



## PENGARUH NILAI TOLERANSI TERHADAP STABILITAS LERENG MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA 3D

### THE EFFECT OF TOLERANCE VALUE ON SLOPE STABILITY USING THE 3D FINITE ELEMENT METHOD

M. A. Azizi<sup>1</sup>, I. Marwanza<sup>2</sup>, Y. Maulana<sup>3</sup>, W. Dahani<sup>4</sup>, M. Puspita<sup>5</sup>

<sup>1-4</sup>Program Studi Teknik Pertambangan, FTKE, Universitas Trisakti

<sup>5</sup>Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

<sup>1-4</sup>Jl Kyai Tapa No 1, Grogol, Jakarta Barat, telp. 021-5663232 ext.8513

<sup>5</sup>Jl. Palembang-Prabumulih KM. 32 Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan

e-mail: \*[masagus.azizi@trisakti.ac.id](mailto:masagus.azizi@trisakti.ac.id), [irfanm@trisakti.ac.id](mailto:irfanm@trisakti.ac.id), [yuga.maulan@trisakti.ac.id](mailto:yuga.maulan@trisakti.ac.id),  
[wiwikd@trisakti.ac.id](mailto:wiwikd@trisakti.ac.id), [megapuspita@ft.unsri.ac.id](mailto:megapuspita@ft.unsri.ac.id)

#### ABSTRAK

Penggunaan analisis stabilitas lereng menggunakan metode elemen hingga 3 dimensi pada tambang terbuka dalam satu dekade ini telah berkembang dengan pesat. Namun kendala yang dihadapi dalam menerapkan metode tersebut yaitu memerlukan waktu yang lama sehingga tidak mendukung para praktisi geoteknik. Penelitian ini bertujuan menentukan nilai toleransi optimal yang digunakan dalam menentukan nilai perpindahan total dan *strength reduction factor* (SRF). Metode yang digunakan adalah metode elemen hingga 3 dimensi dengan tipe mesh 4 noda seragam. Hasil penelitian menunjukkan semakin kecil nilai toleransi, maka semakin kecil nilai perpindahan total hingga mendekati nilai toleransi  $1 \times 10^{-5}$ . Perpindahan total cenderung stabil pada nilai 4.71 meter yang memberikan nilai SRF 1.2.

**Kata kunci:** tambang terbuka, stabilitas lereng, MEH 3D, nilai toleransi

#### ABSTRACT

Over the past ten years, there has been a rapid advancement in the use of slope stability analysis in open pit mines utilizing the 3-dimensional finite element approach. However, the difficulties in putting this method into practice take a lot of time, so it is not helpful for geotechnical practitioners. The goal of this study is to identify the ideal tolerance value to be used in calculating the total displacement and strength reduction factor (SRF). The technique employed has a mesh type of four uniform locations and is a 3-dimensional finite element method. The findings indicated that the total displacement value decreased as the tolerance value increased. The overall displacement tends to remain constant at a value of 4.71 meters, which yields an SRF value of 1.2, up until it approaches the tolerance value of  $1 \times 10^{-5}$ .

**Keywords :** open pit mine, slope stability, 3D FEM, tolerance value

#### PENDAHULUAN

Metode elemen hingga (MEH) merupakan salah satu metode analisis stabilitas lereng yang paling dikenal di kalangan praktisi geoteknik pada industri pertambangan yang dapat dilakukan secara 2 dimensi maupun 3 dimensi [1]. Metode ini membagi lereng menjadi fragmen-fragmen kecil yang disebut elemen. Adapun parameter yang ditentukan metode ini berupa nilai

perpindahan total dan faktor reduksi kekuatan atau lebih dikenal *strength reduction factor* (SRF) [2]. Parameter kekuatan geser material (kohesi dan sudut gesekan dalam) secara bertahap dikurangi dengan spesifikasi tertentu sampai material berada di ambang kegagalan. Dalam metode ini, keruntuhan terjadi ketika analisis tidak menemukan solusi untuk memenuhi kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan kondisi kesetimbangan global. Saat kekuatan material berkurang, gerakan di

dalam lereng terjadi sebagai respons terhadap pengurangan kekuatan geser [3]. Gerakan ini kemudian diproyeksikan oleh gerakan noda di setiap elemen yang dihasilkan, juga dikenal sebagai perpindahan nodal.

