



## Analisis Kestabilan Lereng Andesit Menggunakan Metode FEM pada PT. X

Ruslan Loilatu, Iswandaru\*

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

### ARTICLE INFO

#### Article history :

Received : 4/4/2022

Revised : 5/7/2022

Published : 8/7/2021



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

Volume : 2

No. : 1

Halaman : 15 - 24

Terbitan : Juli 2022

### ABSTRAK

Pengumpulan data studi geoteknik meliputi pemetaan geoteknik, pengamatan model longsoran yang dapat terjadi, dan melakukan sampling untuk pengujian sifat fisik dan sifat mekanik. Kajian geoteknik yang dilakukan adalah dengan menganalisis kelongsoran pada lereng produksi, metode analisis yang digunakan dalam analisis longsoran pada lereng adalah metode kinematik, analisis dengan metode ini menggunakan input parameter massa batuan, bidang diskontinuitas, dan geometri lereng produksi. Analisis kestabilan lereng keseluruhan menggunakan Finite Element Method (FEM) menunjukkan lereng keseluruhan dalam kondisi stabil dilihat dari nilai Faktor Keamanan (FK) yang didapatkan sebesar 1,26. Untuk analisis kestabilan lereng tunggal lereng dimodelkan dengan tiga variasi kemiringan dan tiga variasi ketinggian untuk mengetahui batas minimum geometri lereng yang optimal. Untuk lereng dengan kondisi yang optimal dibandingkan dua variasi sudut yang lain adalah lereng dengan kemiringan 50° dan tinggi maksimum 10 m dengan SRF sebesar >1,25 yang dijadikan sebagai rekomendasi lereng yang optimal, lereng dengan kemiringan tersebut jika dimodelkan dengan beberapa variasi ketinggian yaitu 5 m memiliki SRF sebesar 2,02, ketinggian 10 m memiliki SRF 1,48, dan ketinggian 15 m memiliki SRF sebesar 1,28, yang menunjukkan ketiga variasi ketinggian dengan menggunakan kemiringan 50° memiliki nilai FK >1,25, sedangkan jika ketinggian dibuat melebihi batas ketinggian 15 m maka lereng berpotensi longsor.

**Kata Kunci :** Kajian Geoteknik; Stabilitas Lereng Keseluruhan; Faktor Keamanan.

### ABSTRACT

Geotechnical study data collection includes geotechnical mapping, observations of landslide models that can occur, and sampling for testing physical and mechanical properties. The geotechnical study carried out is by analyzing slides on production slopes, the analytical method used in the analysis of landslides on slopes is the kinematic method, analysis with this method uses rock mass parameters, discontinuity planes, and production slope geometry as input. The overall slope stability analysis using the Finite Element Method (FEM) shows the overall slope is in a stable condition seen from the value of the Safety Factor (FK) which is 1.26. For single slope stability analysis, the slope is modeled with three variations of slope and three variations of height to determine the minimum limit of optimal slope geometry. For slopes with optimal conditions compared to the other two variations of angles, namely slopes with a slope of 50° and a maximum height of 10 m with an SRF of > 1.25 which is used as an optimal slope recommendation, the slope with that slope if modeled with several variations in height, namely 5 m has an SRF of 2.02, a height of 10 m has an SRF of 1.48, and a height of 15 m has an SRF of 1.28, which shows the three variations in height using a slope of 50° have an FK value > 1.25, whereas if the height is made to exceed the limit a height of 15 m, the slope has the potential for landslides.

**Keywords :** Geotechnical Studies; Overall Slope Stability; Safety Factors.

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

Corresponding Author : \*iswandaru230390@gmail.com

Indexed : Garuda, Crossref, Google Scholar

DOI : <https://doi.org/10.29313/jrtp.v2i1.782>

## A. Pendahuluan

Wilayah dengan elevasi berkontur atau mempunyai perbedaan elevasi sehingga mengakibatkan terbentuknya suatu lereng (*slope*) [1]. Optimasi lereng tambang dilakukan untuk mengetahui nilai faktor keamanan dari suatu lereng, pada kegiatan tambang terbuka terdapat berbagai aktivitas yang dapat mempengaruhi lereng produksi tidak aman karena terdapat getaran dari aktivitas alat berat dan kegiatan peledakan yang dapat menyebabkan kelongsoran pada lereng maka dari itu perlu dilakukan optimasi lereng yang sesuai, faktor yang menyebabkan terjadinya kelongsoran pada lereng tambang mencakup sifat fisik dan mekanik batuan, groundwater conditions, kondisi struktur, gaya yang berasal dari luar dan masa batuan. Beberapa peneliti mengemukakan faktor penyebab longsor yang beragam, antara lain: kegempaan, iklim (curah hujan), vegetasi, *morfologi*, batuan/tanah maupun situasi setempat [2].

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.

