Optimalisasi Geometri Lereng Berdasarkan Perhitungan Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran pada Tambang Batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk

Izza Achmad Firdaus[1], Yudho Dwi Galih Cahyono[2], dan Esthi Kusdarini[3]
Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[2]
e-mail: izzaachmadfirdaus354@gmail.com

ABSTRACT

The optimization of slope geometry in the limestone mining of PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk faces issues where the actual slope safety factor (SF) does not approximate 1.2, instead showing values greater than 3. An SF close to 1.2 is considered safer compared to higher values. Thus, optimizing the slope geometry by adjusting the height and inclination of the single slope and overall slope is necessary to achieve optimal SF values. This study aims to classify rock masses, determine material property values for slope modeling, and provide recommendations for safe and efficient slope geometry. The research employs the Finite Element Method (FEM) using the Strength Reduction Method (SRM) with Hoek and Brown criteria, aided by Rocscience Phase2 V.8.0 software. The optimal slope geometry results indicate stable conditions with an SRF value in saturated conditions. The recommended single slope remains stable up to an inclination of 87°, a height of 15 m, and a width of 5 m, with an SRF value of 1.2, Std. Dev. Critical SRF 0, SF 1.411, and a probability of failure (PF) of 0%. For the overall slope, each bench angle is 87°, with an overall slope angle of 79°, a total height of 60 m, and a bench width of 5 m. The SRF analysis using SRM yields a Mean Critical SRF of 2.02, Std. Dev. Critical SRF 0, an SF value of 1.469, and a PF of 0%.

Keywords: *Limestone, Safety Factor, Slope Geometry, Strength Reduction Factor, Strength Reduction Method*

ABSTRAK

Optimalisasi geometri lereng pada tambang batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk menghadapi permasalahan di mana faktor keamanan (FK) aktual tidak mendekati nilai 1,2, melainkan lebih dari 3. FK yang mendekati 1,2 lebih aman dibandingkan nilai FK yang jauh lebih tinggi. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi geometri lereng dengan menyesuaikan tinggi dan kemiringan lereng tunggal dan keseluruhan untuk mencapai nilai FK yang lebih optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengklasifikasikan massa batuan, menentukan karakteristik material untuk pemodelan lereng, serta memberikan rekomendasi geometri lereng yang aman dan efisien. Metode yang digunakan adalah Finite Element Method (FEM) dengan pendekatan Strength Reduction Method (SRM), menggunakan kriteria Hoek dan Brown serta perangkat lunak Rocscience Phase2 V.8.0. Hasil optimalisasi menunjukkan bahwa kondisi lereng aman dengan nilai SRF dalam kondisi jenuh. Pada lereng tunggal yang direkomendasikan, sudut lereng 87°, tinggi 15 m, dan lebar 5 m, dengan nilai SRF 1,2, Std. Dev. Critical SRF 0, FK 1,411, dan probabilitas kelongsoran (PK) 0%. Untuk lereng keseluruhan, sudut tiap bench 87°, sudut keseluruhan 79°, tinggi total 60 m, dan lebar bench 5 m. Hasil analisis SRF menggunakan metode SRM menghasilkan Mean Critical SRF 2,02, Std. Dev. Critical SRF 0, nilai FK 1,469, dan PK 0%.

Kata kunci: Batugamping, Faktor Keamanan, Geometri Lereng, Strength Reduction Factor, Strength Reduction Method

PENDAHULUAN

Aktivitas penambangan dengan sistem tambang terbuka menghadapi tantangan geoteknik yang mempengaruhi stabilitas lereng. Stabilitas lereng penting untuk kelancaran produksi dan keselamatan kerja. Faktor keamanan (FK) digunakan untuk menilai kestabilan lereng, namun tidak cukup tanpa mempertimbangkan probabilitas kelongsoran (PK). Penelitian ini menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan pendekatan Strength Reduction Method (SRM), yang memiliki keunggulan dalam memodelkan geometri lereng kompleks.

Penelitian dilakukan di tambang batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk dengan tujuan memberikan rekomendasi geometri lereng yang lebih optimal[1]. Hasil analisis menunjukkan bahwa optimalisasi geometri lereng dapat meningkatkan efisiensi operasional tanpa mengorbankan faktor keamanan. Dengan mempertimbangkan faktor mekanik batuan serta kondisi lereng eksisting, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang bermanfaat bagi industri pertambangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip Dasar Kestabilan Lereng

Pada prinsipnya sebuah lereng dikatakan aman (stabil), akan stabil maupun tidak stabil apabila tegangan geser batuan yang menyebabkan lereng tersebut longsor (*driving forces*) bernilai sama besar dengan tegangan geser batuan yang menahan lereng tersebut longsor (*resisting forces*)[2]. Kestabilan lereng dipengaruhi beberapa faktor yang dapat dinyatakan secara sederhana sebagai gaya penahan dan gaya penggerak yang bertanggung jawab atas kestabilan lereng. Apabila gaya yang menahan (*anti-avalanche resistance*) memiliki nilai lebih tinggi dari pada gaya penggerak, suatu lereng dapat dipastikan dalam kondisi stabil (aman)[3]. Tetapi jika gaya yang menahan bernilai lebih rendah daripada gaya penggeraknya, lereng tersebut dapat dipastikan dalam kondisi tidak stabil (tidak aman) dan kemungkinan akan terjadi kelongsoran. Permasalahan pada sebuah lereng adalah kelongsoran, longsoran sendiri adalah terjadi karena pergerakan tanah atau batuan saat gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak. Untuk menentukan tingkat kestabilan lereng, terdapat istilah yaitu faktor keamanan (FK)[4].

