



## Kajian Geoteknik untuk Penentuan Geometri Lereng Front Penambangan di PT. XYZ

Muhammad Ikram, Yuliadi\*

*Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Islam Bandung, Indonesia.*

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received : 11/8/2022

Revised : 8/12/2022

Published : 20/12/2022



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

Volume : 2

No. : 2

Halaman : 107-116

Terbitan : Desember 2022

### ABSTRAK

Kajian geoteknik merupakan fungsi penting dalam mengatasi masalah stabilitas lereng yang rentan terjadinya kelongsoran. Dalam analisis geoteknik salah satu cara mengoptimalkan geometri lereng tambang yaitu dengan menentukan parameter pembentuk lereng meliputi sudut serta ketinggian lereng untuk mendapatkan nilai kriteria keamanan lereng. Dalam kajian geoteknik pada penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk menganalisis kestabilan lereng kondisi eksisting pada tiga model lereng berdasarkan garis penampang peta topografi lokal. Dari nilai faktor keamanan yang diperoleh dari tiga model tersebut, kemudian dilakukan analisis untuk menentukan lereng tunggal dan lereng keseluruhan yang nantinya dapat direkomendasikan. Selain itu, untuk mengetahui potensi longsor yang dapat terjadi pada lokasi penelitian digunakan analisis kinematik. Analisis kestabilan lereng dengan tiga model berdasarkan garis penampang diperoleh nilai SRF A-A' sebesar 1,88, B-B' sebesar 1,68 dan untuk C-C' sebesar 1,86. Pada pembuatan model untuk lereng tunggal dibuat dengan tiga variasi ketinggian yang menunjukkan kondisi lereng masih stabil dengan perolehan nilai SRF >1,3. Hasil dari analisis adalah lereng dengan geometri tinggi 15m dan kemiringan 70°, dimana lereng keseluruhan dimodelkan berjenjang dengan nilai SRF yang diperoleh masih diatas 1,3 yaitu pada ketinggian lereng keseluruhan 75 m dengan kemiringan keseluruhan yaitu 64,30°.

**Kata Kunci :** Kajian Geoteknik; Analisis Kestabilan Lereng; Metode Elemen Hingga

### ABSTRACT

Geotechnical studies are an important function in overcoming the problem of slope stability which is prone to landslides. In geotechnical analysis, one way to optimize the geometry of the mine slope is to determine the slope-forming parameters including the angle and height of the slope to get the value of the slope safety criteria. In this geotechnical study, the finite element method (FEM) is used to analyze the slope stability of the existing conditions on three slope models based on cross-sectional lines of local topographic maps. From the value of the safety factor obtained from the three models, then an analysis is carried out to determine the single slope and the overall slope which can later be recommended. In addition, to determine the potential for landslides that can occur at the research site, kinematic analysis is used. Slope stability analysis with three models based on cross-sectional lines obtained SRF values A-A' of 1.88, B-B' of 1.68 and for C-C' of 1.86. In making the model for a single slope made with three variations in height which shows the condition of the slope is still stable with the acquisition of SRF values > 1.3. The result of the analysis is a slope with a geometry of 15m high and a slope of 70°, where the overall slope is modeled in tiers with the SRF value obtained is still above 1.3, namely the overall slope height is 75 m with an overall slope of 64.30°.

**Keywords :** Geotechnical Studies; Slope Stability Analysis; Finite Element Method

© 2022 Jurnal Riset Teknik Pertambangan Unisba Press. All rights reserved.

## A. Pendahuluan

Pada kegiatan penambangan salah satu faktor yang sangat penting untuk diperhatikan adalah faktor geoteknik yaitu kemantapan lereng, karena faktor kemantapan lereng ini menyangkut keselamatan pekerja dan juga setiap alat yang ada pada kegiatan penambangan, dalam kondisi lereng yang memiliki tingkat kelongsoran yang tinggi rekayasa geoteknik sangat diperlukan agar terhindar dari kelongsoran lereng tambang karena dapat mempengaruhi kegiatan produksi [1]. Dalam aktivitas penambangan akan selalu menghadapi permasalahan kestabilan lereng karena pada umumnya melakukan kegiatan penggalian dan penimbunan material yang berkaitan dengan lereng, baik itu berupa lereng kerja ataupun lereng akhir penambangan. Dalam penentuan tingkat kestabilan lereng, dikenal istilah faktor keamanan (*safety factor*) [2]. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng diantaranya faktor geometri lereng, karakteristik fisik dan mekanik material pembentuk lereng, air (hidrologi dan hidrogeologi), bidang lemah batuan, tegangan alamiah dalam massa batuan, konsentrasi tegangan lokal, getaran (alamiah dan perbuatan manusia) serta pengaruh termik [3].