Biasanya analisis kestabilan lereng tambang terbuka dibuat berdasarkan nilai faktor keamanan (FK) saja, yakni rasio gaya penahan nominal dan gaya penggerak nominal. Input data yang diperlukan meliputi massa jenis tanah, kohesi tanah, sudut geser dalam tanah, kemiringan lereng, dan tinggi lereng untuk menghasilkan output data berupa nilai faktor keamanan [3]. Secara teoritis metode kesetimbangan batas menyatakan batas kritis lereng aman bila  $FK = 1$ , di mana lereng akan longsor bila  $FK < 1$  dan lereng akan aman bila  $FK > 1$ . Namun kelemahan pendekatan FK tersebut untuk disain lereng adalah hanya bersifat kasuistis dan tidak dapat diberlakukan untuk kondisi lereng yang lain [4].

Pada PT. X masalah yang harus diperhatikan adalah kestabilan lereng, karena lereng bukaan tambang akan berpengaruh pada kegiatan penambangan yang dilakukan, salah satunya yaitu akan memperlambat kegiatan produksi dan juga aspek-aspek lain dalam penambangan, merencanakan lereng tambang ini harus dilakukan untuk mendapat saran lereng tambang yang aman, untuk dapat terhindar dari runtuhnya atau longsoran yang terjadi pada lereng tambang.

## B. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

### Pengambilan Data

Pengambilan data yang digunakan yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang didapatkan dari pengukuran langsung di lapangan, atau data perusahaan yang belum dipublikasikan, data yang primer yang didapatkan seperti sampel batuan, data kekar, yang akan mendukung dalam rekayasa geoteknik. Sedangkan data sekunder adalah data penunjang dalam pengolahan data yang sudah dipublikasikan seperti peta topografi, peta geologi, peta morfologi yang bisa dibuat menggunakan data Rupa Bumi Indonesia (RBI).

### Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan menggunakan data yang sudah didapatkan dari studi literatur, data primer, dan juga data sekunder, pengolahan data ini menggunakan bantuan *software* pemodelan lereng dan *software* untuk mengetahui jenis longsoran.

### Teknik Analisis Data

Analisis kestabilan lereng menggunakan metode elemen hingga dengan memodelkan lereng menggunakan bantuan *software* sehingga dapat diketahui faktor keamanan pada tiap lereng, untuk analisis longsoran menggunakan metode kinematik, dan analisis untuk kestabilan lereng juga memakai klasifikasi *rock mass rating* (RMR).

Dalam menganalisis lereng tambang dibutuhkan teori penunjang sebagai dasar dalam menganalisis dan pembahasan hasil data. Berikut adalah teori penunjang penelitian ini.

**Rekayasa Geoteknik**

Rekayasa geoteknik merupakan aplikasi rekayasa teknologi yang diterapkan kepada bumi [5]. Geoteknik merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam kegiatan pertambangan karena menyangkut keselamatan pekerja ataupun dapat mengganggu proses produksi, Pada suatu lereng tambang karakteristik batuan dan tanah yang berbeda-beda di mana hal ini mempengaruhi stabilitas pada setiap lereng berbeda-beda. Ilmu geoteknik yang berhubungan dengan respon material tanah atau batuan terhadap proses deformasi disebut geomekanika. Pada kegiatan penambangan permasalahan stabilitas lereng pasti ada pada kegiatan menambang, tempat penimbunan material over burden, penimbunan batubara dan infrastruktur lainnya seperti jalan, jembatan, dan lereng di sekitar fasilitas penambangan.

**Analisis Metode Kinematik**

Analisis kinematik digunakan untuk mengetahui potensi keruntuhan lereng batuan dengan menggunakan teknik stereografis yang digunakan untuk menunjukkan jurus dan kemiringan dari suatu bidang. Teknik stereografis banyak digunakan untuk membantu mengidentifikasi jenis runtuh yang mungkin terjadi, pengeplotan secara bersamaan antara jurus dan kemiringan, baik muka lereng maupun bidang lemah.

**Finite Element Method (FEM)**

Metode elemen hingga (FEM) merupakan metode analisis suatu lereng batuan/tanah yang dibagi ke dalam sejumlah zona blok-blok kecil. Elemen-elemen pada suatu zona yang sudah diperkecil berkaitan dengan sejumlah titik simpul, untuk analisisnya dilakukan dengan menghitung perpindahan pada setiap titik simpul kemudian menggunakan fungsi interpolasi untuk diasumsikan dengan menggunakan *software* pemodelan lereng untuk mendapatkan nilai SRF. SRF merupakan besaran di dalam shear reduction method, dimana nilai SRF diasumsikan sama dengan nilai FK [6]. Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan dengan pendekatan FEM dengan cara pengurangan kuat geser sampai menggambarkan keruntuhan lereng, nilai yang didapatkan dari pendekatan itu digunakan sebagai faktor keamanan pada suatu lereng.

**Metode Scanline**

Metode ini digunakan untuk mengetahui orientasi bidang diskontinuitas pada permukaan yang mewakili orientasi bidang diskontinuitas secara keseluruhan. Pengambilan data *scanline* dengan cara mencatat semua karakteristik bidang diskontinuitas yang memotong tali yang dibentangkan di sepanjang permukaan batuan dengan batasan 30 centimeter keatas dan 30 centimeter kebawan dari garis pengamatan, batas toleransi perbedaan arah *scanline* adalah 20°, sehingga perbedaan tersebut masih dapat diabaikan.

