



Penentuan Konstanta Massa Batuan Utuh (m_i) Andesit pada Pertambangan Rakyat Bawah Tanah Emas Plampang II, Kulon Progo, Yogyakarta

Diana Azizah Suryani¹, Singgih Saptono¹, Barlian Dwinagara¹, Bagus Wiyono¹, Peter Eka Rosadi¹, Indun Titisariwati¹

¹UPN "Veteran" Yogyakarta Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN "Veteran" Yogyakarta, Jl. Padjajaran Jl. Ring Road Utara No. 104, Ngropoh, Condongcatur, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283
¹²Indonesia

Email: dnzzahsryn@gmail.com

Abstrak

Penambangan bawah tanah memiliki tantangan utama dalam menjaga kestabilan lubang bukaan, yang sangat dipengaruhi oleh kekuatan massa batuan. Di daerah penambangan emas rakyat Plampang II, batuan andesit sebagai batuan induk memerlukan penentuan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) sebagai parameter dalam *generalized Hoek-Brown failure criterion* untuk memperkirakan kekuatan batuan di bawah kondisi tegangan tiga arah. Penelitian ini menggunakan uji triaksial terhadap lima belas conto batuan andesit dengan variasi tegangan utama minimum (σ_3). Data diolah menggunakan pendekatan statistik dan numerik untuk menentukan nilai m_i , lalu dianalisis kesesuaiannya dengan referensi dari Hoek (2006). Nilai m_i yang diperoleh, yakni 29,46 (statistik) dan 27,14 (numerik), berada dalam rentang literatur (25 ± 5) menurut Hoek (2006). Nilai m_i hasil penelitian digunakan dalam simulasi kestabilan lubang bukaan dan *vertical shaft* menggunakan perangkat lunak elemen hingga. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lubang bukaan dan *vertical shaft* menunjukkan kondisi tidak stabil. Nilai *Strength Factor* (SF) pada keduanya kurang dari 1,00, menandakan kondisi batuan sudah berada di fase plastis. Oleh karena itu, diperlukan penyangga tambahan untuk meningkatkan kestabilan dan keamanan tambang bawah tanah.

Kata kunci: andesit; nilai m_i ; *generalized Hoek-Brown failure criterion*

Abstract

Underground mining faces major challenges in maintaining the stability of excavations, which is highly influenced by the strength of the rock mass. In the artisanal gold mining area of Plampang II, andesite rock as the host rock requires the determination of the intact rock mass constant (m_i) as a key parameter in the generalized Hoek-Brown failure criterion to estimate rock strength under triaxial stress conditions. This study employed triaxial testing on fifteen andesite rock samples with varying minimum principal stress (σ_3). The data were processed using statistical and numerical approaches to determine the m_i value, which was then evaluated against the reference from Hoek (2006). The obtained m_i values 29.46 (statistical) and 27.14 (numerical) fall within the literature range of 25 ± 5 as proposed by Hoek (2006). These values were then used in stability simulations of underground openings and a vertical shaft using finite element software. The simulation results indicate that both the excavation and vertical shaft are in an unstable condition. The Strength Factor (SF) for both was found to be less than 1.00, indicating that the rock mass has entered a plastic state. Therefore, additional support is required to improve the stability and safety of the underground mine.

Keywords: andesite; m_i value; *generalized Hoek-Brown failure criterion*

*Korespondensi : dnzzahsryn@gmail.com

Diajukan : 29 Juni 2025

Diterima : 18 September 2025

Diterbitkan : 15 Desember 2025

DOI: [10.14710/jgt.8.2.2025.93-104](https://doi.org/10.14710/jgt.8.2.2025.93-104)

PENDAHULUAN

Penambangan bawah tanah digunakan untuk mengambil biji emas yang berada di bawah permukaan, dengan tantangan utama menjaga kestabilan lubang bukaan. Di wilayah penambangan emas rakyat Plampang II, batuan induk berupa andesit sehingga diperlukan penentuan konstanta massa batuan utuh (m_i) sebagai parameter penting dalam Hoek-Brown failure criterion (1980), yang kemudian disempurnakan menjadi *generalized Hoek-Brown failure criterion* (Hoek, 1994; Hoek et al., 1995) untuk memperkirakan kekuatan batuan pada kondisi tegangan tiga arah.