Oleh karena itu, dalam merancang suatu tambang terbuka perlunya dilakukan analisis terhadap kestabilan lereng mengingat proses penimbunan dan penggalian yang terus dilakukan, sehingga nantinya akan memberikan kontribusi rancangan yang aman serta ekonomis. Kestabilan lereng sebagai hal yang penting, dimana jika terjadinya kelongsoran pada lereng tambang akan berdampak buruk pada beberapa aspek seperti kegiatan produksi dapat terhambat atau terhenti dikarenakan terjadinya longsoran lereng tambang.

Pada PT. XYZ merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan dengan bahan galian Batuan Andesit, dimana penambangannya sangat berhubungan dengan lereng bukaan tambang. Berdasarkan pemikiran tersebut, perlu dilakukannya kajian geoteknik untuk memperkirakan model lereng yang akan diterapkan agar lereng yang terbentuk nantinya aman dan optimal dalam rangka menunjang aktivitas penambangan, perencanaan dan pengembangannya.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, berikut merupakan tujuan dari penelitian ini: (1) Mengetahui nilai input properties material penyusun lereng tambang; (2) Mengetahui jenis longsoran yang berpotensi terjadi pada lereng tambang berdasarkan struktur kekar yang berkembang; (3) Mengetahui nilai faktor keamanan lereng kondisi eksisting pada daerah penelitian; (4) Mengetahui sampai sejauh mana rekomendasi desain geometri lereng tambang hasil optimasi.

## B. Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan untuk menunjang penelitian di PT. XYZ meliputi beberapa tahapan yaitu pengambilan data, pengolahan data dan analisis data.

### Teknik Pengambilan Data

Dalam pengambilan data yang dilakukan, menggunakan dua metode di antaranya: (1) Pengambilan data primer yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa data pemetaan geoteknik, desain awal geometri lereng aktual berdasarkan *section line* pada peta topografi lokal serta pengambilan sampel (contoh) batuan yang utuh, untuk nantinya sampel tersebut akan dilakukan pengujian laboratorium sehingga memperoleh input parameter pada model geoteknik. Dari uji sifat fisik terdiri atas *natural density*, *saturated density*, *dry density* dan *porosity*. Sedangkan nilai properties yang diperoleh dari pengujian sifat mekanik batuan meliputi kuat tekan, sudut gesek dalam dan kuat tarik serta kohesi. (2) Pengambilan dan pengkajian data yang berkaitan dengan penelitian baik yang berasal dari perusahaan maupun referensi lainnya. Data yang diambil dan dikaji nantinya seperti data umum tentang lokasi penelitian dan peta-peta yang akan menunjang dalam penelitian seperti peta topografi dan geologi. Pengajuan data curah hujan 10 tahun terakhir di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Bandung dan melakukan identifikasi kondisi muka air tanah (MAT) berdasarkan Hoek dan Bray [5].

### Teknik Pengolahan Data

Dari data yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan pengolahan data untuk menunjang analisis kestabilan lereng, mulai dari data pengukuran bidang diskontinu sehingga diperoleh orientasi *joint set* yang menjadi parameter yang mempengaruhi potensi longsor yang dapat terjadi melalui hubungannya terhadap orientasi lereng dan sudut gesek dalam. Dari peta topografi lokal dibuat *section line* sehingga diperoleh penampang topografi sebagai desain lereng aktual tambang sebelum dilakukannya kajian kestabilan lereng. Untuk input

*material properties* kedalam *Program Phase2* digunakan data hasil uji sifat fisik dan mekanik batuan berupa *dry density, modulus young, nisbah poisson*, kohesi dan sudut gesek dalam [4]. Di input juga getaran hasil peledakan yang diperoleh dari pengukuran langsung oleh pihak perusahaan serta kondisi MAT yang digunakan berupa kondisi lereng tidak dipengaruhi oleh muka air tanah [5] yang mana hal tersebut disesuaikan dengan kondisi aktual material pada lereng [6]. Dari hasil pengolahan data tersebut, dijadikan input parameter dalam pemodelan geoteknik.

**Teknik Analisis Data**

Analisis kestabilan lereng didasarkan atas output dari komputasi *Software Dips* dan *Phase2*. Dari *Software Dips* akan dianalisis potensi kelongsoran yang terjadi dan daerah potensi longsoran, sedangkan dari *Software Phase2* akan diperoleh nilai faktor keamanan lereng tambang dari setiap rancangan lereng yang dibuat. Nilai faktor keamanan mengacu pada SNI 8460 Tahun 2017 halaman 134 [7], dimana ketika nilai faktor keamanan yang dihasilkan kurang dari 1,3 maka perlu dilakukan kembali desain geometri lereng agar diperoleh nilai faktor kemanan yang paling optimal sebagai rekomendasi rancangan geom optimasi.