Klasifikasi Rock Mass Rating

Rock Mass Rating (RMR) adalah suatu meode yang dipakai dalam melakukan pengklasifikasian massa batuan. Klasifikasi RMR ini diusulkan oleh Bieniawski (1989)[5] berdasarkan 5 (lima) parameter. Parameter - parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas massa batuan yaitu kuat tekan batuan utuh (UCS), *Rock Quality Designation* (RQD), jarak diskontinuitas (*Spacing of discontinuites*), kondisi diskontinuitas (*Condition of discontinuites*) dan kondisi air tanah (*Groundwater conditions*). Selain itu terdapat satu parameter tambahan digunakan sebagai pengontrol kondisi massa batuan yaitu orientasi bidang kekar.

Metode Numerik

Metode numerik adalah salah satu metode yang dipakai dalam menganalisis stabilitas suatu lereng pada tambang dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antara material penyusul lereng, geometri lereng dan kondisi beban pada lereng tambang. Metode ini kerap digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng pada kondisi yang rumit seperti lereng dengan kondisi material yang bersifat anisotrop (sifat material berubah tergantung pada arah), lereng dengan mekanisme keruntuhan yang cukup kompleks, dan lereng yang memiliki karakteristik tegangan-regangan nonlinier (tidak berbanding lurus)[6]. Konsep dasar metode numerik melibatkan pembagian suatu model memenjadi elemen-elemen kecil (*discretizaton*) dan menghitung respon material terhadap kondisi tertentu menggunakan menggunakan prinsip mekanika batuan. Pada metode ini mencakup beberapa pendekatan seperti Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*), dan Metode Perbedaan Hingga (*Finite Difference Method*)[7]. Adapun dalam penelitian ini, penulis menggunakan metode metode numerik yaitu dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM).

Faktor Keamanan (FK) - Metode Elemen Hingga (FEM)

Metode elemen hingga pertama kali diperkenalkan pada tahun 1967 oleh ilmuwan geoteknik bernama Clough dan Woodward. Finite Element Method (FEM) ini didasarkan pada hubungan antara tegangan dan regangan, di mana potensi kelongsoran suatu bidang dianalisis dengan mengidentifikasi titik atau bidang lemah dalam tanah atau batuan. Pendekatan ini dilakukan dengan secara bertahap mengurangi kuat geser tanah atau batuan, yang dikenal sebagai Shear Strength Reduction[8]. Metode elemen hingga (Finite Element Method) juga digunakan dalam analisis lereng tanah atau batuan dengan membagi area tersebut ke dalam sejumlah zona kecil yang disebut elemen. Elemen-elemen ini saling berhubungan melalui titik-titik simpul pada zona yang telah diperkecil. Untuk menentukan nilai SRF (Safety Reduction Factor), dilakukan analisis dengan menghitung perpindahan di setiap titik simpul, kemudian menggunakan fungsi interpolasi yang diasumsikan dengan bantuan perangkat lunak permodelan lereng[9].

Strength Reduction Method (SRM)

Pendekatan Strength Reduction Method (SRM) dalam metode FEM merupakan teknik yang efektif untuk menilai faktor keamanan lereng [10]. Metode ini bekerja dengan mengurangi parameter kekuatan geser material hingga mencapai kondisi keruntuhan. Parameter utama yang digunakan dalam analisis ini meliputi sifat mekanik batuan seperti kohesi, sudut gesek dalam, dan kepadatan material yang diperoleh melalui uji laboratorium[11].

ISSN 2775-5630

Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown

Kriteria keruntuhan Hoek–Brown merupakan hubungan empiris yang menggambarkan peningkatan kurva non-linier kekuatan puncak batuan isotropik seiring dengan bertambahnya tekanan. Rumus kriteria keruntuhan Hoek–Brown untuk massa batuan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma 1' = \sigma 3' + \sigma ci \left(mb \frac{\sigma 3}{\sigma ci} + s \right)^a \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan :

σ_1' = Tegangan efektif maksimum saat batuan mengalami keruntuhan.
σ_3' = Tegangan efektif minimum saat batuan mengalami keruntuhan.
σci = Nilai UCS batuan utuh (*Intact rock),* dengan nilai s = 1 dan nilai
a = 0,5 untuk batuan utuh.
Mb = Nilai konstanta Hoek – Brown untuk massa batuan.
s dan a = Nilai konstanta yang tergantung pada karakteristik massa batuan.

Dalam kriteria keruntuhan Hoek-Brown, konstanta mb menggantikan konstanta Phi (sudut geser dalam), sementara konstanta s menggantikan konstanta kohesi. Kriteria Hoek-Brown dihitung menggunakan perangkat lunak Phase2[12]

Hubungan SRF - FK

Keterkaitan antara SRF dan FK dalam menentukan stabilitas lereng sangatlah berikatan atau bergantungan (saling berhubungan). Faktor keamanan (FK) dapat didefinisikan sebagai rasio antara kuat geser aktual dan kuat geser minimum yang menyebabkan keruntuhan pada suatu lereng. Hal ini dikenal dengan konsep *Strength Reduction Factor* (SRF)[7]. SRF adalah besaran di dalam *Strength reduction method* (SRM), dimana nilai SRF diasumsikan sama dengan FK. Hubungan antara SRF dan FK dapat ditemukan dalam metode Elemen Hingga (FEM) dengan menggunakan pendekatan pengurangan kekuatan geser (SRM), dimana dalam metode ini nilai FK besarnya sama dengan nilai faktor reduksi kekuatan geser (SRF) pada saat lereng akan mengalami keruntuhan atau tepat akan terjadi keruntuhan[3].