**C. Hasil dan Pembahasan**

Nilai sifat fisik dan mekanik batuan diperoleh berdasarkan pengujian terhadap 2 sampel yang diambil dan dianggap mewakili, yaitu melalui uji sifat fisik yang terdiri dari *natural density*, *saturated density*, *dry density*, dan *porosity*. Dan uji sifat mekanik diperoleh berdasarkan uji kuat geser, kuat tarik, dan kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Pengujian Sifat Mekanik

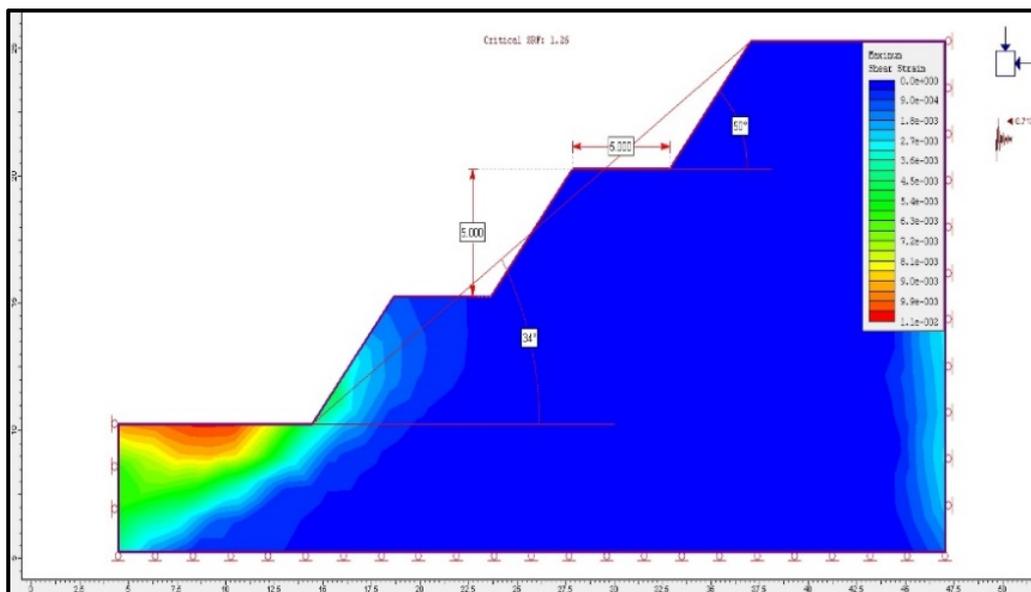
| Pengujian                                           |                                             | No Sampel |        | Litologi | Rata-Rata |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------|--------|----------|-----------|
|                                                     |                                             | 1         | 2      |          |           |
| <i>Unconfined Compression Strength (UCS)</i><br>Mpa | $\sigma_c$ (MPa)                            | 56.38     | 63.19  | Andesit  | 59.85     |
|                                                     | E (MPa)                                     | 2020.4    | 1955.3 |          | 192.9     |
|                                                     | $\nu$                                       | 0.217     | 0.27   |          | 0.217     |
| <i>Direct Shear</i>                                 | <i>Apparent Friction Angle Below Stress</i> | 40.15     | 39.42  |          | 39.85     |
|                                                     | <i>Residual Friction Angle</i>              | 28.19     | 27.55  |          | 27.87     |
|                                                     | <i>Cohesion</i>                             | 2.8       | 2.68   | 2.74     |           |
|                                                     | <i>Apparent Cohesion</i>                    | 1.68      | 1.63   | 1.65     |           |
| <i>Brazilian Strength</i>                           | (Mpa)                                       | 12.32     | 11.26  |          | 11.79     |

Dari hasil analisis menggunakan *rocklab*, didapatkan kohesi 0,998 Mpa, sudut geser dalam 57,54 deg, modulus elastisitas 15247 Mpa, kuat tarik -0,201 Mpa, dan nilai kuat tekan *uniaxial* sebesar 6,905 Mpa. Untuk hasil analisis menggunakan *software roclab* dijadikan sebagai *input material properties* dalam memodelkan lereng andesit karena hasil dari analisis program *rocklab* sudah disesuaikan dengan kondisi aktual lereng yaitu dengan ketinggian lereng 16 m dan kondisi material penyusun lereng yang terdiri dari batuan andesit.