**C. Hasil dan Pembahasan**

**Data Hasil Penelitian**

Dalam pengujian sifat fisik batuan yang dilakukan mengacu pada ASTM D7263-09: *Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens* dan ASTM D2216-10: *Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. Untuk pengujian sampel batuan pada daerah penelitian ini dilakukan di Laboratorium Tambang Universitas Islam Bandung. Untuk pengujian sifat fisik batuan berupa batu andesit pada kondisi alami yang diambil dari daerah penelitian.

**Tabel 1.** *Input Parameter Properties Material*

No.	Sampel Batuan	Section Line	Dry Density (gr/cm <sup>3</sup> )	Peak		Residual		Tensile Strength (MPa)
				Cohesion (MPa)	Friction Angle (°)	Cohesion (MPa)	Friction Angle (°)	
1	Sampel 5	A - A'	2,53	0,98	37,72	0,65	26,78	11,47
2	Sampel 1	B - B'	2,58	1,06	33,29	0,67	24,29	15,04
3	Sampel 3	C - C'	2,62	0,92	40,16	0,64	28,58	16,68

Pengujian sifat mekanik batuan diperoleh berdasarkan pengujian *unconfined compression strength* (UCS) dengan data berupa kuat tekan ( $\sigma_c$ ). Untuk pengujian *direct shear strength* diperoleh data berupa sudut gesek dalam dan kohesi pada kondisi residual sedangkan pada kondisi *peak* data kohesi dan sudut geser dalam diperoleh dari pengujian triaksial. Selain itu, diperoleh juga data dari pengujian *brazilian strength*.

Data ground vibration yang didapatkan dari pengukuran langsung pada saat kegiatan peledakan oleh pihak perusahaan dengan nilai yang digunakan sebagai input beban dinamik pada model lereng adalah nilai *Peak Particle Acceleration* (PPA). Untuk pemilihan Gelombang badan merambat melalui massa batuan yang digunakan sebagai input adalah jenis *transversal wave* (T) dengan nilai terbesar yaitu 0,503 g. Dikarenakan *transversal wave* sebagai jenis gelombang melintang (horizontal) yang bergerak lurus pada arah perambatan gelombang, sehingga sangat berpengaruh terhadap massa batuan pada lereng tambang.

Untuk input pemodelan parameter muka airtanah didasarkan atas flow chart dari Hoek dan Bray [5], pada kajian ini menggunakan kondisi chart nomor satu dengan kondisi lereng tidak dipengaruhi oleh muka airtanah berdasarkan dari kondisi aktual material pada lereng.

Orientasi atau arah umum dari bidang diskontinu dapat diketahui berdasarkan proyeksi stereografis dan diagram rosette dengan parameter masukan yaitu orientasi setiap kekar sepanjang lintasan *scanline*. Dari hasil proyeksi diagram rosette dan stereografis dapat diketahui jumlah set kekar pada lokasi penelitian yaitu terdapat dua *joint set* pada dinding lereng I dan tiga *joint set* pada dinding lereng II.

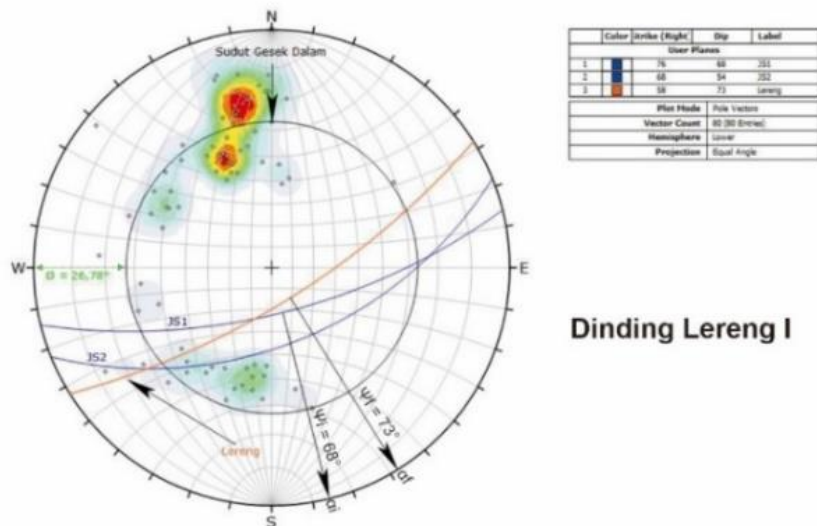
**Tabel 2.** Pengamatan dan Pengukuran Struktur Kekar