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{\frac{c}{SRF} + \sigma_n \tan\left(\tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{SRF}\right)\right)} \quad \text{.....(2)}$$

$$\text{FK} = \frac{C + \sigma_n \tan \Phi}{\left(\frac{C + \sigma_n \tan \Phi}{SRF}\right)} \quad \text{..... .....(3)}$$

Ketika tepat akan terjadi keruntuhan besar nilai SRF sama dengan nilai FK tepat akan terjadi keruntuhan atau nilai FK sama dengan 1.

Tabel 1. Standar FK dan PK dalam stabilitas lereng tambang

Jenis Lereng	Dampak Longsor	FK (min) (Statistic)	FK (min) (Dinamic)	PK max P [FK<1]
Tunggal/Jenjang (*Bench*)	Low-High	1.1	NA	25 - 50 %
Multi Jenjang (*Interramp*)	Low	1.15 - 1.2	1	25%
	Medium	1.2	1	20%
	High	1.2 - 1.3	1.1	10%
Keseluruhan (Overall)	Low	1.2 - 1.3	1	15 - 20 %
	Medium	1.3	1.05	5 - 10 %
	High	1.5	1.1	≤ 5 %

Probabilitas Kelongsoran - *Point Estimate Method* (PEM)

Point Estimate Method (PEM) adalah suatu teknik yang digunakan dalam memperkirakan probabilitas kelongsoran lereng (PK) dengan cara yang efisien, mudah dipahami, mudah digunakan, dan hanya membutuhkan sedikit pengetahuan tentang teori probabilitas[13]. Nilai yang diharapkan, standar deviasi atau momen probabilistik dari urutan yang lebih tinggi dari setiap fungsi acak dapat ditentukan secara efisien menggunakan *Point Estimate Method* (PEM), Rosenblueth (1975)[14]. Metode ini mengandalkan penggunaan titik estimasi untuk menghitung momen probabilistik dari fungsi acak, yang sangat berguna

dalam analisis kestabilan lereng. Hal ini secara signifikan meningkatkan waktu dan upaya komputasi. Rosenblueth (1975)[14] juga mengusulkan teknik untuk mengurangi jumlah titik perhitungan menjadi 2n + 1 dalam kasus variabel yang tidak berkolerasi dan ketika kemiringan dapat diabaikan.

Dalam metode estimasi titik, variabel acak kontinu umumnya digantikan oleh variabep acak diskrit yang terdiri dari N pulsa, dengan distribusi probabilitas.

P_x (x) = $\sum_{i=1}^{N} \delta$ (x - x_i) p (x_i).....(4)

Dimana: δ (x - x_i) adalah delta direct, dan p (x_i) adalah probabilitas yang diberikan ke titik x, untuk nilai tetap dari variabel acak.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan pendekatan Strength Reduction Method (SRM) untuk menganalisis kestabilan lereng pada tambang batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Metode ini dipilih karena mampu memberikan hasil yang lebih akurat dalam kondisi geometri lereng yang kompleks[15]. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Rocscience Phase2 V.8.0 untuk menghitung nilai Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PK).

1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan, pengukuran geometri lereng, serta pengambilan sampel batuan untuk diuji di laboratorium. Sementara itu, data sekunder dikumpulkan dari dokumen perusahaan yang mencakup informasi terkait geologi regional, sifat fisik dan mekanik batuan, serta parameter desain lereng eksisting.

2. Pengujian Laboratorium

Sampel batuan yang diambil dari lokasi penelitian diuji di laboratorium untuk menentukan parameter fisik dan mekanik yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng. Uji laboratorium yang dilakukan meliputi:

- Pengujian kuat tekan uniaksial (Uniaxial Compressive Strength - UCS).
- Pengujian kohesi dan sudut gesek dalam menggunakan metode direct shear test.
- Pengujian densitas batuan untuk mendapatkan nilai bobot isi asli, jenuh dan kering.

3. Perhitungan Faktor Keamanan (FK)

Faktor keamanan lereng dihitung menggunakan metode Strength Reduction Method (SRM). Perhitungan FK dilakukan dengan rumus:

FK = (c' + σ tan φ') / τ .....(5)

Di mana:

c' = kohesi batuan (kPa)
σ = tegangan normal (kPa)
φ' = sudut gesek dalam (°)
τ = tegangan geser batuan (kPa)

Dimana untuk keadaan : F > 1.0 (lereng dalam keadaan stabil)
F = 1.0 (lereng dalam keadaan kritis)
F < 1.0 (lereng dalam keadaan tidak stabil)

Jika nilai Faktor Keamanan lebih besar daripada 1.0 (FK > 1.0), maka gaya penahan bernilai lebih besar dari pada gaya penggerak dan lereng tersebut dalam kondisi stabil. Sebaliknya, jika nilai faktor keamanan lebih kecil daripada 1.0 (FK < 1.0), maka gaya penahan bernilai lebih kecil dari gaya penggerak dan lereng berada dalam kondisi tidak stabil yang berarti dalam waktu yang akan datang kemungkinan akan terjadi kelongsoran pada lereng tersebut[16].