Konstanta massa batuan utuh (m_i) merupakan parameter kunci dalam *generalized Hoek-Brown failure criterion* yang digunakan untuk memperkirakan kekuatan batuan berdasarkan tegangan utama maksimum (σ_1) dan minimum (σ_3). Kriteria non-linier ini banyak diterapkan dalam rekayasa geoteknik untuk memodelkan kondisi keruntuhan massa batuan.

Penelitian ini menggunakan uji triaksial pada lima belas conto batuan dengan variasi tegangan utama minimum (σ_3). Data hasil uji dianalisis menggunakan pendekatan statistik dan numerik untuk menentukan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i), lalu dianalisis kesesuaiannya dengan referensi dari Hoek (2006). Nilai tersebut juga digunakan untuk simulasi kestabilan lubang bukaan dan *vertical shaft* untuk mendukung evaluasi geoteknik di lokasi penelitian.

Penambangan bawah tanah menghadapi tantangan utama berupa kestabilan lubang bukaan, yang dipengaruhi oleh kondisi massa batuan. Salah satu parameter untuk mengetahui kekuatan massa batuan adalah nilai konstanta massa batuan utuh (m_i). Namun, nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) tidak dapat diukur secara langsung di lapangan. Hal ini menimbulkan kesulitan dalam melakukan analisis kestabilan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penentuan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) berdasarkan data uji laboratorium menggunakan pendekatan statistik dan numerik sesuai *generalized Hoek-Brown failure criterion* (Hoek et al., 1995). Penelitian ini dilakukan untuk menjawab permasalahan bagaimana cara menentukan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) dan mengetahui

kondisi kestabilan lubang bukaan pada lokasi penelitian.

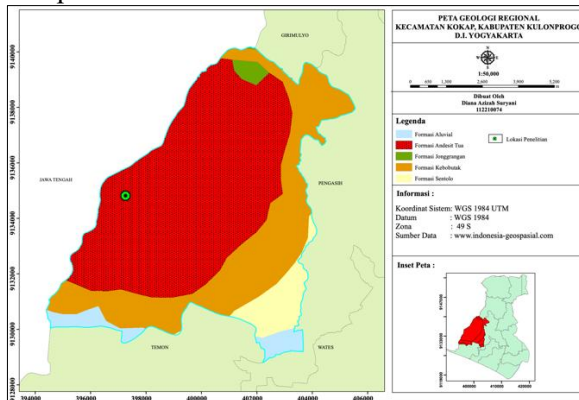
Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) melalui pengujian triaksial terhadap conto batuan andesit menggunakan *generalized Hoek-Brown failure criterion* (1995). Hasil dari pengujian triaksial tersebut nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) akan dianalisis kesesuaiannya dengan nilai referensi dari Hoek (2006). Nilai m_i yang sudah didapat digunakan untuk menganalisis stabilitas lubang bukaan bawah tanah bijih emas rakyat di Plampang II, Kulon Progo, Yogyakarta

GEOLOGI REGIONAL DAERAH PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Dusun Plampang II, Desa Kalirejo, Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Lokasi penelitian berada di koordinat UTM 397493.648 E dan 9134732.277 N atau secara geografis pada 7°49'36.61" LS dan 110°4'12.85" BT. Lokasi ini memiliki akses yang cukup baik, dengan jarak tempuh 55 km dari Yogyakarta.