No.	Parameter	Lereng I	Lereng II
1	Arah Umum Kekar	N76°E	N76°E
2	RQD	96,52%	95,94%
3	Jarak Kekar	0,36 m	0,33 m
4	<i>Persistence</i>	3 - 10 m	1 - 3 m
	<i>Separation</i>	<1 mm	<1 mm
	<i>Roughness</i>	<i>Slightly Rough</i>	<i>Slightly Rough</i>
	<i>Infilling</i>	<i>None</i>	<i>None</i>
5	<i>Weathering Ratings</i>	<i>Slightly Weathered</i>	<i>Slightly Weathered</i>
	<i>General Conditions</i>	<i>Completely Dry</i>	<i>Completely Dry</i>

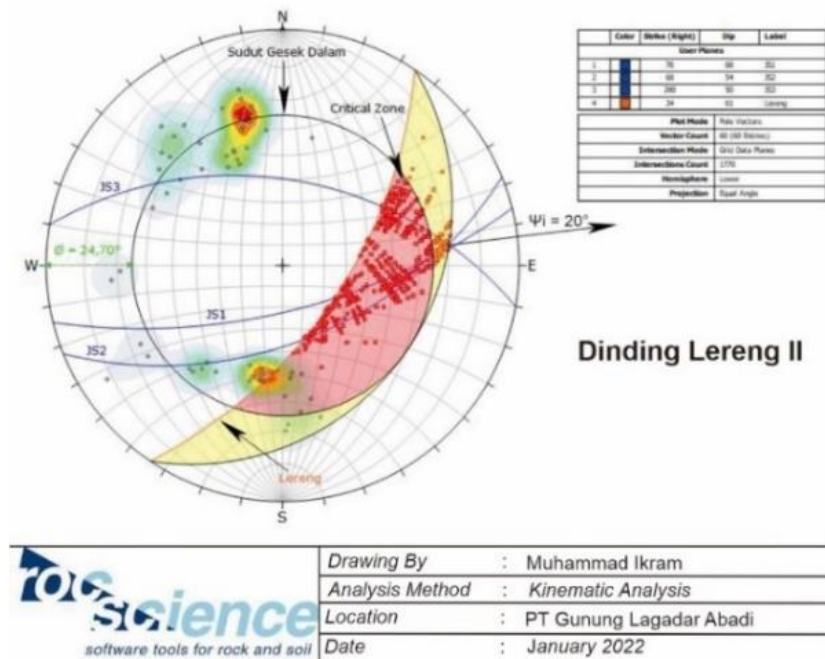
Dari data hasil pengamatan dan pengukuran struktur kekar menggunakan metode *scanline*, dapat digunakan sebagai masukan data pada analisis kinematik untuk mengetahui potensi longsor yang dapat terjadi pada rancangan lereng berdasarkan parameter orientasi bidang diskontinu, orientasi lereng dan sudut gesek dalam.

**Potensi Longsoran Berdasarkan Analisis Kinematik**

Analisis kinematika menggunakan parameter orientasi struktur geologi, orientasi lereng, dan sudut geser batuan yang diproyeksikan dalam analisis stereografis sehingga dapat diketahui tipe dan arah longsor [8]. Pada dinding lereng I, orientasi bidang diskontinu (strike N76°E/68° dan N68°E/54°) dan orientasi lereng (N58°E/73°) memiliki pengaruh terhadap jenis potensi longsor yang dapat terjadi di lereng andesit, hasil analisis mendapatkan bidang gelincir searah dengan lereng atau hampir sejajar dengan toleransi ± 20° ( $\alpha_f \approx \alpha_i$ ; ±20°), sudut kemiringan bidang gelincir lebih kecil dari sudut kemiringan lereng ( $\psi_i < \psi_f$ ) dan kemiringan bidang gelincir lebih besar dari sudut gesek dalam ( $\psi_i > \phi$ ), dimana sudut gesek dalam sebesar 26,78°. Dari hasil analisis yang didapatkan mencirikan potensi terjadinya longsoran bidang. Sedangkan pada dinding lereng II analisis dari program dips menunjukkan sebaran struktur kekar yang saling berpotongan, adanya dua arah kekar yang saling berpotongan dengan joint 1 memiliki kedudukan N76°E/68° dan joint 2 memiliki kedudukan N68°E/54° serta joint 3 dengan kedudukan N280°E/60°. Sudut yang dibentuk oleh garis perpotongan tersebut sebesar 20° lebih kecil dari sudut lereng yaitu 61°. Dari hal tersebut mencirikan potensi longsoran baji, akan tetapi terdapat satu syarat yang tidak terpenuhi yaitu sudut perpotongan bidang lemah lebih kecil (20°) dibandingkan sudut gesek dalam lereng (24,79°) sehingga membuat blok baji tidak dapat runtuh.