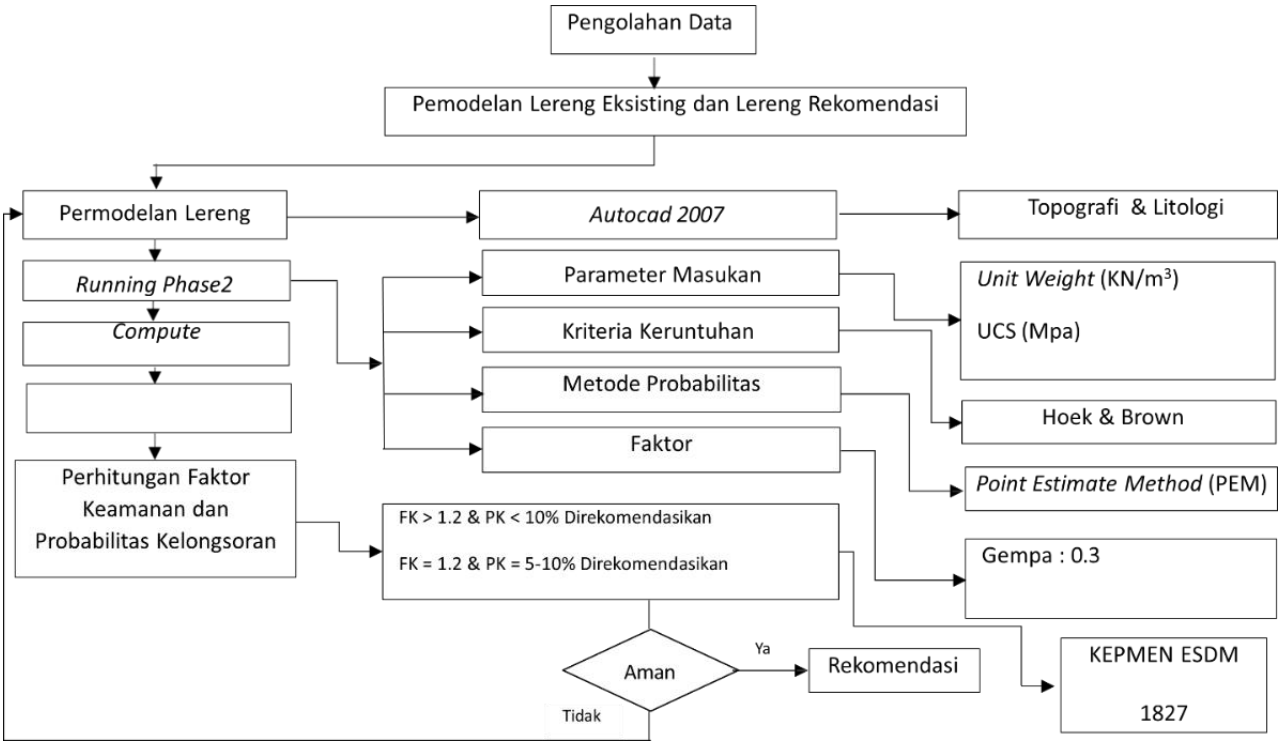
4. Pemodelan dan Simulasi

Setelah parameter fisik dan mekanik batuan diperoleh, dilakukan pemodelan geometri lereng menggunakan perangkat lunak Phase2 V.8.0. Simulasi dilakukan dengan menerapkan metode *Finit Element* dengan menggunakan pendekatan pengurangan kekuatan geser (Strength Reduction Method - SRM) untuk mengevaluasi nilai FK yang mana pada metode ini nilai FK besarnya sama dengan nilai SRF (faktor reduksi kuat geser) dalam kondisi kritis (sebelum lereng runtuh) dan menentukan kondisi kestabilan lereng dalam

berbagai skenario. Analisis dilakukan dengan kondisi air tanah yang paling beresiko terhadap kelongsoran lereng yaitu dalam kondisi jenuh.

5. Analisis dan Interpretasi Data

Pada tahap analisis dan interpretasi data menggunakan bantuan perangkat lunak Rocscience Phase2 V.8.0 untuk menghitung nilai Faktor Keamanan (FK) dan Probabilitas Kelongsoran (PK) lereng tambang. Selain itu pada tahap ini juga melakukan analisis kondisi lereng aktual (eksisting) dan melakukan analisis rekomendasi lereng yang aman dan efisien.



Gambar 1. Diagram alir pengolahan data.
Sumber : Peneliti, 2024

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Massa Batuan

hasil perhitungan *Rock Mass Rating* (RMR) didapatkan hasil daerah penelitian memiliki nilai pembobotan total RMR sebesar 77. Adapun nilai total bobot RMR terdiri dari nilai UCS yaitu 17,72 Mpa memiliki bobot sebesar 2. Nilai *Rock Quality Designation* (RQD) rata-rata yaitu 93,26% yang memiliki bobot sebesar 20 dengan menggunakan metode tidak langsung dalam perhitungan nilai RQD. Jarak diskontinuitas rata-rata yaitu 0,602 meter memiliki nilai bobot sebesar 15. Kondisi diskontinuitas yaitu tidak menerus, permukaan kasar, dinding sedikit lapuk, tidak ada material *filling* (material pengisi), bukaan kekar <0,1mm (sangat rapat) memiliki bobot sebesar 25. Kondisi air tanah berada dalam keadaan kering memiliki bobot sebesar 15. Kemudian orientasi bidang diskontinuitas dalam kondisi sangat menguntungkan yaitu dengan dip antara 45° - 90° memiliki bobot sebesar 0. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa hasil klasifikasi massa batuan menggunakan perhitungan RMR tergolong dalam kategori nomor kelas II (kategori baik).