Lokasi penelitian termasuk dalam Formasi Andesit tua/Kebobutak yang diendapkan secara tidak selaras di atas Formasi Nanggulan, dapat dilihat pada peta geologi regional Gambar 1. Formasi andesit tua tersusun atas breksi vulkanik dengan fragmen andesit, lapilli tuf, tuf, lapilli breksi, sisipan aliran lava andesit, aglomerat, serta batupasir vulkanik yang tersingkap di banyak Lokasi di daerah Kulonprogo. Pringgoprawiro dan Riyanto (1987) merevisi penamaan Formasi Andesit Tua menjadi dua Formasi yaitu Formasi Kaligesing dan Formasi Dukuh. Formasi Kaligesing dicirikan oleh breksi monomik, dengan fragmen andesit, sisipan batupasir dan lava andesit. Sedangkan Formasi Dukuh terdiri dari breksi polimik dengan fragmen andesit, batupasir, batugamping. Formasi ini mencerminkan aktivitas vulkanik masa lalu yang intens, serta menjadi indikasi penting dalam memahami evolusi geologi kawasan Kulonprogo. Kehadiran berbagai jenis litologi dalam formasi

ini juga menunjukkan proses pengendapan yang kompleks.



Gambar 1. Peta Geologi Regional Kapanewon Kokap

METODOLOGI

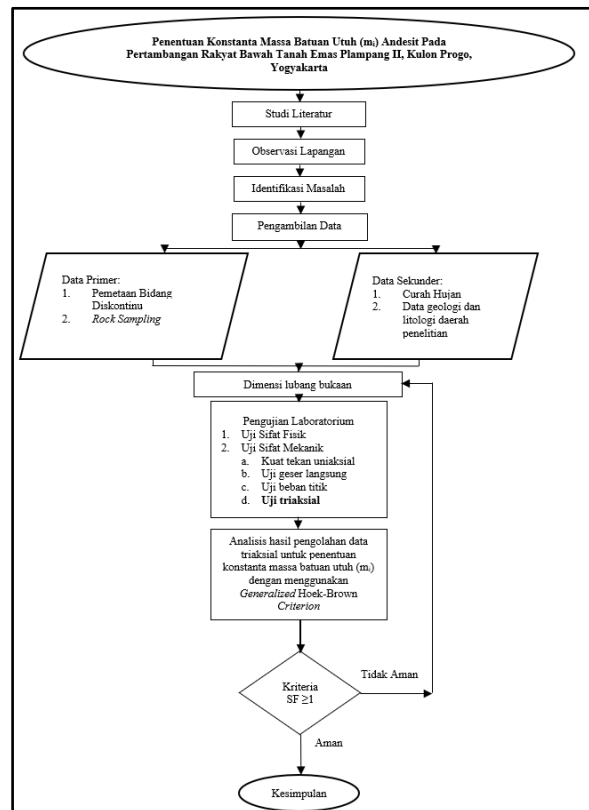
Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk mencari nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) pada *generalized* Hoek-Brown *failure criterion*, berdasarkan data hasil pengujian laboratorium. Data primer diperoleh melalui serangkaian pengujian mekanika batuan, seperti uji kuat tekan uniaksial (UCS), uji geser langsung (*direct shear*), uji beban titik (*point load*), dan uji triaksial. Selain itu, dilakukan juga pengujian sifat fisik. Pada lokasi penelitian juga dilakukan pengukuran bidang kekar. Data sekunder terdiri dari data curah hujan, peta geologi, peta topografi, dan peta kesampaian daerah.

Pengolahan data dilakukan dengan menghitung parameter mekanik seperti kuat tekan, modulus Young, poisson's rasio, sudut geser dalam dan kohesi. Perhitungan data dilakukan berdasarkan standar ISRM dan referensi teknis lainnya. Pengolahan dan analisis data dilakukan menggunakan analisis statistik pendekatan persamaan *generalized* Hoek-Brown *failure criterion* (1995).