**Gambar 1.** Analisis Kinematik Software Dips Dinding Lereng I



Gambar 2. Analisis Kinematik Software Dips Dinding Lereng II

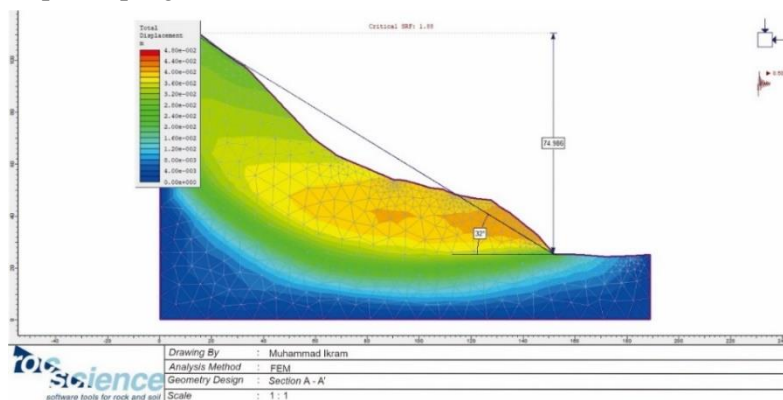
Hasil analisis pada masing-masing dinding lereng disajikan pada Tabel 3 berupa rekapitulasi hasil analisis kinematik potensi longsoran pada dinding lereng.

Tabel 3. Rekapitulasi Analisis Kinematik

Lokasi	$\phi$ (°)	$\alpha f$ (N..°E)	$\alpha i$ (N..°E)	$\Psi f$ (°)	$\Psi i$ (°)	Syarat Analisis Kinematik		Hasil
						$\alpha f \approx \alpha i; (\pm 20^\circ)$	$\Psi f > \Psi i > \phi$	
Lereng I	26,78	148	166	73	68	Terpenuhi	Terpenuhi	Longsoran Bidang
Lokasi	$\phi$ (°)	$\alpha f$ (N..°E)	$\alpha i$ (N..°E)	$\Psi f$ (°)	$\Psi i$ (°)	Syarat Analisis Kinematik		Hasil
						$\Psi f > \Psi i$	$\Psi i > \phi$	
Lereng II	24,29	34	76	61	20	Terpenuhi	Tidak Terpenuhi $(\Psi i < \phi)$	Blok Baji Tidak Dapat Runtuh

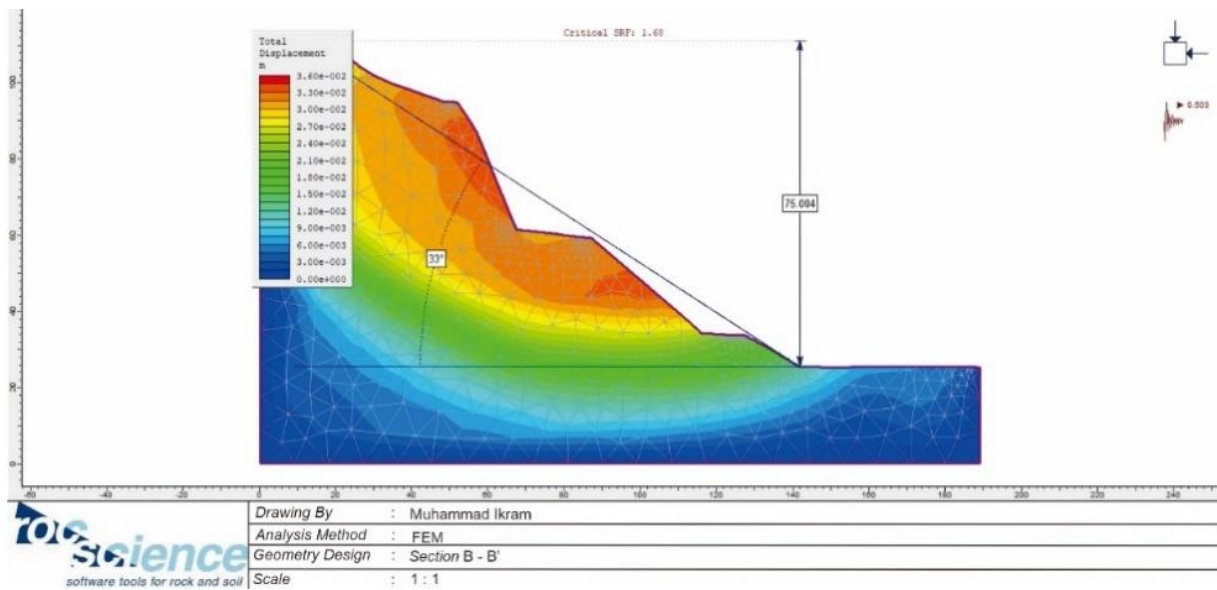
**Analisis Model Lereng Berdasarkan Section line**

Pemodelan Lereng kondisi eksisting berdasarkan dari garis penampang peta topografi lokal PT. XYZ. Garis penampang (section line) dibagi menjadi tiga bagian yaitu penampang A-A', penampang B-B' dan penampang C-C' dengan input properties material yang disesuaikan terhadap letak lokasi pengambilan sampel batuan terdekat dari letak garis penampang.