Tabel 2. Perhitungan RMR (Bieniawski, 1989)

No	Parameter RMR	Keterangan	Bobot
1	Kuat tekan batuan	17,72 Mpa	2
2	Rock Quality Designation (RQD)	93,26%	20

ISSN 2775-5630

No	Parameter RMR	Keterangan	Bobot
3	Jarak diskontinuitas	0,602	15
4	Kondisi diskontinuitas	Permukaan kasar, regangan <1 mm, dinding gak lapuk	25
5	Kondisi air tanah	Kering	15
6	orientasi diskontinuitas	Dip (45°-90°)	0
7	Total Bobot	-	77
	Klasifikasi		Baik

Note: Peneliti,2024

Karakteristik Propertis Material

Hasil karakteristik propertis material pada desain lereng tambang menunjukkan bahwa parameter sifat fisik dan mekanik, seperti kuat tekan uniaksial (UCS) dan bobot isi batuan sesuai dengan standar keamanan lereng. Hasil pendistribusian statistik data bobot isi asli, kering, jenuh dan UCS menggunakan jenis distribusi statistik gamma. Parameter ini digunakan dalam pemodelan dan simulasi untuk memperoleh desain lereng yang optimal.

Tabel 3. Sifat fisik batuan

Parameter Uji Sifat Fisik Batuan	Kode sample Batuan IZA_01_LM	Kode Sample Batuan IZA_02_LM	Kode Sample Batuan IZA_03_LM	Rata-Rata
(*natural density)*, KN/m^3	20,5	21,18	21,48	21,05
(*dry density*), KN/m^3	20,2	21,08	21,48	20,92
(*saturated density*), KN/m^3	21,77	22,46	22,65	22,29

Note: Peneliti,2024

Tabel 4. Sifat mekanik batuan

No	Parameter Uji Sifat Mekanik Batuan	Kode sample Batuan IZA_01	Kode Sample Batuan IZA_02	Kode Sample Batuan IZA_03	Rata-Rata
1	Kuat Tekan Uniaksial (UCS) (Mpa)	12.65	25.39	15.11	17.72
	UCS (Kpa)	12650	25390	15110	17720
2	Modulus Elastisitas (Mpa)	3246.64	5306.79	11526.05	6693.16
	Modulus (Kpa)	3246640	5306790	11526050	6693160
3	Nisbah Poisson	0.15	0.14	0.54	0.3
4	Sudut Geser Dalam (°)	34.94°	30.88°	26.74°	30.85°
5	Kohesi (C) kg/cm²	2.9753	2.8608	0.4159	2
	KN/m²	291.78	280.55	40.79	204.37

Note: Peneliti,2024

Tabel 5. Jenis distribusi pada setiap parameter inputan

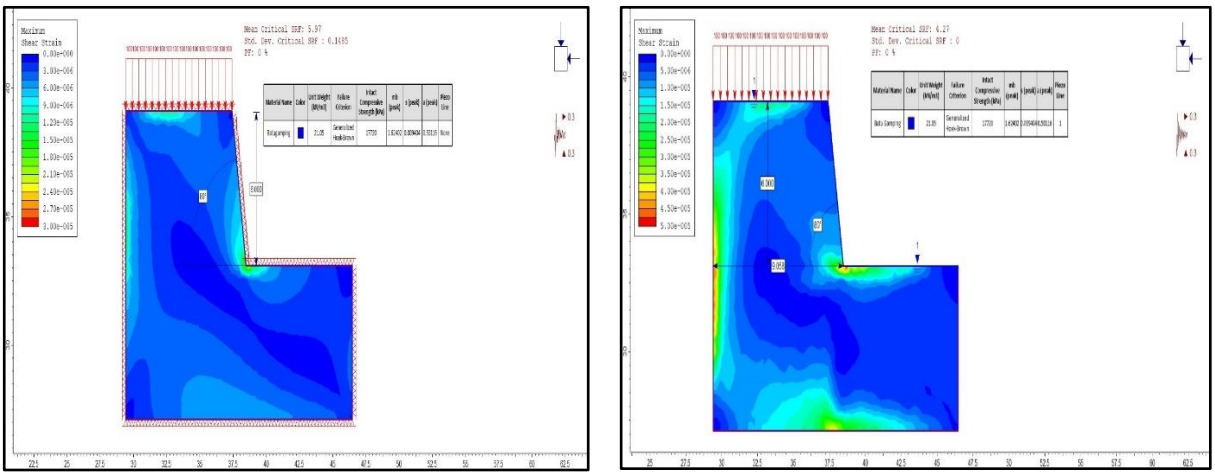
Litologi	Parameter Inputan	Mean	SD	Rel.Min	Rel.Max	Type of Distribution
Batugamping (Limestone)	Bobot Isi Kering	20.92	0.54	0.72	0.56	Gamma
	Bobot Isi Basah	22.29	0.38	0.52	0.36	Gamma
	Bobot Isi Asli	21.05	0.41	0.55	0.43	Gamma
	Hoek-brown mb parameter	1.624	0	0	0	Gamma
	Hoek-brown s parameter	0.0094	0	0	0	Gamma
	Hoek-brown a parameter	0.501	0	0	0	Gamma
	UCS	17.72	5.3	5.07	7.67	Gamma

Note: Peneliti,2024

Analisis FK dan PK Lereng Eksisting

Berdasarkan hasil running model lereng aktual pada *software Rocsience Phase2 V8.0* didapatkan bahwa pada lokasi penelitian kondisi lereng termasuk dalam kategori aman. Dimana besar *Mean Critical SRF* lereng eksisting (aktual) dalam kondisi kering yaitu sebesar 5,97, nilai *Std. Dev. Critical SRF* sebesar 0,1485, nilai faktor keamanan (FK) dihitung dengan menggunakan rumus yaitu sebesar 4,7 dan nilai probabilitas kelongsoran (PK) yang didapatkan adalah 0%. Sedangkan besar *Mean Critical SRF* lereng aktual (eksisting) dalam kondisi jenuh atau basah yaitu sebesar 4,27, nilai *Std. Dev. Critical SRF* sebesar 0, nilai faktor keamanan (FK) dihitung dengan menggunakan rumus yaitu sebesar 3,68 dan nilai probabilitas kelongsoran (PK) yang didapatkan adalah 0% .