Data diolah menggunakan metode numerik menggunakan pendekatan persamaan yang sama, yaitu *generalized* Hoek-Brown *failure criterion* (1995), dengan dikalibrasi menggunakan *modified cuckoo*. Berdasarkan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) yang didapat, dilakukan pemodelan stabilitas lubang bukaan dengan perangkat lunak geoteknik berbasis *Finite Element Method* (FEM). Analisis kesesuaian hasil nilai konstanta massa batuan utuh (m_i)

dengan nilai referensi dari Hoek (2006). Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur, observasi lapangan, dan identifikasi masalah untuk memperoleh dasar teori serta kondisi geologi lokasi penelitian. Pengumpulan data mencakup data primer (pengujian laboratorium, observasi lapangan, dan pengambilan sampel) serta data sekunder (literatur, peta geologi, dan laporan teknis). Data yang terkumpul dianalisis melalui pengolahan laboratorium, penerapan kriteria Hoek-Brown, analisis statistik, dan analisis numerik dengan algoritma modified cuckoo. Hasil analisis kemudian divalidasi dan digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) serta implikasinya terhadap kestabilan bukaan tambang bawah tanah.

Hoek-Brown Failure Criterion dan Penentuan Konstanta Massa Batuan Utuh (m_i)

Failure criterion pertama kali diperkenalkan oleh Hoek-Brown pada tahun 1980, dengan persamaan awalnya:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (1)$$

Tegangan σ_1 dan σ_3 masing masing mewakili tegangan utama maksimum dan minimum pada saat terjadinya keruntuhan. Nilai σ_{ci} adalah kuat tekan uniaksial dari batuan utuh, sedangkan m dan s merupakan konstanta material; $s = 1$ untuk batuan utuh. Persamaan tersebut kemudian dimodifikasi menjadi bentuk *generalized* Hoek-Brown *failure criterion* (1995) untuk merepresentasikan kondisi keruntuhan massa batuan

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(mb \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^q \quad (2)$$

Yang mana mb , s , dan a adalah konstanta material massa batuan:

$$mb = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (3)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (5)$$

Nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) batuan andesit menurut Hoek (2006) sebesar 25 ± 5 .

Data hasil uji triaksial dianalisis menggunakan pendekatan regresi non-linear berdasarkan *generalized* Hoek-Brown *failure criterion* (Hoek dkk., 1995). Ketika kriteria Hoek-Brown diperkenalkan, (Hoek, 1983) menyarankan bahwa hasil uji triaksial dianalisis menggunakan regresi linier dari bentuk berikut sebagai alternatif perhitungan nilai m_i

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2 \quad (6)$$

Hasil pengujian triaksial kemudian diproses dengan cara memplot data σ_3 sebagai sumbu X dan σ_1 sebagai sumbu Y dalam grafik regresi linier. Tujuan pemrosesan ini adalah untuk melakukan pendekatan terhadap model non-linear *generalized* Hoek-Brown *failure criterion*, yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan persamaan regresi linier:

$$y = ax + c \quad (7)$$

Dari bentuk persamaan (6) dan (7), hubungan antar variable dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$y = (\sigma_1 - \sigma_3)^2$$

$$a = m_i \sigma_{ci}$$

$$x = \sigma_3$$

$$c = \sigma_{ci}^2$$

Keterangan:

σ_1 = Tegangan aksial maksimum (MPa)

σ_3 = Tegangan pemampatan (MPa)

σ_{ci} = Kuat tekan uniaksial batuan utuh (MPa)

m_i = Konstanta massa batuan utuh

Dengan demikian, nilai konstanta m_i dapat dihitung melalui persamaan:

$$m_i = \frac{a}{\sigma_{ci}} \quad (8)$$

HASIL

Bidang Diskontinu

Parameter masukan untuk *Rock Mass Rating* (RMR) menurut Bienawski (1989) terdiri dari berbagai pengukuran yang dilakukan di lapangan, yang mencakup informasi tentang orientasi, jarak spasi, dan kondisi permukaan kekar. Selain itu, informasi mengenai kekasaran permukaan kekar, tingkat pelapukan, serta adanya air tanah juga diukur, karena faktor-faktor ini memengaruhi kekuatan dan kestabilan batuan. Pengukuran bidang diskontinu ini dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Kekar Area Country Rock dan Vein