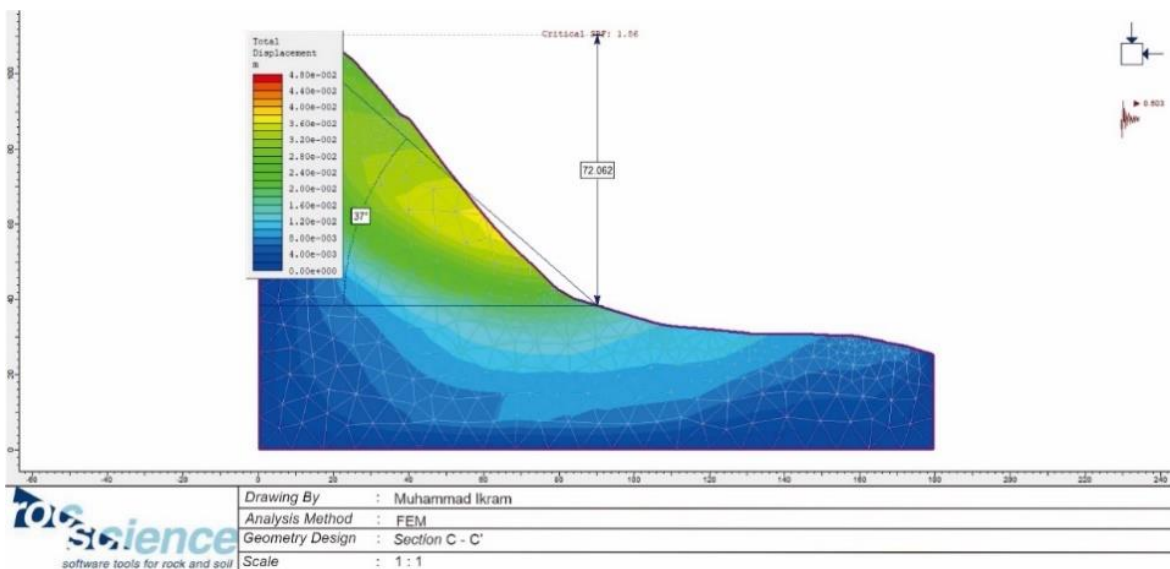
Gambar 3. Penampang Lereng A-A'

Penampang A - A' mempunyai nilai SRF sebesar 1,88 dengan adanya kontrol stuktur zona kekar, Nilai SRF tersebut dapat dioptimalkan untuk mendapatkan kondisi yang aman ataupun untuk memperoleh bahan galian semaksimal mungkin dalam kegiatan penambangan dengan cara mengubah geometri lereng.



**Gambar 4.** Penampang Lereng B-B'

Penampang B - B' mempunyai nilai SRF sebesar 1,68 dengan kemiringan lereng 33°, dalam daerah lereng adanya kontrol stuktur zona kekar. Nilai SRF tersebut dapat dioptimalkan untuk mendapatkan kondisi yang aman ataupun untuk memperoleh bahan galian semaksimal mungkin dalam kegiatan penambangan dengan cara mengubah geometri lereng.



**Gambar 5.** Penampang Lereng C-C'

Penampang C - C' mempunyai nilai SRF sebesar 1,86 dengan adanya kontrol stuktur zona kekar, nilai SRF tersebut dapat dioptimalkan untuk mendapatkan kondisi yang aman ataupun untuk memperoleh bahan galian semaksimal mungkin dalam kegiatan penambangan dengan cara mengubah geometri lereng.