MEH 3D memberikan informasi mengenai perpindahan total, SRF dan lokasi kritis pada lereng tambang. Faktor-faktor yang mempengaruhi akurasi dan waktu komputasi dalam MEH 3D adalah tipe mesh, jumlah noda, jumlah iterasi maksimum, dan nilai toleransi. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, penggunaan ukuran elemen yang lebih besar akan menghasilkan nilai SRF yang kurang akurat, namun waktu komputasi yang dibutuhkan lebih sedikit dibandingkan elemen mesh tipe yang lebih kecil [4,5,6,7]. Semakin kecil jumlah iterasi maksimum, semakin kecil nilai SRF. Faktor-faktor ini perlu dipertimbangkan secara konservatif dalam penggunaan MEH untuk menghasilkan hasil yang optimal. Nilai toleransi disebut sebagai kemampuan material untuk mentolerir ketidakseimbangan energi yang dapat menyebabkan perpindahan (regangan) sebelum material runtuh. Penelitian ini dimaksudkan untuk lebih memahami dan mengetahui pengaruh parameter pemfaktoran pada MEH 3D yaitu nilai toleransi.

## METODE PENELITIAN

Dalam masalah keteknikan, terdapat nilai-nilai yang tidak diketahui yang jika ditemukan, karakteristik seluruh struktur dapat ditentukan [1]. Analisis Elemen Hingga adalah metode pemecahan masalah numerik. Pada prinsipnya, metode ini membagi lereng menjadi fragmen-fragmen kecil yang disebut elemen [8]. Elemen-elemen ini memberikan rangkaian solusi untuk memperkirakan nilai yang tidak diketahui. Elemen-elemen ini terdiri atas noda. Dalam penerapannya pada analisis kestabilan lereng, Teknik Shear Strength Reduction (SSR) diterapkan pada setiap elemen. Deformasi yang disebabkan oleh reduksi kekuatan diproyeksikan oleh noda yang terpasang pada setiap elemen, untuk menghasilkan perpindahan berupa perpindahan noda [9].

Dalam Metode Elemen Hingga, teknik SSR digunakan sebagai alat untuk menentukan nilai SRF dan perpindahan total. Kekuatan geser adalah parameter yang menentukan kekuatan suatu material. Dalam metode SSR parameter kekuatan geser material (kohesi dan sudut geser dalam) secara bertahap dikurangi dengan faktor pereduksi yang disebut faktor reduksi kekuatan [9]. Proses ini diulangi sampai kekuatan material berada pada kondisi kritis atau tepat di luar kegagalan. SRF pada titik ini disebut SRF kritis. Menurut Matsui dan San, teknik SSR secara matematis dapat didefinisikan sebagai berikut

$$c_R = \frac{c}{SRF}, \tan^{-1} \phi_r = \frac{\tan \phi}{SRF} \quad (1)$$

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb adalah seperangkat persamaan linier, dalam dimensi tegangan utama (Labuz dan Zang, 2012) untuk menentukan kondisi keruntuhan suatu material berdasarkan kekuatan gesernya [3]. Menurut Mohr dan Coulomb, kekuatan material paling baik ditentukan oleh parameter kekuatan gesernya (Cohesion and Internal Friction Angle). Dalam kriteria ini, keruntuhan terjadi ketika lingkaran Mohr yang dibentuk oleh tegangan utama minimum dan maksimum melebihi selubung keruntuhan. Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb secara matematis diwakili oleh :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2)$$

Proses simulasi MEH 3D menggunakan perangkat lunak RS3 lisensi dari rocscience Inc. Parameter input yang digunakan terdiri dari bobot isi, kohesi, sudut gesek dalam, Modulus Young (E) dan Rasio Poisson ( $\nu$ ). Langkah selanjutnya adalah membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Proses ini disebut *meshing*. Jenis jaring bergradasi dan seragam adalah dua jenis jaring yang tersedia di perangkat lunak RS3. Setelah proses *meshing* selesai, suatu bentuk gaya penahan diterapkan pada tepi model, sehingga perpindahan akan terjadi di dalam area pit. Proses ini dilakukan dengan menerapkan pekekangan pada model.