Parameter	Country Rock	Vein
RQD	91%	77,30%
Spasi	0,21 m	0,15 m
Kondisi bidang kekar	Kemenerusan < 1m, lebar celah 1-5 mm, permukaan kasar, isian lunak <5 mm, dan sedikit lapuk	Kemenerusan < 1m, lebar celah 1-5 mm, permukaan kasar, isian keras <5 mm, dan tidak lapuk
Kondisi air tanah	<i>Completely dry</i>	<i>Completely dry</i>
Orientasi kekar	Arah jurus memotong sumbu terowongan, maju melawan kemiringan	Arah jurus memotong sumbu terowongan, maju searah kemiringan

Klasifikasi Massa Batuan

Berdasarkan pembobotan parameter RMR (Bieniawski, 1989), area vein dan country rock sama-sama memperoleh total rating 66 sehingga tergolong kelas II (good rock). Perhitungan GSI menggunakan chart Sonmez dan Ulusay (1999) menunjukkan nilai 43 untuk vein dan 36 untuk country rock, dengan kondisi struktur batuan berada pada kategori disintegrated serta kekar pada tingkat fair hingga good. Selain itu, nilai GSI juga diperoleh dari konversi RMR dengan mengurangkan 8 (Saptono, 2019), dan hasil

perbandingan antara GSI analitis dan hasil konversi ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai RMR, GSI Empiris, dan GSI Analitis

Jenis	RMR	GSI Empiris	GSI Analitis
<i>Vein</i>	66	58	43
<i>Country Rock</i>	66	58	36

Sifat Fisik Batuan (Berat Jenis, Densitas, Porositas, dan Kadar Air)

Setelah melakukan pengujian sifat fisik dan dilakukan pengolahan berdasarkan standar dari *International Society for Rock Mechanism* (ISRM). Data rata-rata dari hasil pengolahan dapat dilihat di Tabel 3. Total conto batuan yang digunakan dalam pengujian adalah 30 conto batu (15 *country rock* dan 15 *vein*).

Tabel 3. Hasil Pengolahan Data Uji Sifat Fisik Batuan

Parameter	Jenis	
	<i>Vein</i>	<i>Country Rock</i>
Kadar Air (%)	0,86	0,94
Derajat Kejenuhan (%)	32,25	41,10
Porositas (%)	7,23	5,65
<i>Void Ratio</i>	0,08	0,06
Massa Jenis Alami (kg/m ³)	3521,0	2545,51
Massa Jenis Kering (kg/m ³)	3498,1	2521,28
Massa Jenis Jenuh (kg/m ³)	3570,4	2577,80
<i>Specific Gravity</i>	3,52	2,55
<i>Unit Weight</i> (kN/m ³)	34,53	24,96

Kuat Tekan Uniaksial (UCS)

Setelah melakukan pengujian kuat tekan uniaksial dan dilakukan pengolahan data berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 2825:2008). Rata-rata dari hasil pengolahan dapat dilihat di Tabel 4. Total conto batuan yang digunakan dalam pengujian adalah 30 conto batu (15 *country rock* dan 15 *vein*).

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tekan Uniaksial

Parameter Kuat Tekan Uniaksial	Jenis	
	<i>Vein</i>	<i>Country Rock</i>
Kuat Tekan (MPa)	38,87	64,89
Regangan Aksial (%)	2,41	3,02
Regangan Lateral (%)	1,54	1,16
Regangan Volumetrik (%)	0,73	1,22
Modulus Young (MPa)		
Tangen	3443,90	5268,74
Secan	1313,43	1663,75

Rerata	3206,36	5399,03
Poisson's Ratio	0,12	0,15

Kuat Geser Langsung

Setelah melakukan pengujian kuat geser langsung dan dilakukan pengolahan data berdasarkan SNI 03-2824-2011. Rata-rata dari hasil pengolahan dapat dilihat di Tabel 5. Total conto batuan yang digunakan adalah 18 conto batu (9 *country rock* dan 9 *vein*).