### Analisis Kestabilan Lereng Tunggal

Pada penelitian ini analisis kestabilan lereng tunggal menggunakan metode elemen hingga. Input yang dilakukan dalam lereng tunggal berdasarkan hasil properties material (uji laboratorium sifat fisik dan mekanik

batuan). Nilai kondisi material digunakan untuk mengetahui faktor keamanan pada lereng tunggal guna memodelkan lereng dengan geometri yang berbeda sebagai acuan geometri yang paling optimal [9]. Dalam analisis lereng tunggal menggunakan tiga variasi ketinggian dan empat variasi kemiringan yaitu menggunakan variasi ketinggian 5 m, 10 m, 15 m, dan tiga variasi kemiringan 50°, 60°, 70°, 80°, dari tiap-tiap variasi tersebut akan menghasilkan nilai SRF >1,3 sehingga untuk rekomendasinya dapat menggunakan model manapun. Hal yang perlu diperhatikan bahwa kestabilan lereng tunggal dapat terpengaruhi oleh kegiatan produksi yang dilakukan karena getaran yang ditimbulkan pada saat kegiatan produksi menyebabkan adanya bidang lemah baru pada lereng, dimana nilai SRF yang terdapat pada lereng dapat dioptimalkan lagi dengan cara mengubah geometri lereng.

**Tabel 4.** Rekapitulasi Nilai SRF Lereng Tunggal

<i>Input Properties Material</i>	<b>Tinggi (m)</b>	<b>Kemiringan (°)</b>	<b>SRF</b>
Sampel 5	5	50	14,83
		60	14,80
		70	14,67
		80	14,09
	10	50	6,97
		60	6,93
		70	6,76
		80	6,50
	15	50	4,71
		60	4,69
		70	4,54
		80	4,31
Sampel 1	5	50	14,82
		60	14,79
		70	14,63
		80	14,01
	10	50	6,92
		60	6,87
		70	6,70
		80	6,47
	15	50	4,68
		60	4,63
		70	4,50
		80	4,23
Sampel 3	5	50	14,20
		60	14,13
		70	13,98
		80	13,43
	10	50	6,72
		60	6,70
		70	6,51
		80	6,24
	15	50	4,68
		60	4,63
		70	4,50
		80	4,23

**Analisis Kestabilan Lereng Keseluruhan**

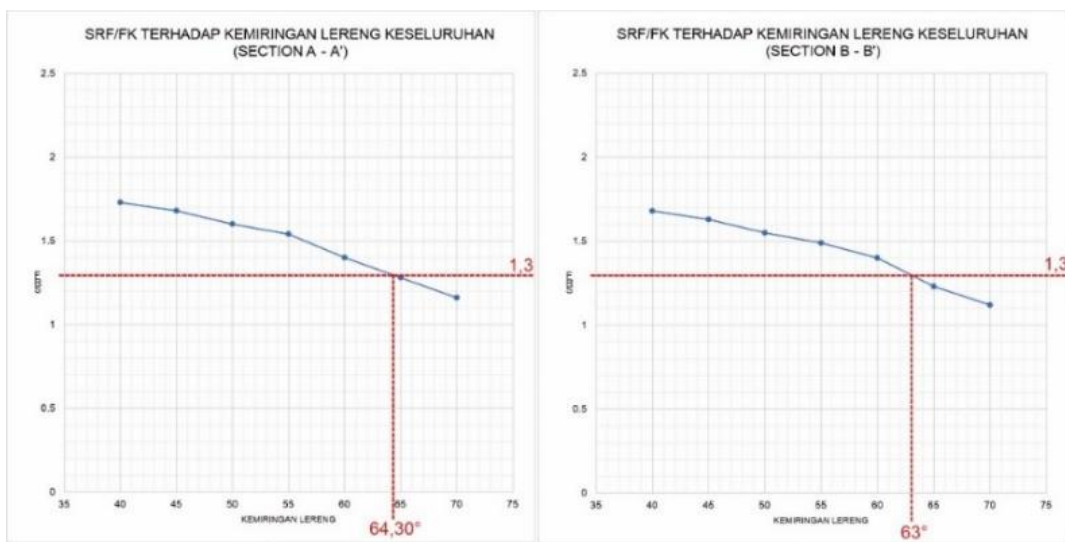
Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial, yaitu dengan menghitung besarnya kekuatan geser untuk mempertahankan kestabilan lereng dan menghitung kekuatan geser yang menyebabkan kelongsoran kemudian keduanya dibandingkan [10]. Dalam analisis

kestabilan lereng keseluruhan mengacu pada model lereng berdasarkan *section line* yang selanjutnya dilakukan optimasi pencuraman kemiringan lereng, sehingga dapat diketahui sampai sejauh mana lereng dapat dicuramkan dengan tetap memperhatikan nilai faktor keamanan (FK = SRF) yaitu  $\geq 1,3$ . Rancangan model lereng keseluruhan dibuat dengan mengacu pada satu ketinggian keseluruhan lereng yaitu 75 m dengan variasi kemiringan 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, dan 65°.

