalah metode yang andal untuk menilai stabilitas lereng tanah ataupun batuan lemah dan terkekarkan dan digunakan dalam praktik rekayasa geoteknik umum (H. Li & Shao, 2011).

Selain itu dilakukan analisis probabilitas kelongsoran pada setiap kondisi tak jenuh dan jenuh. Analisis probabilitas yang dikerjakan menggunakan simulasi monte carlo. Simulasi monte carlo dipilih karena memberikan konsep yang cukup sederhana dan kuat dalam mengevaluasi probabilitas stabilitas lereng (Jiang et al., 2015).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Laboratorium

Batuan hasil pemboran geoteknik dilakukan sampling dan hasil sampling dibawa ke laboratorium untuk selanjutnya dilakukan preparasi dan pengujian batuan. Aktifitas pengujian laboratorium yang dikerjakan adalah uji sifat fisik dan mekanik. Salah satu parameter uji sifat fisik adalah menghasilkan bobot isi batuan pada kondisi kering, setengah jenuh dan jenuh. Sedangkan untuk uji sifat mekanik yang dikerjakan adalah uji geser langsung. Parameter yang diperoleh dari uji geser langsung adalah nilai kohesi dan sudut gesek dalam. Nilai hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

No	Litologi	Parameter			
		Uji Sifat Mekanik (Geser Langsung)		Uji Sifat Fisik	
		Friction Angle (°)	Cohesion kN/m ²	Unstaturated Density	Saturated Density kN/m ³
1	Soil	52.910	48.510	14.783	18.876
2	Batulempung	23.643	127.914	13.910	18.540
3	Batulanau	26.323	124.814	14.720	19.301
4	Batubara	18.584	192.932	10.963	17.632
5	Batupasir	17.914	163.902	13.947	18.583
6	Karbon	17.433	36.455	13.397	17.4020

Parameter hasil pengujian laboratorium tersebut digunakan sebagai parameter masukkan dalam melakukan analisis kestabilan lereng.

3.2. Parameter Distribusi Statistik

Distribusi statistik diperlukan dalam parameter masukkan untuk menilai probabilitas kelongsoran lereng tambang. Umumnya semua jenis batuan berdistribusi normal, hal ini dinyatakan untuk mempermudah analisis statistik. Namun menurut (Azizi, 2014) yang melakukan serangkaian penelitian statistik menemukan bahwa karakteristik fisik dan mekanik batuan pada tambang batubara mempunyai distribusi statistik tertentu (Normal, Log normal, Gamma). Pada penelitian ini diperoleh distribusi statistik pada setiap litologi seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Statistik Setiap Litologi

No	Litologi	Distribusi Statistik Setiap Parameter			
		Friction Angle	Cohesion	Unstaturated Density	Saturated Density
1	Soil	Gamma	Gamma	Gamma	Gamma
2	Batulempung	Normal	Log normal	Normal	Normal
3	Batulanau	Gamma	Gamma	Gamma	Gamma
4	Batubara	Log normal	Log normal	Gamma	Gamma
5	Batupasir	Log Normal	Gamma	Normal	Gamma
6	Karbon	Log normal	Log normal	Gamma	Gamma

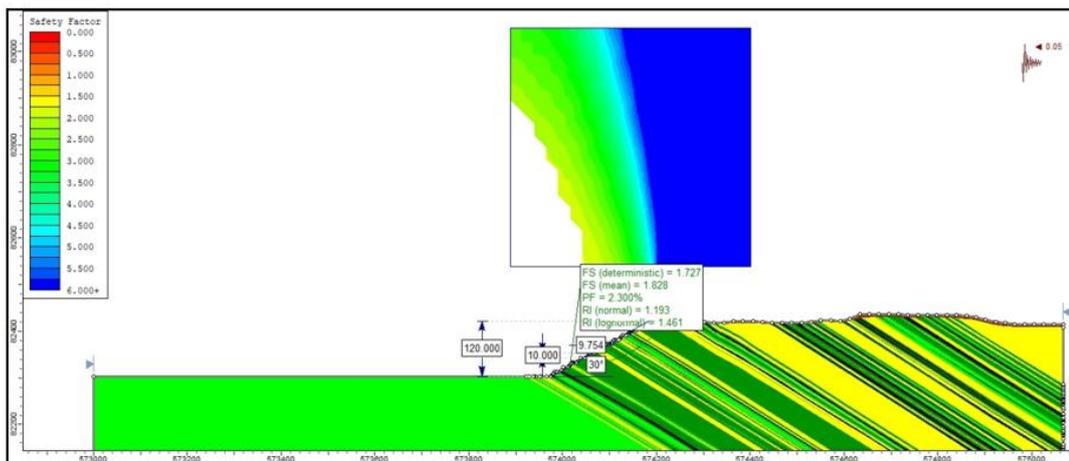
Distribusi statistik tersebut digunakan sebagai parameter masukan dalam menganalisis probabilitas kelongsoran dengan simulasi monte carlo.