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Geser Langsung

Parameter Kuat Geser Langsung	Jenis	
	<i>Vein</i>	<i>Country Rock</i>
Tegangan Normal (MPa)	13,33	14,87
Tegangan Geser (MPa)	18,00	24,94
Kohesi (MPa)	10,55	4,24
Sudut Geser Dalam (°)	27,12	54,47

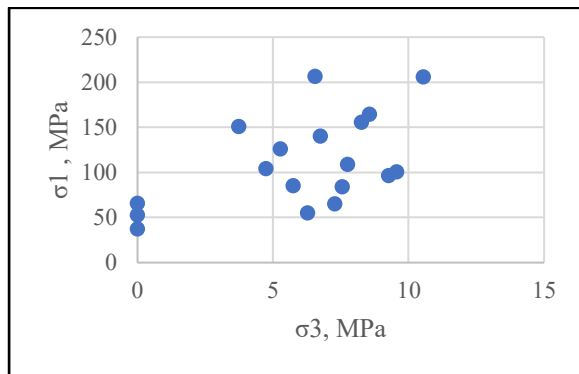
Uji Triaksial

Pada pengujian ini, dilakukan variasi tekanan pemampatan untuk uji triaksial. Uji triaksial dilakukan menggunakan 15 conto batuan dengan tegangan utama minimum (σ_3) yang berbeda-beda. Setelah dilakukan pengolahan data, didapatkan hasil uji triaksial sebagai berikut (Lihat Tabel 6.).

Tabel 6. Hasil Uji Triaksial

Sampel	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	ϵ_a (%)
A1	206,51	6,55	3,25
A2	83,92	7,55	1,85
A3	164,32	8,55	2,91
A4	100,67	9,55	2,87
A5	205,73	10,55	3,59
T3	150,98	3,74	2,72
T1	104,13	4,74	3,69
T2	84,95	5,74	2,56
T4	140,26	6,74	3,34
T5	108,83	7,74	3,02
B1	125,80	5,27	3,76
B2	55,14	6,27	2,49
B3	65,19	7,27	3,15
B4	155,53	8,27	4,59
B5	96,63	9,27	2,19

Terdapat dua tegangan yang berpengaruh pada uji triaksial, yaitu tegangan utama maksimum (σ_1) dan tegangan utama minimum (σ_3). Dari data tersebut dilakukan pengeplotan data pada grafik (Lihat Gambar 3.)



Gambar 3. Data Hasil Uji Triaksial

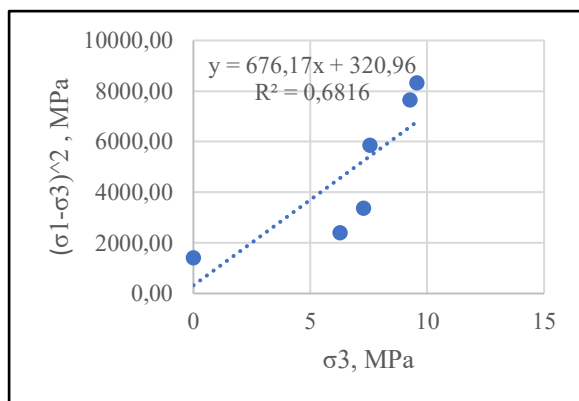
Penentuan Konstanta Massa Batuan

1. Metode Statistik

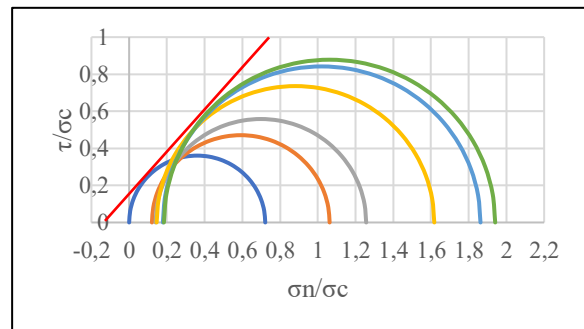
Setelah melakukan plot seluruh data σ_3 dan σ_1 pada grafik (Gambar 3.), pilih lima titik data yang berdekatan dan membentuk pola searah (Agar nilai koefisien determinasi (R^2) $> 0,5$ sesuai dengan Shen dan Karakus (2014)). Lakukan plot data σ_3 dan $(\sigma_1 - \sigma_3)^2$ pada grafik yang terpisah untuk mendapatkan persamaan regresi linier yang berbeda. Disajikan juga kurva Mohr-Coulomb untuk mendapatkan nilai kohesi, sudut geser dalam, dan kuat tarik. Pada Tabel 7., Gambar 4., dan 5 menunjukkan contoh set data untuk mencari nilai m_i