**Tabel 5.** Rekapitulasi Nilai SRF Lereng Keseluruhan

No	Section line	Input Properties Material	Tinggi Keseluruhan (m)	Kemiringan Keseluruhan (°)	SRF
1	A - A'	Sampel 5	75	40	1,73
				45	1,68
				50	1,60
				55	1,54
				60	1,40
				65	1,28
2	B - B'	Sampel 1	75	40	1,68
				45	1,63
				50	1,55
				55	1,49
				60	1,40
				65	1,23
3	C - C'	Sampel 3	75	40	1,72
				45	1,66
				50	1,58
				55	1,53
				60	1,39
				65	1,26

Berdasarkan grafik perbandingan nilai SRF terhadap kemiringan lereng keseluruhan, sehingga dengan acuan nilai FK/SRF > 1,3 desain lereng keseluruhan paling maksimal yaitu pada kemiringan lereng 64,30° pada model *line section* A - A', 63° untuk model *line section* B - B' dan 63,90° pada model *line section* C - C' dengan masing-masing ketinggian lereng adalah 75 meter. Rancangan lereng keseluruhan ini didasarkan atas lereng tunggal pada ketinggian 15 m dengan sudut 70° yang dibuat dalam 5 jenjang.



**Gambar 6.** Grafik Perbandingan SRF/FK Terhadap Kemiringan Lereng Keseluruhan





Lanjutan Gambar 6. Grafik Perbandingan SRF/FK Terhadap Kemiringan Lereng Keseluruhan

**D. Kesimpulan**

Input properties material berupa data hasil uji laboratorium yaitu sifat fisik dan sifat mekanik batuan, dimana data yang digunakan berdasarkan software Phase2 metode elemen hingga meliputi kohesi (*residual* dan *peak*), sudut gesek dalam (*residual* dan *peak*), nilai kuat Tarik batuan, modulus young, bobot isi kering, dan Poisson's ratio; Banyak ditemukan bidang diskontinuitas pada lereng, dimana untuk dinding lereng I berdasarkan analisis kinematik memenuhi syarat potensi terjadinya longsoran bidang, sedangkan dinding lereng II memenuhi syarat adanya potensi longsoran baji; Kestabilan lereng tambang pada kondisi eksisting diperoleh nilai SRF sebesar 1,88 (*section line A - A'*), 1,68 (*section line B - B'*) dan 1,86 (*section line C - C'*). Desain geometri lereng tunggal (*single slope*) dengan variasi tiga ketinggian (5 m, 10 m, 15 m) dan tiga kemiringan (50°, 60°, 70°, 80°) menghasilkan perolehan nilai SRF > 1,3 yang artinya lereng masih dalam kondisi stabil (aman), sehingga dalam perencanaan desain lereng tunggal dapat memilih desain lereng manapun; Rekomendasi lereng keseluruhan, menggunakan acuan lereng tunggal yaitu pada geometri dengan ketinggian 15 m dan kemiringan 70° dengan hasil pemodelan dibuat berjenjang pada ketinggian lereng keseluruhan (*slope height*) yaitu 75 m dan kemiringan keseluruhan (*overall slope*) yaitu 64,30° pada model *line section A - A'*, 63° untuk model *line section B - B'* dan 63,90° pada model *line section C - C'*.

**Daftar Pustaka**

[1] Ruslan Loilatu dan Iswandaru, "Analisis Kestabilan Lereng Andesit Menggunakan Metode FEM pada PT. X," *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, hlm. 15–23, Jul 2022, doi: 10.29313/jrtp.v2i1.782.

[2] D. C. Wyllie dan C. Mah, *Rock Slope Engineering Civil and Mining*, 4th edition. 2017.

[3] I. Arif, *Geoteknik Tambang: Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2016.

[4] E. T. Brown, *Rock Characterization Testing and Monitoring*. ISRM suggested methods, 1981.

[5] E. Hoek dan J. Bray, *Rock Slope Engineering*, 3rd Edition. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

[6] J. E. Bowles, *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*, 2 ed. Jakarta: Erlangga, 1989.

[7] Badan Standarisasi Nasional, "Persyaratan Perancangan Geoteknik," SNI 8460-2017, 2017

- [8] P. P. Utama, Y. P. Nusantara, F. Aprilia, dan I. G. B. Indrawan, “Analisis Kinematika Kestabilan Lereng Batupasir Formasi Butak,” 2014.
- [9] M. Mushthofa, J. Masdar, A. Rahmat, P. Wika Beton, dan J. Tengah, “Simulasi Numerik untuk Mengatasi Retak Penampang U-Ditch pada Tahap Pelaksanaan Handling,” *TEKNISIA*, 2019.
- [10] V. Gabriella, M. Pangemanan, A. E. Turangan, dan O. B. A. Sompie, “Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Fellenius (Studi Kasus: Kawasan Citraland),” *Jurnal Sipil Statik*, vol. 2, no. 1, hlm. 37–46, 2014.