Kondisi lereng saat ini memiliki geometri yang cukup stabil, tetapi belum optimal dari segi efisiensi operasional. Berdasarkan hasil analisis menggunakan perangkat lunak Phase2 V.8.0, nilai faktor keamanan (FK) pada lereng eksisting berada di atas 3, yang menunjukkan kestabilan tinggi, namun menyebabkan ketidakefisienan dalam penggunaan material dan luas area penambangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimalisasi geometri lereng agar SRF mendekati nilai yang lebih optimal, yaitu sekitar 1,2.



(a) (b)

Gambar 2. a) Lereng eksisting kondisi kering, b) Lereng eksisiting kondisi jenuh
Sumber : Peneliti, 2024

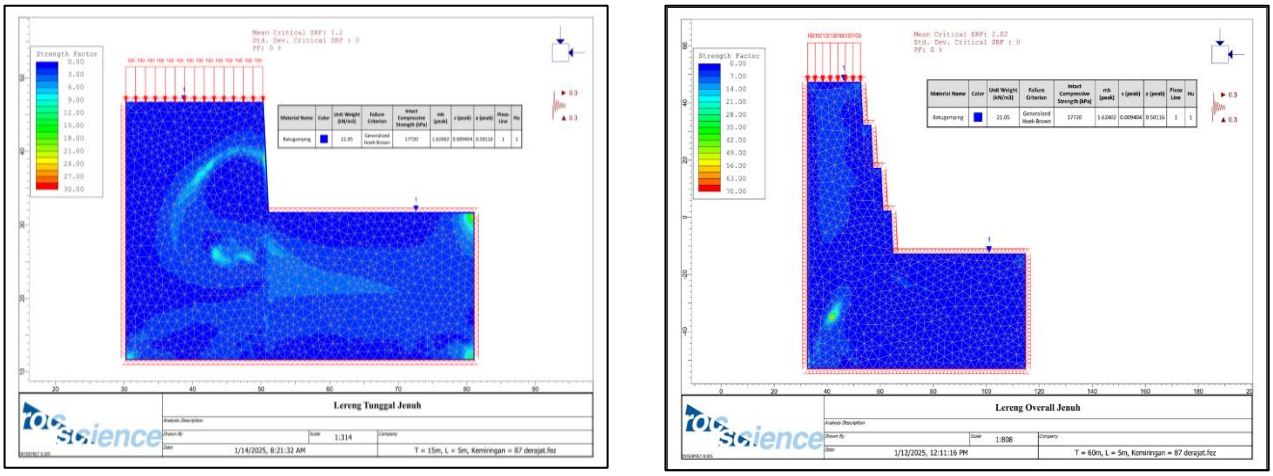
Analisis FK dan PK Lereng Rekomendasi

Rekomendasi lereng yang diberikan akan didasarkan pada perhitungan *nilai Mean Critical SRF* yang diasumsikan sebagai nilai FK, juga dengan bantuan perhitungan FK dengan menggunakan rumus Mohr-Coulomb. Perhitungan nilai FK dan PK menggunakan metode FEM dan acuan kondisi air tanah untuk rekomendasi lereng yang digunakan didasarkan pada Hoek dan Bray yaitu dalam kondisi jenuh,

dikarenakan dalam kondisi jenuh dapat diperkirakan bahwa kondisi lereng berada dalam kondisi yang paling tidak aman. Sedangkan probabilitas kelongsoran yang digunakan untuk rekomendasi lereng mengacu terhadap regulasi KEPMEN ESDM No. 1827K/30/MEM/2018 yang dimana rekomendasi lereng adalah maksimal sebesar 10%.

Dalam optimalisasi geometri lereng menghasilkan rekomendasi yang lebih efisien dengan FK mendekati 1,2. Setelah dilakukan simulasi dengan metode Strength Reduction Method (SRM) untuk mencari nilai Strength Reduction Factor (SRF), diperoleh rekomendasi geometri lereng yang lebih optimal. Rekomendasi ini mencakup:

- **Lereng tunggal (Single Slope):**
  Sudut kemiringan: 87°, tinggi lereng: 15 m, lebar lereng: 5 m, nilai SRF: 1,2, nilai faktor keamanan (FK): 1,411, dan nilai probabilitas kelongsoran (PK): 0%
- **Lereng keseluruhan (Overall Slope):**
  Sudut keseluruhan: 79°, tinggi total: 60 m, lebar tiap bench: 5 m, nilai SRF: 2,02, nilai faktor keamanan(FK): 1,469, dan nilai probabilitas kelongsoran: 0%