3.3. Analisis Stabilitas Lereng

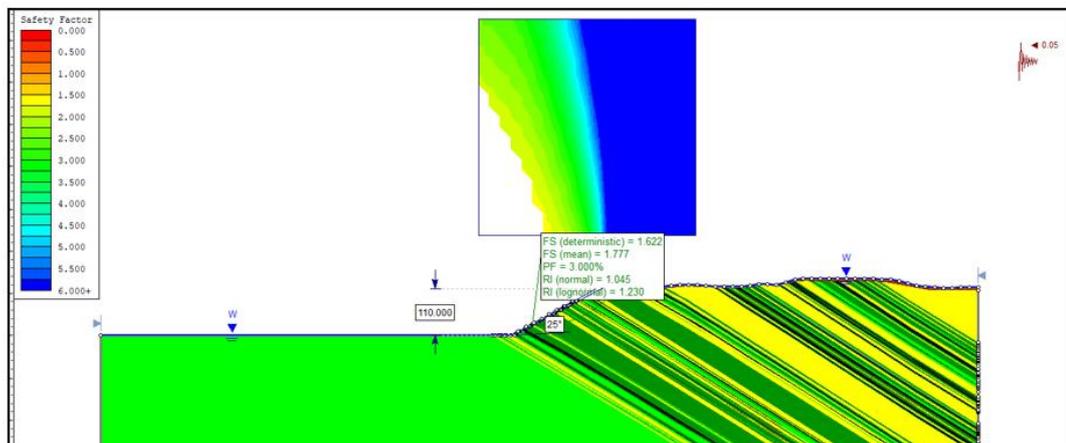
Hasil pengujian laboratorium dan karakterisasi distribusi statistik dimasukkan sebagai analisis kestabilan lereng. Dalam penelitian ini analisis menggunakan metode kesetimbangan batas menggunakan bantuan *software SLIDE 6.0*. sedangkan analisis probabilitasnya menggunakan simulasi monte carlo dengan jumlah iterasi sebanyak 1000 kali. Hasil permodelan geoteknik pada analisis stabilitas lereng ini menghasilkan nilai faktor keamanan secara deterministik dan rata-rata serta nilai probabilitas kelongsoran (Tabel 5 dan Gambar 1-2). Nilai ambang batas probabilitas kelongsoran mengikuti standar *Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018*, (2018) yaitu untuk lereng keseluruhan dengan tingkat *Consequences of Failure (CoF) high* maksimal adalah 5 %.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Penentuan FK dan PK

Kondisi	Tinggi (m)	Sudut (°)	Faktor Keamanan (FK)		Keterangan berdasarkan FK	Probabilitas Kelongsoran PK (%)	Keterangan berdasarkan PK
			Deterministik	Rata-rata			
Kering	120	30	1,727	1,828	Aman	2,3	Aman
		35	1,439	1,512	Aman	10,9	Tidak aman
Jenuh	110	25	1,622	1,777	Aman	3,0	Aman
		30	1,325	1,411	Aman	12,2	Tidak aman
	120	30	0,961	0,987	Tidak Aman	61,1	Tidak aman



Gambar 1. Permodelan Lereng Dan Hasil Penentuan FK Dan PK Pada Kondisi Tidak Jenuh



Gambar 2. Permodelan Lereng dan Hasil Penentuan FK Dan PK Pada Kondisi Jenuh

3.4. Pembahasan

Analisis stabilitas lereng yang didasarkan pada faktor keamanan menyatakan bahwa lereng dikatakan aman atau stabil jika faktor keamanan lebih dari 1. Pada hasil rekapitulasi diketahui bahwa pada semua kondisi lereng, nilai faktor keamanan dinyatakan dalam kondisi yang stabil. Pada kondisi lereng tak jenuh FK pada ketinggian 120 meter dengan sudut 30 dan 35 derajat memiliki nilai FK deterministik di atas 1,4. Sedangkan pada kondisi jenuh, nilai FK dengan tinggi 120 meter mengalami kondisi kritis atau bahkan tidak aman dengan nilai FK 0,987. Namun ketika tinggi dari lereng diturunkan menjadi 110 meter dengan sudut 25 dan 30 derajat, lereng pada kondisi jenuh menunjukkan kondisi yang aman dengan nilai FK deterministik di atas 1,3 dan FK rata-rata lebih dari 1,4.