Sebelum komputasi, penyesuaian perlu dilakukan pada seperangkat kriteria, yang mengatur waktu penghentian iterasi SSR. Kumpulan kriteria ini dikenal dengan kriteria konvergensi, yang terdiri dari jumlah maksimum iterasi dan nilai toleransi. Jumlah maksimum iterasi dalam penelitian ini ditetapkan pada angka default 500. Di sisi lain, angka toleransi yang digunakan dalam percobaan ini adalah  $1, 1 \times 10^{-1}, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-5},$  dan  $1 \times 10^{-6}$ . Setiap analisis yang dilakukan dengan nilai toleransi yang berbeda akan menghasilkan nilai SRF dan perpindahan total yang berbeda pula. Hasil yang diperoleh kemudian diamati untuk mengetahui pengaruh variasi nilai toleransi terhadap SRF dan perpindahan total. Hasil ini didefinisikan dalam bentuk grafik XY berdasarkan hasil simulasi. Nilai toleransi optimal ditentukan berdasarkan nilai perpindahan total yang menghasilkan stabil. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya. Model 3D yang dianalisis dalam penelitian ini adalah model 3D pit yang sama dari penelitian Kemal et al (2019). Oleh karena itu, input parameter sifat fisik dan mekanik material juga sama dengan penelitian sebelumnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian berupa nilai toleransi optimum yang digunakan untuk menentukan nilai SRF dan perpindahan total (Tabel 1).

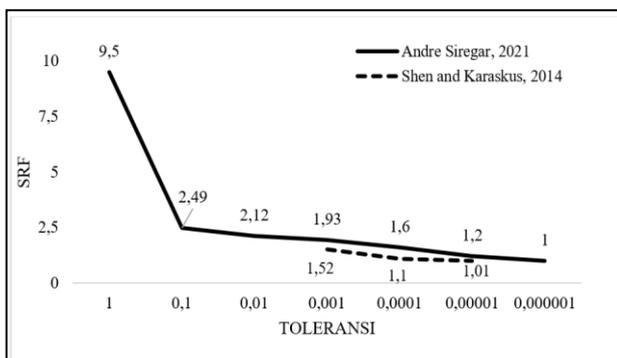
Nilai toleransi menentukan akhir analisis atau konvergensi. Nilai toleransi mengatur ukuran langkah (perbedaan SRF antara dua iterasi) dalam metode SSR.

Iterasi akan berhenti ketika ukuran langkah kurang dari nilai toleransi. Oleh karena itu, nilai toleransi berperan penting dalam Metode Elemen Hingga SSR.

**Tabel 1.** Hasil Perhitungan MEH 3D

Tipe Mesh	Nilai Toleransi	SRF	Perpindahan Total (meter)
4 noda seragam	1	9.60	588,362
	$1 \times 10^{-1}$	2.49	151,234
	$1 \times 10^{-2}$	2.12	55,4421
	$1 \times 10^{-3}$	1.93	35,4112
	$1 \times 10^{-4}$	1.60	7,66136
	$1 \times 10^{-5}$	1.20	4,71012
	$1 \times 10^{-6}$	1.00	4,71011

Gambar 1 menunjukkan grafik hubungan nilai toleransi terhadap SRF. Semakin kecil nilai toleransi, maka semakin kecil nilai SRF. Kecenderungan SRF yang sama juga ditunjukkan dalam penelitian oleh Shen & Karaskus (2014) [2]. Hal ini disebabkan karena toleransi merupakan batas minimal ukuran langkah yang diperbolehkan dalam metode SSR. Pada iterasi dengan nilai toleransi yang lebih rendah, konvergensi dapat dicapai tanpa peningkatan SRF yang signifikan. Oleh karena itu, SRF yang berada di luar non-konvergensi (kegagalan) cenderung memiliki nilai yang lebih kecil. Di sisi lain, analisis dengan nilai toleransi yang lebih tinggi, reduksi kekuatan membutuhkan faktor reduksi yang jauh lebih besar untuk mencapai nilai toleransi, yang dicapai dengan nilai SRF yang lebih tinggi.