Tabel 7. Data Masukkan m_i Set 1

Conto	σ_1	σ_3	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2$
T0	37,43	0	1401,00
B2	55,14	6,27	2388,18
B3	65,19	7,27	3355,16
A2	83,91	7,55	5831,63
B5	96,63	9,27	7632,10
A4	100,67	9,55	8302,92



Gambar 4. Hubungan Antara σ_3 dan $(\sigma_1 - \sigma_3)^2$ untuk Penentuan m_i – Set 1



Gambar 5. Kurva Mohr-Coulomb - Set 5 (Metode Statistik)

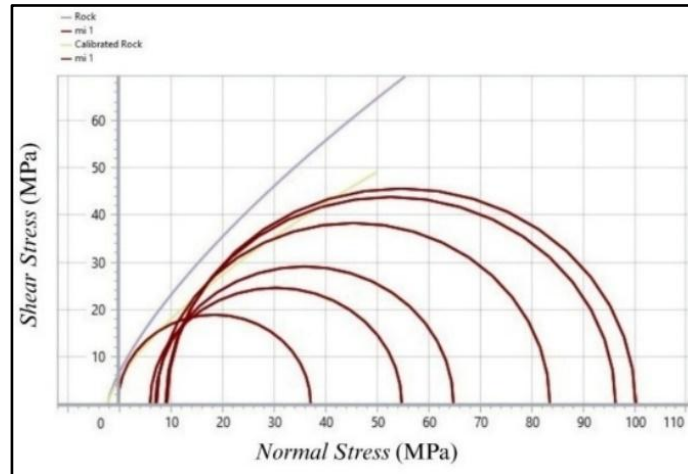
Dari grafik hubungan antara σ_3 dan $(\sigma_1 - \sigma_3)^2$ terlihat bahwa terdapat persamaan regresi linier (7) yang dapat dikonversi menjadi ke persamaan (6). Dari persamaan (7) dapat digunakan untuk mendapatkan nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) dan nilai kuat tekan batuan utuh (σ_{ci}) berdasarkan metode statistik pendekatan *generalized Hoek-Brown failure criterion*. Berdasarkan kurva Mohr-Coulomb dapat diketahui nilai kohesi, sudut geser dalam, dan tegangan tarik. Berikut merupakan hasil dari pengolahan tersebut (Lihat Tabel 8.)

Tabel 8. Hasil Pengolahan Metode Statistik

	m_i Set 1	m_i Set 2	m_i Set 3
Hoek-Brown			
m_i	37,59	22,86	27,80
σ_{ci} (MPa)	17,97	58,88	93,33
R^2	0,68	0,5051	0,58
Mohr-Coulomb			
c (MPa)	7,78	7,26	9,34
ϕ (°)	44,14	29,74	6,63
σ_t (MPa)	-6,74	-4,15	-3,63

2. Metode Numerik

Setelah diperoleh nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) menggunakan metode statistik, perhitungan dilanjutkan menggunakan metode numerik dengan data masukkan yang sama dengan metode statistik. Pengolahan data secara numerik dilakukan berdasarkan pendekatan *generalized Hoek-Brown failure criterion*, dengan proses kalibrasi menggunakan algoritma *modified cuckoo*, yaitu algoritma optimasi metaheuristik yang terinspirasi dari perilaku reproduksi burung cuckoo dan telah dimodifikasi untuk meningkatkan kecepatan konvergensi serta akurasi pencarian solusi. Hasil dari metode numerik tidak hanya nilai konstanta massa batuan utuh (m_i), tetapi juga parameter lainnya termasuk kurva Mohr-



Gambar 6. Kurva Mohr-Coulomb - Set 1 (Metode Numerik)

Coulomb dan kurva *principal stress*. Hasil dari pengolahan data dengan metode numerik dapat dilihat pada Tabel 9. dan Gambar 6. - 7. Dari hasil tersebut apabila nilai m_i nya di rata-rata didapat sebesar 27,14.