Pada nilai probabilitas kelongsoran menunjukkan kondisi sebaliknya dengan nilai faktor keamanan. Probabilitas kelongsoran untuk kondisi tak jenuh dengan tinggi 120 dan sudut 30 derajat sebesar 2,3 % sedangkan untuk sudut 35 derajat nilai probabilitas kelongsoran 10,9 %. Sehingga untuk sudut 35 derajat tidak direkomendasikan karena potensi longsohnya lebih besar dari 5%. Sedangkan pada kondisi jenuh lereng dengan tinggi 120 meter dan sudut 30 derajat memiliki probabilitas kelongsoran 61,1 %, hal ini menunjukkan kondisi lereng mempunyai potensi longsor yang sangat besar bahkan dipastikan mengalami kelongsoran. Sehingga geometri lereng dirubah dengan tinggi 110 meter dengan sudut 25 derajat dan menghasilkan probabilitas kelongsoran menurun menjadi 3,0 % sesuai dengan standar yang direkomendasikan.

Tingkat kejenuhan pada lereng berpengaruh besar pada tingkat kepercayaan keamanan pada lereng, baik dalam perhitungan faktor keamanan maupun probabilitas kelongsoran. Pada analisis faktor keamanan, lereng dengan tinggi 120 meter dan sudut 30 derajat memiliki penurunan FK dari kondisi tak jenuh ke jenuh sebesar 0,846 secara deterministik dan 0,841 secara perhitungan rata-rata. Selain itu meskipun untuk lereng pada kondisi jenuh telah diturunkan ketinggiannya menjadi 110 meter dan dilandaikan sudutnya menjadi 25 derajat, nilai FK masih berada dibawah kondisi tak jenuh dengan ketinggian dan sudut semula.

Pada perhitungan probabilitas kelongsoran (PK) tingkat kepercayaan keamanan juga mengalami penurunan akibat keberadaan air. Hal ini ditunjukkan dengan naiknya prosentasi PK baik pada perubahan geometri lereng maupun pada kondisi tak jenuh menuju jenuh. Pada perubahan geometri lereng, nilai PK untuk kondisi lereng tak jenuh dengan perbedaan sudut sebesar 5 derajat naik sebesar 8,6 %. Sedangkan untuk kondisi jenuh nilai PK dengan perbedaan sudut 5 derajat mengalami kenaikan 9,2 %. Padahal untuk kondisi jenuh ketinggian jenjang lereng telah diturunkan sebesar 10 meter. Penurunan nilai FK dan kenaikan nilai PK menunjukkan keberadaan air yang terdapat pada lereng memberikan pengaruh yang besar.

Umumnya keberadaan air berpengaruh pada menurunnya nilai kohesi dari batuan serta menaikkan berat jenis dari batuan penyusun lereng. Menurunnya nilai kohesi menyebabkan gaya ikat antar butir pada batuan menurun sehingga batuan cenderung mudah terlepas dari massa batuan. Sedangkan kenaikan dari berat jenis berpengaruh pada naiknya beban dari batuan. Hal ini menyebabkan gaya pendorong pada lereng lebih besar dari pada gaya penahannya sehingga potensi kelongsoran juga semakin besar.

IV. KESIMPULAN

Keberadaan air menyebabkan penurunan nilai faktor keamanan dan menaikkan probabilitas kelongsoran. Nilai faktor keamanan pada kondisi tak jenuh memberikan gambaran lereng dengan geometri tinggi 120 meter dan sudut 30 serta 35 derajat menunjukkan hasil yang stabil dengan nilai FK di atas 1,4. Namun pada kondisi jenuh nilai FK turun menjadi 0,961 secara deterministik. Untuk itu lereng pada kondisi jenuh dirubah geometrinya menjadi 110 meter untuk tinggi dan sudut dibuat dengan variasi 25 derajat dan 30 derajat. Hasilnya nilai FK menunjukkan kenaikan di atas 1,3. Sedangkan pada perhitungan probabilitas kelongsoran nilai PK untuk lereng tak jenuh mengalami kenaikan sebesar 8,6 % dengan perbedaan sudut lereng sebesar 5 derajat dan tinggi yang sama. Kemudian nilai PK untuk lereng jenuh mengalami kenaikan sebesar 9,2 %. Keberadaan air ini menyebabkan nilai kohesi menjadi menurun dan berat jenis dari batuan naik sehingga gaya pendorong lereng menjadi lebih besar dan menyebabkan potensi longsor juga semakin besar. Dari hal tersebut direkomendasikan geometri lereng untuk kondisi tak jenuh adalah 120 meter untuk tingginya dan 30 derajat untuk sudutnya. Sedangkan untuk lereng jenuh direkomendasikan tinggi 110 meter dan sudut 25 derajat.