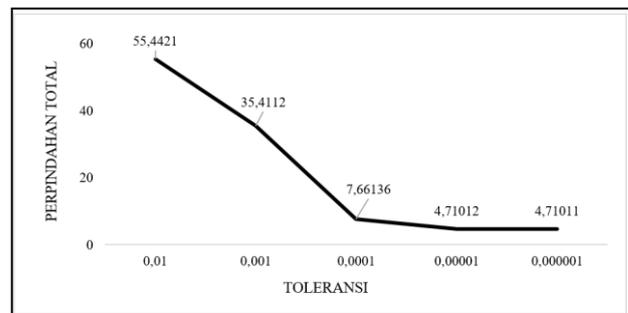
**Gambar 1.** Hubungan Toleransi dan SRF

Hasil yang dihitung dengan MEH 3D memberikan serangkaian informasi mengenai kondisi lubang atau kemiringan pada saat kritis. Salah satu informasinya adalah *Total Displacement*. Pada penelitian ini, perpindahan yang terekam adalah perpindahan yang terjadi pada saat lereng berada dalam kondisi kritis. Perpindahan dari hasil perhitungan MEH adalah perpindahan yang terjadi sebelum perpindahan. Dalam Metode Elemen Hingga SSR, perpindahan adalah respons material terhadap pengurangan kekuatan [10].

Pengurangan kekuatan menyebabkan penurunan kekuatan material dalam hal kohesi dan sudut gesekan internal. Pada titik kritis, kekuatan material mencapai batas jumlah gaya dari material yang dibebani sendiri yang dapat ditahannya.

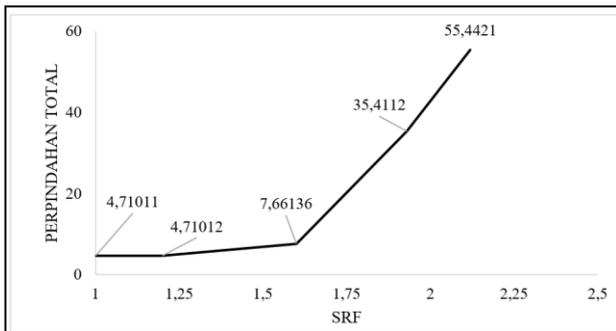
Gambar 2 menyajikan hubungan antara toleransi perpindahan terhadap perpindahan total. Semakin kecil nilai toleransi, maka semakin kecil nilai perpindahan total. Hingga mendekati nilai toleransi  $1 \times 10^{-5}$ , maka perpindahan total cenderung stabil pada nilai 4.71 meter yang memberikan nilai SRF 1.2 menunjukkan kecenderungan peningkatan Total Displacement dengan peningkatan nilai toleransi.

Penjelasan dari kondisi ini adalah pada nilai toleransi yang lebih tinggi berarti material memiliki kemampuan menahan gaya yang lebih besar yang disebabkan oleh pengurangan kekuatan. Oleh karena itu perpindahan sebelum keruntuhan yang dihasilkan oleh nilai toleransi yang lebih tinggi adalah lebih besar karena membutuhkan jumlah deformasi yang besar untuk membawa lereng ke titik kritisnya.



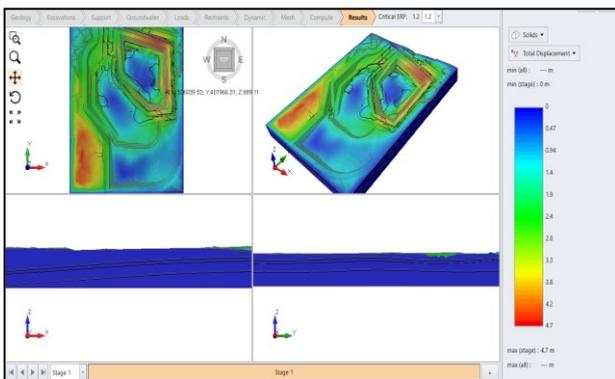
**Gambar 2.** Hubungan antara Toleransi dan Perpindahan total

Faktor Reduksi Kekuatan (SRF) adalah faktor reduksi yang menunjukkan keadaan reduksi yang diterapkan pada parameter kekuatan geser material, kohesi, dan sudut geser internal. Dari hasil komputasi yang terekam, terlihat bahwa *total displacement* semakin tinggi seiring dengan peningkatan SRF. Ini menunjukkan hubungan yang agak menyebar antara kedua parameter. Dalam metode Pengurangan Kekuatan Geser, SRF Kritis mewakili nilai FoS yang sebenarnya. Dari konsep stabilitas lereng diketahui bahwa semakin tinggi nilai Fos maka semakin stabil lereng tersebut. Namun dari grafik *displacement* dan SRF terlihat bahwa semakin besar SRF maka semakin besar *displacement* yang dihasilkan. Hal ini dapat dibenarkan oleh penelitian [9] yang menyatakan bahwa perpindahan yang dicatat dalam SSR Finite Element adalah perpindahan yang terjadi sebelum perpindahan. Oleh karena itu, nilai SRF yang lebih tinggi berarti dibutuhkan perpindahan yang besar sebelum terjadi keruntuhan.