**Tabel 2.** *Hoek and Brown Classification*

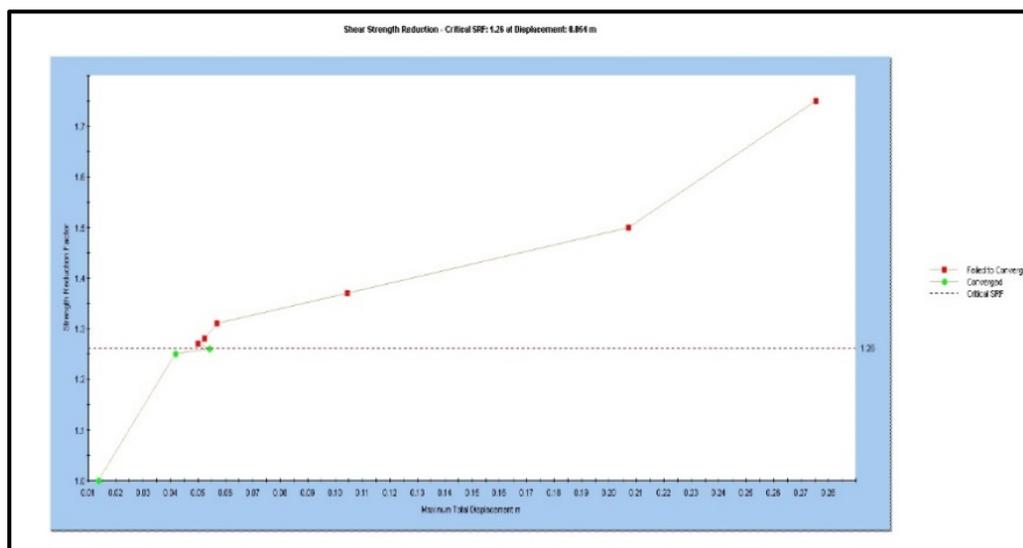
| <i>Hoek and Brown Classification [7]</i>       |               | Andesit 1                | Andesit 2                |
|------------------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>UCS of Intact Rock</i>                      | sigci         | 68.838 MPa               | 63.119 Mpa               |
| <i>Geological Strength Index</i>               | GSI           | 73                       | 73                       |
| <i>Konstanta Material</i>                      | mi            | 25                       | 25                       |
| <i>Disturbance Factor</i>                      | D             | 1                        | 1                        |
| <i>Hoek Brown Criterion</i>                    |               |                          |                          |
| <i>Reduced Value</i>                           | mb            | 3.63389                  | 3.63389                  |
| <i>Material Constant</i>                       | s             | 0.011109                 | 0.011109                 |
| <i>Material Coefficient</i>                    | a             | 0.501071                 | 0.501071                 |
| <i>Failure Envelope Range</i>                  |               |                          |                          |
| <i>Application</i>                             | <i>Slopes</i> |                          |                          |
| <i>sig3max</i>                                 |               | 1.10562 Mpa              | 1.10144 Mpa              |
| <i>Unit Weight</i>                             |               | 0.0257 MN/m <sup>3</sup> | 0.0257 MN/m <sup>3</sup> |
| <i>Slope Height</i>                            |               | 16 m                     | 16 m                     |
| <i>Mohr-Coulomb Fit</i>                        |               |                          |                          |
| <i>Cohesion</i>                                | c             | 0.998508 Mpa             | 0.9703213 Mpa            |
| <i>Friction</i>                                | phi           | 57.5441 degrees          | 57.3149 degrees          |
| <i>Rock Mass Parameters</i>                    |               |                          |                          |
| <i>Rock Mass Tensile Strength</i>              | sigt          | -0.20127 Mpa             | -0.192958 Mpa            |
| <i>Uniaxial Rock Mass Compressive Strength</i> | sigc          | 6.90591 Mpa              | 6.62071 Mpa              |
| <i>Global Rock Mass Compressive Strength</i>   | Sig cm        | 17.39 Mpa                | 16.6719 Mpa              |
| <i>Rock Mass Modulus Of Deformation</i>        | Em            | 15247.8 Mpa              | 14929.7 Mpa              |

Analisis lereng keseluruhan dibuat dengan menggunakan geometri lereng tunggal yang paling optimal dari rancangan geometri lereng tunggal yang sudah dianalisis, geometri lereng tunggal yang dipakai untuk rancangan lereng keseluruhan yaitu lereng dengan kemiringan 50°, dan ketinggian 5 m karena lereng dengan kemiringan tersebut jika memakai variasi ketinggian yang berbeda akan tetap menghasilkan FK >1,25, Pemodelan lereng keseluruhan dengan sudut 50° dan tinggi 5 m didapatkan nilai SRF sebesar 1,26 yang menunjukkan desain lereng dengan geometri tersebut termasuk desain lereng yang aman yang bisa dijadikan rekomendasi.