DAFTAR PUSTAKA

- Azizi, M. A. (2014). *Pengembangan metode penentuan reliabilitas kestabilan lereng tambang terbuka batubara di Indonesia* (Vol. 32109002). Disertasi. Institut Teknologi Bandung.
- Batali, L., & Andreea, C. (2016). Slope Stability Analysis Using the Unsaturated Stress Analysis. Case Study. *Procedia Engineering, 143*(Ictg), 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.036>
- Bittelli, M., Valentino, R., Salvatorelli, F., & Rossi Pisa, P. (2012). Monitoring soil-water and displacement conditions

- leading to landslide occurrence in partially saturated clays. *Geomorphology*, 173–174, 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.006>
- Brown, E. T. (1981). Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. In *Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods*. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90524-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90524-6)
- Buscarnera, G., & Whittle, A. J. (2012). Constitutive modelling approach for evaluating the triggering of flow slides. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5), 499–511. <https://doi.org/10.1139/T2012-010>
- Cahyono, Y. D. ., & Santosa, F. H. . (2020). Analisa kestabilan lereng berdasarkan probabilitas kelongsoran pada tambang pirofilit di pt gunung bale, kabupaten malang, provinsi jawa timur [1]. *SEMITAN*, 2(1), 423–435.
- Ching, J., & Phoon, K. K. (2013). Probability distribution for mobilised shear strengths of spatially variable soils under uniform stress states. *Georisk*, 7(3), 209–224. <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.801273>
- Ji, J., & Low, B. K. (2012). Stratified Response Surfaces for System Probabilistic Evaluation of Slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11), 1398–1406. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000711](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000711)
- Jiang, S.-H., Li, D.-Q., Cao, Z.-J., Zhou, C.-B., & Phoon, K.-K. (2015). Efficient System Reliability Analysis of Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Monte Carlo Simulation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2), 04014096. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001227](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001227)
- Kepmen ESDM No. 106.K-HK.02-MEM.B-2021*. (n.d.).
- Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018* (pp. 57–59). (2018).
- Li, D. Q., Qi, X. H., Phoon, K. K., Zhang, L. M., & Zhou, C. B. (2014). Effect of spatially variable shear strength parameters with linearly increasing mean trend on reliability of infinite slopes. *Structural Safety*, 49, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.005>
- Li, H., & Shao, L. (2011). *Three-Dimensional Finite Element Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis Based on the Unique Sliding Direction*. 216, 48–55. [https://doi.org/10.1061/47627\(406\)7](https://doi.org/10.1061/47627(406)7)
- Lin, H., & Cao, P. (2014a). A dimensionless parameter determining slip surfaces in homogeneous slopes. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 470–474. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0402-9>
- Lin, H., Zhong, W., Xiong, W., & Tang, W. (2014b). Slope Stability Analysis Using Limit Equilibrium Method in Nonlinear Criterion. *The Scientific World Journal*, 2014, 206062. <https://doi.org/10.1155/2014/206062>
- Lloret-Cabot, M., Fenton, G. A., & Hicks, M. A. (2014). On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics. *Georisk*, 8(2), 129–140. <https://doi.org/10.1080/17499518.2013.871189>
- Putra, M. H. Z., Kartiko, R. D., Soemantidiredja, P., Sadisun, I. A., & Tohari, A. (2020). Pengaruh Zona Jenuh Air Terhadap Kestabilan Lereng Di Weninggalih, Kabupaten Bandung Barat. *RISSET Geologi Dan Pertambangan*, 30(1), 119. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2020.v30.1086>
- Qi, S., Hou, D., & Luo, J. (2017). Optimization of groundwater sampling approach under various hydrogeological conditions using a numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 552, 505–515. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.016>
- Shen, J., Karakus, M., & Xu, C. (2013). Chart-based slope stability assessment using the Generalized Hoek-Brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 64, 210–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.09.002>
- Tabarroki, M., Ahmad, F., Banaki, R., Jha, S. K., & Ching, J. (2013). Determining the Factors of Safety of Spatially Variable Slopes Modeled by Random Fields. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2082–2095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000955](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000955)
- Tohari, A., Koizumi, K., Syahbana, A. J., & Oda, K. (2017). Advancing Culture of Living with Landslides. *Advancing Culture of Living with Landslides*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5>
- Wang, Y., Cao, Z., & Au, S. K. (2011). Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), 162–172. <https://doi.org/10.1139/T10-044>
- Zhou, X. P., & Cheng, H. (2013). Analysis of stability of three-dimensional slopes using the rigorous limit equilibrium method. *Engineering Geology*, 160, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.027>