**Gambar 3.** Hubungan antara SRF dan Perpindahan total

Dari gambar 3 terlihat bahwa perpindahan total cenderung menurun seiring dengan penurunan SRF. Perpindahan total menurun dari 588.36 meter dengan nilai SRF 9.5 dengan toleransi 1 hingga 7,66 meter dengan 1.6 SRF dan nilai toleransi  $1 \times 10^{-4}$ . Nilai perpindahan stabil sebesar 4,71 meter dan turun menjadi 4,71 meter pada nilai toleransi  $1 \times 10^{-6}$ . Hal ini menunjukkan bahwa  $1 \times 10^{-5}$  merupakan nilai toleransi optimum karena perpindahan cenderung stabil pada nilai ini, dengan SRF sebesar 1.2 karena pengurangan lebih lanjut tidak memberikan perubahan signifikan pada nilai *Total Displacement*. Gambar 4 merupakan sampel model simulasi yang menunjukkan lokasi kritis lereng yang ditandai pada area yang paling merah.



**Gambar 4.** Sampel Model komputasi MEH 3D

## KESIMPULAN

Nilai SRF meningkat dengan meningkatnya nilai toleransi karena lereng akan mencapai kondisi kritis dengan nilai SRF yang rendah. Semakin rendah toleransi, semakin rendah nilai SRF yang dibutuhkan untuk mencapai konvergensi. Nilai SRF yang lebih tinggi menghasilkan perpindahan yang lebih tinggi karena kekuatan geser material berkurang dan tidak mampu menahan gaya berat sendiri. Toleransi optimum berada pada  $1 \times 10^{-5}$  yakni pada nilai SRF 1.2 karena perpindahan total cenderung stabil pada perpindahan

total 4.71 meter. Hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan acuan dalam melakukan analisis kestabilan lereng 3 dimensi menggunakan metode elemen hingga 3 dimensi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih atas dukungan penuh dari PT X dalam mendukung pengambilan data penelitian sehingga tulisan ini dapat diterbitkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bhavikatti, S. S., (2005). *Finite Elemen Analysis*, New Age International Limited. Sri Dharmasthal Manjunatheswara College Of Engineering And Technology, New Delhi, 1-6.
- [2] Karaskus, S., and Karaskus, M. (2014). *Three-Dimensional Numerical Analysis For Rock Slope Stability Using Shear Strength Reduction Method*, N Research Press.
- [3] Labuz, J. F., and Zang, A. (2012). *Mohr – Coulomb Failure Criterion*. ISRM Suggested Method, Springer-Verlag.
- [4] Azizi, M. A., dkk. (2020). *Application Of Cuckoo Search Method In 3D Slope Stability Analysis For Limestone Quarry Mine*, Indonesian Mining Journal. 23 (2) : 57-65.
- [5] Azizi, M. A., dkk (2018). *Three dimensional Slope Stability Analysis of Open Pit Limestone Mine in Rembang District, Central Java*, IOP Conference Earth and Environment Science.
- [6] Azizi, M. A., dkk (2019). *Prediction Of Material Volume Of Slope Failure In Nickel Surface Mine Using Limit Equilibrium Method 3D*, Indonesian Mining Professionals Journal.
- [7] Azizi, M. A., dkk. (2021). *Three Dimensional Slope Stability Analysis of Open Pit Mine, in Slope Engineering Book*, IntechOpen Publishing.
- [8] Griffiths, D.V, and Marquez, R,M. (2007). *Three-Dimensional Slope Stability Analysis by Elasto-Plastic Finite Element*, Colorado School Of Mine.
- [9] Azizi, M. A., dkk. (2019). *Risk analysis of limestone open pit mine slope stability in Rembang district, Indonesia*, *Proceedings in Earth and geosciences*. Rock Mechanics For Natural Resources and Infrastructure Development (Full Paper), CRC Press. Volume 6.
- [10] Ghifari, M. K., Azizi, M. A., Marwanza, I. and Anugrahadi, A. (2019). *Pengaruh Jumlah Komposit Batuan Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara Multi Lapisan Menggunakan Metode Elemen Hingga 3 Dimensi*, TPT XVII Perhapi, 515 – 523.