**Gambar 1.** Desain Lereng Keseluruhan

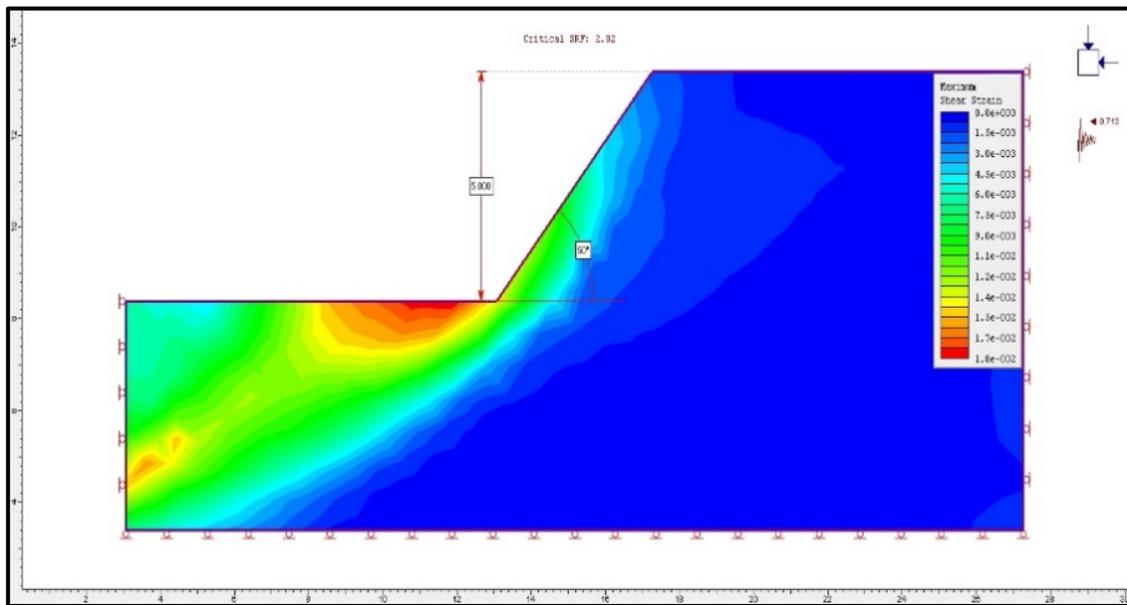
Dari hasil pemodelan tersebut, didapatkan grafik hubungan antara nilai SRF dan *Maximum Total Displacement* (MTD) menunjukkan bahwa pada lereng dengan kondisi kering dapat mengalami pergerakan muka lereng statis maksimal sebesar 0,054 m.



**Gambar 2.** Grafik MTD terhadap Nilai SRF

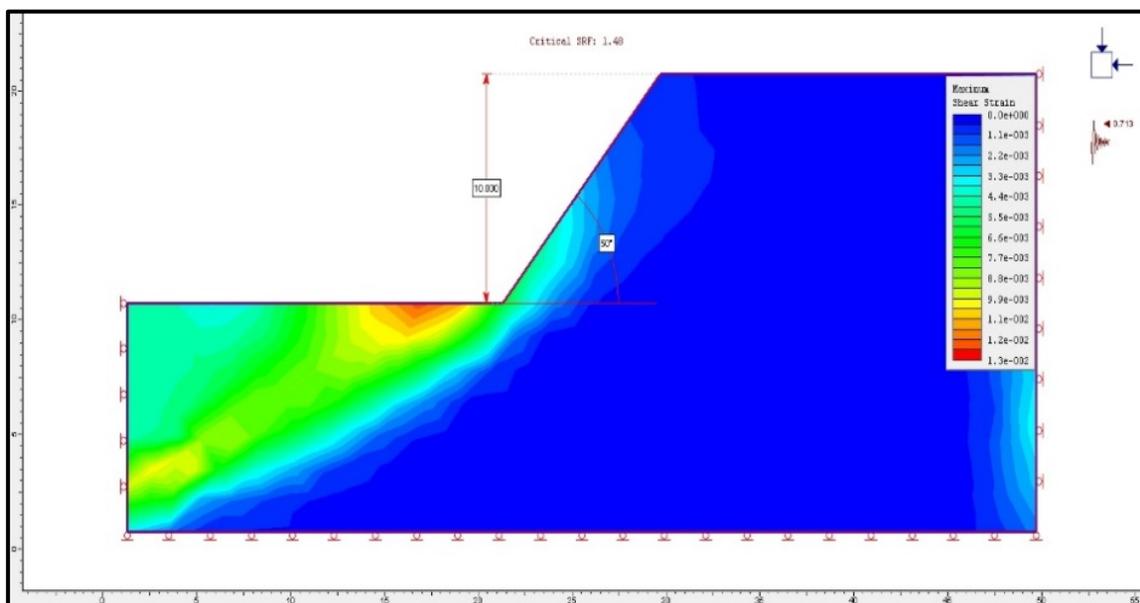
Dalam analisis lereng tunggal menggunakan tiga variasi ketinggian dan tiga variasi kemiringan untuk mengetahui besar perpindahan maksimum dari tiap-tiap variasi geometri lereng, yaitu menggunakan variasi ketinggian 5 m, 10 m, 15 m, dan tiga variasi kemiringan 50°, 60°, 70°, dari tiap-tiap variasi tersebut akan menghasilkan nilai SRF dan nilai total perpindahan maksimum yang berbeda-beda.

Lereng dengan ketinggian 5 m dimodelkan dengan tiga sudut lereng yang berbeda yaitu 50°, 60°, 70°, dari ketiga variasi didapatkan faktor keamanan yang menunjukkan lereng masih dalam kondisi stabil yaitu >1,25.