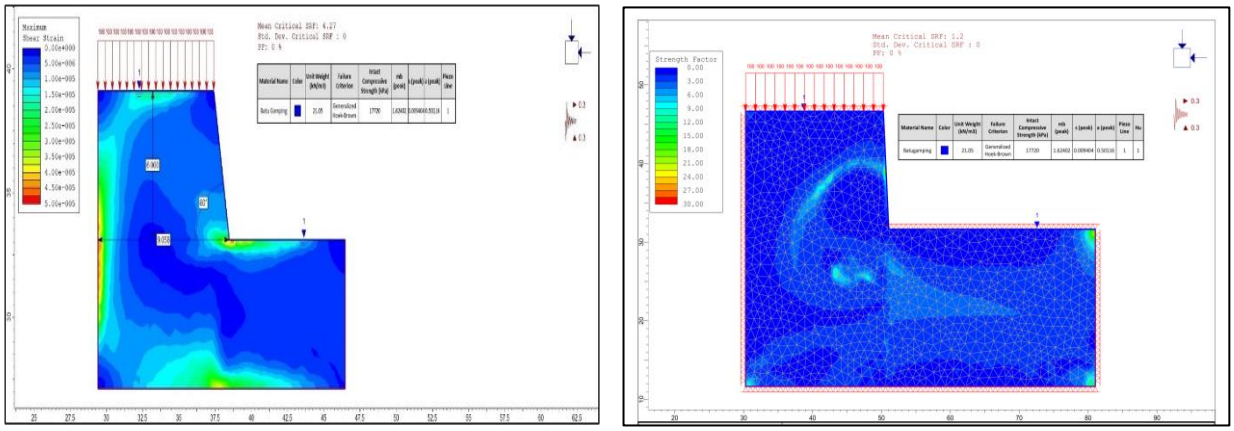
(a) (b)

Gambar 3. a) Lereng Tunggal jenuh, b) Lereng keseluruhan jenuh
Sumber : Peneliti, 2024

Perbandingan dengan Kondisi Awal

Dibandingkan dengan kondisi awal, optimalisasi ini menunjukkan peningkatan efisiensi dalam desain lereng. Dengan sudut yang lebih curam tetapi masih dalam batas aman, volume material yang harus dikeluarkan dapat dikurangi, sehingga meningkatkan produktivitas tambang tanpa mengurangi faktor keselamatan. Selain itu, analisis Point Estimate Method menunjukkan bahwa desain baru memiliki probabilitas kelongsoran yang sangat rendah, sehingga tetap aman untuk diterapkan dalam operasional tambang.

Berdasarkan analisis yang dilakukan, kondisi lereng eksisting memiliki nilai FK > 3, yang menunjukkan stabilitas tetapi kurang efisien. Optimalisasi geometri lereng menghasilkan rekomendasi yang lebih efisien dengan FK mendekati 1,2. Pada kondisi jenuh, lereng tunggal direkomendasikan dengan sudut 87°, tinggi 15 m, dan lebar 5 m. Lereng keseluruhan direkomendasikan dengan sudut keseluruhan 79°, tinggi total 60 m, dan lebar bench 5 m. Nilai FK dan PK hasil simulasi menunjukkan bahwa desain lereng yang dioptimalkan lebih efisien dan tetap aman.



(a) **(b)**

Gambar 4. a) Lereng kondisi awal, b) Lereng rekomendasi
Sumber : Peneliti, 2024

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

Klasifikasi Massa Batuan

Berdasarkan analisis yang dilakukan, massa batuan pada lokasi penelitian dikategorikan menggunakan metode Rock Mass Rating (RMR). Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa batuan di area tambang batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk memiliki nilai bobot yaitu 77, sehingga tergolong dalam kategori baik dengan tingkat kekuatan yang memadai untuk mendukung kestabilan lereng tambang.

Karakteristik Propertis Material

Karakteristik propertis pada desain lereng tambang hasil pendistribusian statistik material penyusun lereng hanya batugamping dengan nilai bobot isi asli 21,05 Kn/m^3, bobot isi kering 20,92 Kn/m^3, bobot isi jenuh 22,29 Kn/m^3, nilai *Intact Rock Strength* sebesar 17,72 Mpa dan menggunakan jenis distribusi statistik gamma.

Analisis Kondisi Lereng Aktual (Eksisting)

Kondisi lereng eksisting pada lokasi penelitian dikategorikan aman dengan nilai SRF sebesar 5.97, standar deviasi SRF sebesar 0,1485, nilai FK sebesar 4.70, dan PK sebesar 0% pada kondisi kering. Sementara pada lereng kondisi jenuh nilai SRF sebesar 4.27, standar deviasi SRF sebesar 0, nilai FK sebesar 3,68 dan PK sebesar 0%.

Rekomendasi Geometri Lereng

Optimalisasi geometri lereng pada tambang batugamping PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk menghasilkan desain yang lebih efisien dengan nilai SRF atau FK mendekati 1,2 dan PK 0%. Metode FEM dengan pendekatan SRM terbukti efektif dalam memberikan hasil yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan.
Rekomendasi lereng tunggal (*single slope)* dalam kondisi jenuh akan tetap aman sampai kemiringan 87°, tinggi 15 m dengan nilai SRF sebesar 1.2, standar deviasi SRF sebesar 0, nilai FK 1.411 dan PK 0%. Sementara rekomendasi lereng *overall slope* yaitu tinggi keseluruhan 60 m, kemiringan jenjang 87° dan kemiringan keseluruhan sebesar 79° pada kondisi jenuh dengan nilai SRF sebesar 2.02, standar deviasi SRF *sebesar* 0, nilai FK 1.469 dan PK 0%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, khususnya kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan berharga selama proses penelitian dan penyusunan jurnal ini.

Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa serta pihak laboratorium yang telah membantu dalam pengambilan dan pengujian sampel batuan, serta analisis data yang diperlukan. Tak lupa, keluarga dan teman-teman yang selalu memberikan dukungan moral dan motivasi selama penelitian ini berlangsung. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu geoteknik dan pertambangan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Harry, R. Sinaga, S. Bahagiarti, and J. Setiawan, "Geologi & Analisis Kestabilan Lereng Pada Tambang Batugamping, Desa Tegaldowo, Kecamatan Gunem, Kabupaten Rembang, Jawa Tengah," *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea* , vol. 9, no. 1, pp. 100–109, 2022.
[2] M. R. , Amin, Y. D. G. , Cahyono, and F. A. R. , Putri, "Analisis Kestabilan Lereng pada Tambang Batu Andesit CV. Empat Lima Desa Morang Kecamatan Kare Kabupaten Madiun Provinsi Jawa Timur," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV) Surabaya*, pp. 1–9, 2024.
[3] S. K. & B. D. Donal R. Ninggolan, "Analisis Pengaruh Persistensi Bidang Diskontinu Terhadap Kestabilan Lereng Batuan Terkekarkan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Ilmiah PPSDM Geominerba*, vol. 5, pp. 1–82, Jun. 2020.
[4] A. Maulana, Y. Dwi Galih Cahyono, A. dan Shintya Sari, and R. Hardini Kusuma Putri, "Analisis Kestabilan Lereng Pada Tambang Tanah Liat Mliwang Timur PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan X* , 2022.
[5] P. J. Pells, Z. T. Bieniawski, S. R. Hencher, and S. E. Pells, "Classification Of RMR, Rock quality designation (RQD): Time to rest in peace," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 54, no. 6, pp. 825–834, 2017, doi: 10.1139/cgj-2016-0012.
[6] M. A. Azizi, I. Marwanza, S. A. Amala, and N. A. Hartanti, "Three dimensional slope stability analysis of open pit limestone mine in Rembang District, Central Java," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 212, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/212/1/012035.
[7] B. E. Prasetyo and I. Yatjong, "Analisis Stabilitas Lereng Ruas Jalan Kolaka-Kolaka Timur Menggunakan Metode Limit Ekuilibrium dan Metode Elemen Hingga," *DINTEK Jurnal Teknik*, vol. 14, no. 2, pp. 18–25, 2021, [Online]. Available: www.jurnal.ummu.ac.id/dintek
[8] N. Hasanah, R. N. Hakim, E. Santoso, and S. Melati, "Alternatif Penentuan Uniaxial Compressive Strength Batulempung Dari Point Load Strength Index," *Jurnal GEOSAPTA*, vol. 5, no. 2, pp. 127–132, 2019.
[9] S. O. Rusni, R. I. Sophian, and Z. Zakaria, "Probabilitas Longsor Pada Lereng Tambang Batubara Terbuka Sisi Sidewall Selatan Pit X, Kalimantan Selatan," *Padjadjaran Geoscience Journal*, vol. 3, pp. 389–396, 2019.
[10] C. Afriade Siregar, F. Ali Syakir Ashidik, and H. Garnida, "Perbandingan Stabilitas Lereng Antara Metode Keseimbangan Batas (LEM) Dan Metode Elemen Hingga (FEM) Studi Kasus: Kereta Api Cepat Indonesia Cina (KCIC) Walini, Kabupaten Bandung Barat," *Seminar Nasional Ketekniksipilan, Infrastruktur dan Industri Jasa Konstruksi (KIIJK)*, vol. 1, no. 1, 2021.
[11] D. Maulana, dan Winarti, and S. Pambudi, "Seminar Nasional ke-9: Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi Sekolah Tinggi Teknologi Nasional (STTNAS) Yogyakarta | 587," *Teknik Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Nasional*, vol. 2, p. 3, 2017.
[12] Ruslan Loilatu and Iswandaru, "Analisis Kestabilan Lereng Andesit Menggunakan Metode FEM pada PT. X," *Jurnal Riset Teknik Pertambangan*, pp. 15–23, Jul. 2022, doi: 10.29313/jrtp.v2i1.782.
[13] F. H. P. Santosa and Y. D. G. Cahyono, "Analisa Kestabilan Lereng Berdasarkan Probabilitas Kelongsoran Pada Tambang Pirofilit Di PT Gunung Bale, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur," *PROSIDING, Seminar Teknologi Kebumian dan Kelautan (SEMITAN II)*, vol. 2, no. 1, pp. 423–435, 2020.
[14] E. Rosenblueth, "Mathematics Point estimates for probability moments," *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, vol. 72, no. 10, pp. 3812–3814, 1975, [Online]. Available: https://www.pnas.org
[15] A. M. Risky and D. Raimon Kopa, "Analisis Kestabilan Lereng Pada Rencana Lereng Akhir Penambangan Dengan Tinggi 55 m PT. Atika Tunggal Mandiri, Kecamatan Pangkalan Koto Baru,Sumatera Barat," *Jurnal Bina Tambang*, vol. 6, no. 4, pp. 135–142, 2016.
[16] A. Firdausyanto, Y. Dwi Galih Cahyono, T. Pertambangan, and Teknologi Adhi Tama Surabaya, "Analisis Pengaruh Faktor Kerusakan Akibat Peledakan Terhadap Kestabilan Lereng Pada Pt. Semen Indonesia (Persero) Tbk, Desa Sumberarum, Kec. Kerek, Kab. Tuban, Jawa Timur," *Prosiding, Seminar Teknologi Kebumian dan Kelautan (SEMITAN II)*, vol. 2, no. 1, 2020.