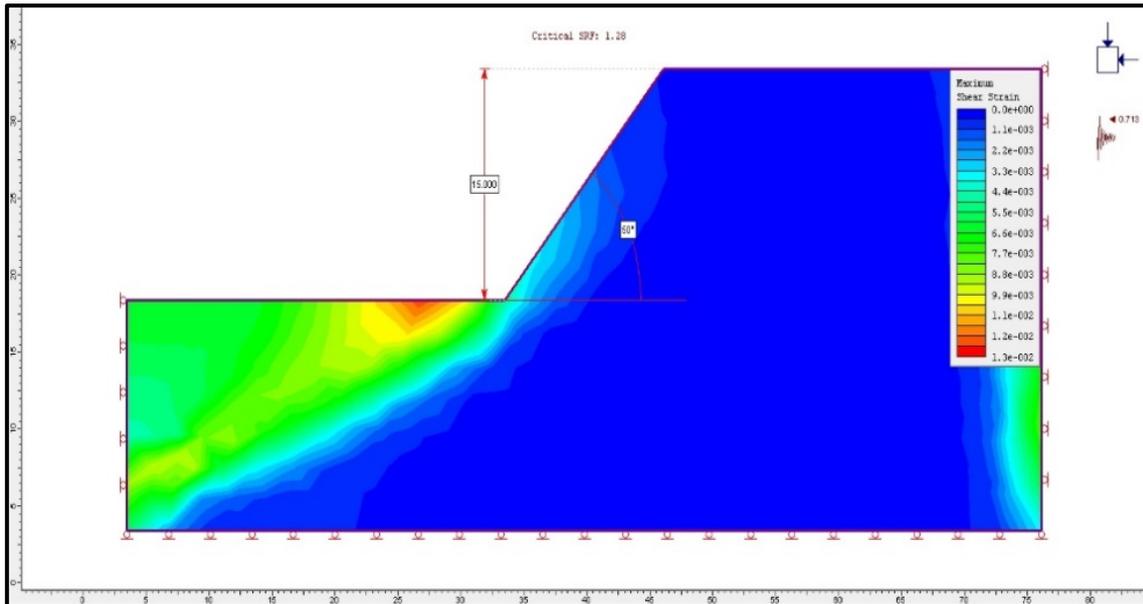
Gambar 3. H5-S50

Lereng dengan ketinggian 10 m dimodelkan dengan tiga sudut lereng yang berbeda yaitu 50°, 60°, 70°, dari ketiga variasi tersebut dua diantaranya didapatkan faktor keamanan yang menunjukkan lereng dalam kondisi stabil ( $>1.25$ ) dan salah satu desain memiliki faktor keamanan yang  $<1.25$  yang jika dimasukkan dalam klasifikasi Faktor Keamanan menurut Bowles [8] FK berada di range 1,07–1,25 sehingga dikategorikan dalam kelas kritis (pernah terjadi longoran).



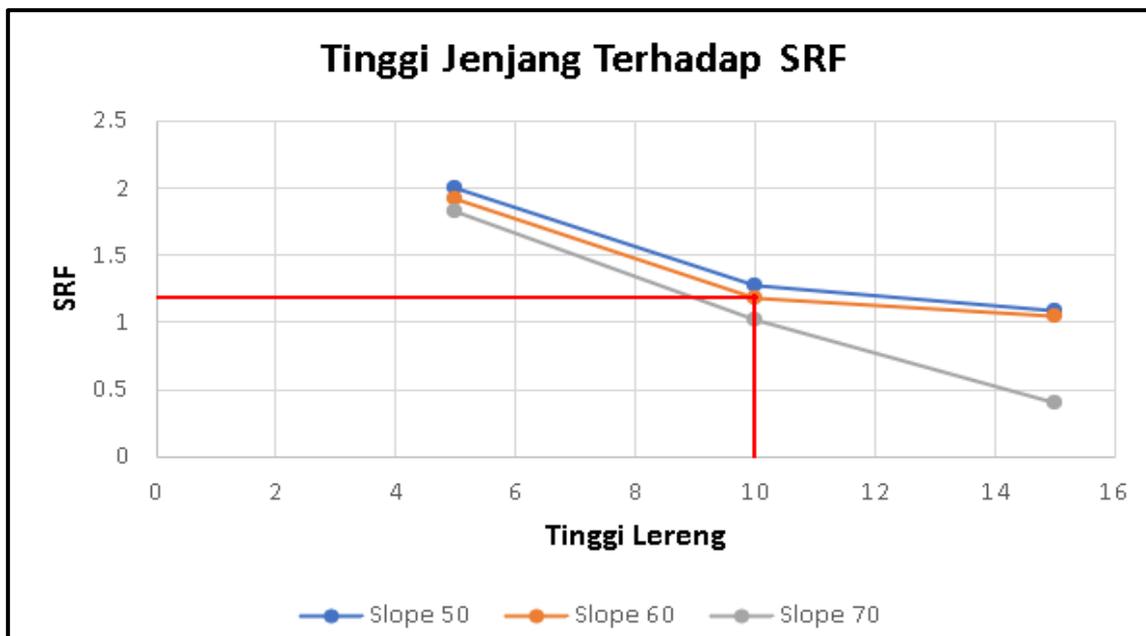
Gambar 4. H10-S50

Lereng dengan ketinggian 15 m dimodelkan dengan tiga sudut lereng yang berbeda yaitu 50°, 60°, 70°, dari ketiga variasi 2 diantaranya didapatkan faktor keamanan yang menunjukkan lereng dalam kondisi tidak stabil yaitu  $<1.25$ , dan 1 lainnya  $>1.25$ , Pemodelan lereng dengan sudut 50° dan tinggi 15 m didapatkan nilai SRF sebesar 1,28 yang menunjukkan desain lereng dengan geometri tersebut termasuk desain lereng yang tidak aman.



Gambar 5. H15-S50

Dari hasil pemodelan lereng tersebut dapat dibuat grafik tinggi jenjang terhadap nilai SRF (Gambar 5.24), geometri desain lereng tunggal yang dapat digunakan sebagai acuan adalah desain lereng dengan maksimum kemiringan 60° dan tinggi jenjang 10 m.



Gambar 6. Grafik Perbandingan SRF dan Tinggi Jenjang

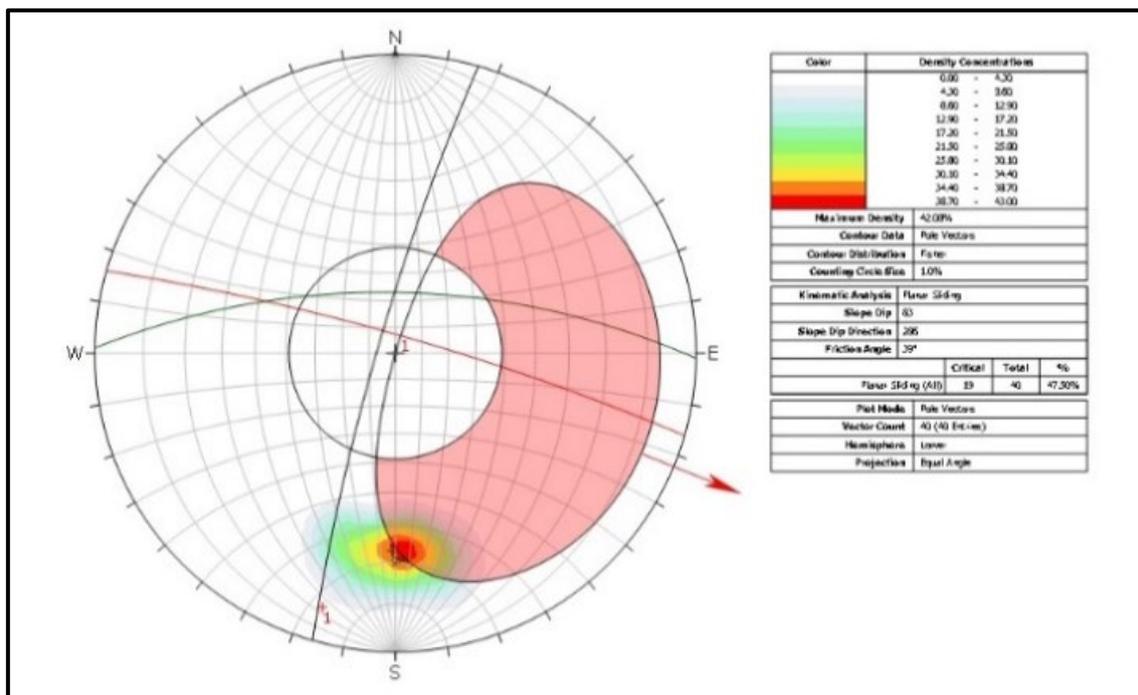
Dari hasil pemodelan lereng tunggal didapatkan SRF yang paling optimal memiliki ketinggian 5m dan kemiringan lereng 50°, rekapitulasi SRF dari setiap rancangan lereng dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.** Rekapitulasi SRF

| Kemiringan Lereng (°) | Tinggi Lereng (m) | SRF  |
|-----------------------|-------------------|------|
| 50                    | 5                 | 1.93 |
|                       | 10                | 1.28 |
|                       | 15                | 1.05 |
| 60                    | 5                 | 1.92 |
|                       | 10                | 1.19 |
|                       | 15                | 1.05 |
| 70                    | 5                 | 1.72 |
|                       | 10                | 1.01 |
|                       | 15                | 0.99 |

Analisis longsoran yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan metode kinematik yang digunakan dalam menganalisis potensi keruntuhan lereng dengan teknik stereografis. Lereng dengan jurus dan kemiringan (*strike/dip*) N286°E/83°, dan tinggi lereng 16 meter, bentangan *scanline* yang dilakukan sepanjang 25 meter, jumlah data kekar yang diambil pada bentangan tersebut sebanyak 40 data dengan jarak dari tiap bidang kekar mulai dari 10-100 cm, yang akan dijadikan input dalam menganalisis longsoran menggunakan *software*, jurus, dan kemiringan dari bidang lemah rata-rata berada pada kuadran 3 yaitu N270°E/68°.

Analisis kinematik menggunakan proyeksi stereografis bertujuan untuk mengetahui potensi longsoran yang terdapat pada rancangan lereng andesit dan mengetahui kestabilan lereng dengan berdasarkan orientasi bidang diskontinu dan sudut gesek dalam. Data yang dibutuhkan antara lain kemiringan dan arah kemiringan dari bidang diskontinu dan rancangan lereng, serta sudut gesek dalam. Dengan jurus dan kemiringan lereng yang diketahui untuk hasil analisis yang didapatkan longsoran yang berpotensi terjadi adalah longsoran bidang karena dari hasil analisis menunjukkan arah bidang lemah dan arah lereng hampir sejajar yaitu 286 dan 270, dan untuk syarat lainnya yang menunjukan longsoran bidang adalah sudut gesek dalam lebih kecil dari sudut kekar dan sudut lereng, sehingga persenan yang didapatkan dengan analisis menggunakan stereografis potensi untuk longsoran bidang sebesar 47,50%.



**Gambar 7.** Analisis Longsoran



**Gambar 8.** Gambaran Longsoran

#### **D. Kesimpulan**

Dari penyelidikan geoteknik yang dilakukan, serta analisis kestabilan lereng yang disimulasikan dapat disimpulkan bahwa potensi longsor pada lereng yang dapat terjadi disebabkan oleh bidang diskontinuitas yang terdapat pada lereng dan geometri lereng yang tidak sesuai sehingga dapat menimbulkan potensi longsor bidang, untuk material pembentuk lereng tidak menyebabkan terjadi longsor karena material pembentuk lereng masih bisa mempertahankan kestabilan lereng tersebut. Perilaku batuan pada lereng tergolong kedalam batuan keras sedang yang ditentukan menggunakan klasifikasi kuat tekan menurut Bieniawski dan Tamrock dengan nilai kuat tekan Bieniawski sebesar 50 Mpa-100 Mpa dan nilai kuat tekan Tamrock sebesar 60 Mpa-120 Mpa [9]. Kestabilan lereng keseluruhan menggunakan tinggi 5 m dan kemiringan 50°, dari hasil pemodelan lereng keseluruhan didapatkan SRF 1,26, hasil analisis lereng keseluruhan tersebut masih tergolong stabil. Dari analisis kestabilan lereng tunggal dengan ketinggian 5 m dan tiga variasi sudut didapatkan SRF untuk sudut 50° sebesar 2,02, sudut 60° sebesar 1,96, dan sudut 70° sebesar 1,88. Dari analisis kestabilan lereng tunggal dengan ketinggian 10 m dan tiga variasi sudut didapatkan SRF untuk sudut 50° sebesar 1,48, sudut 60° sebesar 1,34 dan sudut 70° sebesar 1,19. Dari analisis kestabilan lereng keseluruhan dengan ketinggian 15 m dan tiga variasi sudut didapatkan SRF untuk sudut 50° sebesar 1,88, sudut 60° sebesar 1,19 dan sudut 70° sebesar 0,95. Untuk analisis kestabilan lereng tunggal didapatkan lereng dengan kondisi optimal yaitu lereng dengan kemiringan maksimum 50° dan tinggi 10 m karena menghasilkan SRF >1,25 sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam mendesain geometri lereng pada lokasi penelitian.

#### **Daftar Pustaka**

- [1] Nuryanto, "Analisis Stabilitas dan Desain Perkuatan Lereng Kawasan Sentul City," *J. Ilm. Desain dan Konstr.*, vol. 20, no. 2, pp. 190–203, 2021.
- [2] R. F. Hirnawan, "Peran Faktor-Faktor Penentuan Zona Berpotensi Longsor dalam Mandala Geologi dan Lingkungan Fisiknya di Jawa Barat," *Majalah Ilmiah Universitas Padjajaran*, 1994.
- [3] Fachrul Rozy Elba Ansofa, Yunus Ashari, and Iswandar, "Simulasi Potensi Gerakan Tanah Lereng Alami Akibat Perubahan Tata Guna Lahan Periode Tahun 2013 – 2020 Wilayah Kecamatan Cimendan, Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat," *J. Ris. Tek. Pertamb.*, vol. 1, no. 2, pp. 89–100, 2021, doi: 10.29313/jrtp.v1i2.390.

- [4] M. A. Azizi, S. Kramadibrata, R. K. Wattimena, I. D. Sidi, S. Basuki, and S. Suhedi, “Aplikasi Probabilistik Untuk Analisis Kestabilan Lereng Tunggal (Studi Kasus Di Pt. Tambang Batubara Bukit Asam Tbk. Tanjung Enim, Sumatera Selatan),” *Pros. Temu Profesi Tah. XX PERHAPI Lomb. 2011*, pp. 511–522, 2011.
- [5] R. D. Holtz and W. D. Kovacs, *An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series*. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1981.
- [6] D. Trisnawati, S. Suhesti, and W. K. Hidajat, “Kajian Kekuatan Tanah dan Kestabilan Tubuh Tanggul pada Rencana Tanggul Wedok Lumpur Sidoarjo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur,” *J. Geosains dan Teknol.*, vol. 2, no. 3, p. 117, 2019, doi: 10.14710/jgt.2.3.2019.117-125.
- [7] E. Hoek and J. Bray, *Rock Slope Engineering*. London: The Institution Mining and Metallurgy, 1995.
- [8] J. E. Bowles, *Sifat – Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga, 1991.
- [9] M. A. Rai, S. Kramadibrata, and R. K. Wattimena, *Mekanika Batuan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2014.