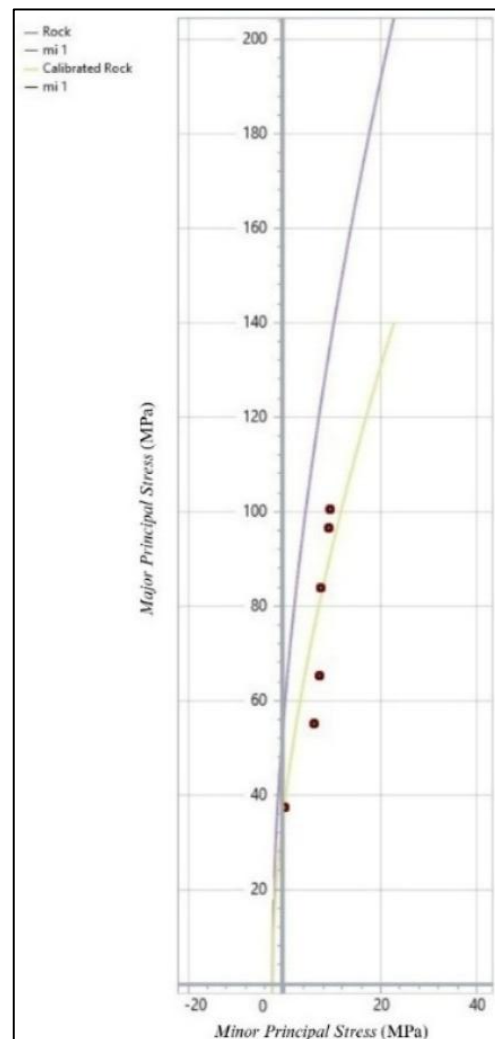
ditampilkan menggunakan nilai m_i rata-rata. (Lihat Gambar 8. – 9). Dan (Tabel 10).

Tabel 9. Hasil Konstanta Massa Batuan Utuh (m_i) Metode Numerik

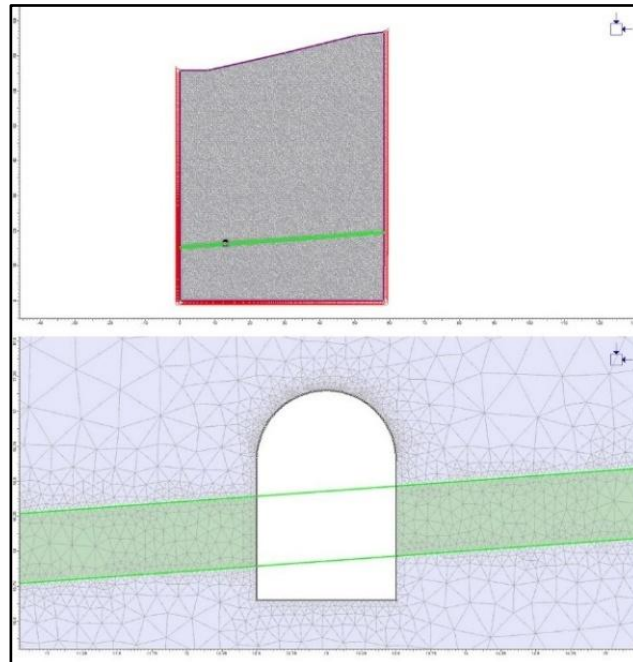
	m_i Set 1	m_i Set 2	m_i Set 3
<i>Hoek Brown Clasification</i>			
UCS of intact rock (MPa)	33,42	54,37	75,15
GSI	100	100	100
m_i	16,08	25,53	39,81
Disturbance factor	0	0	0
<i>Hoek Brown Criterion</i>			
mb	16,08	25,53	39,81
s	1	1	1
a	0,5	0,5	0,5
<i>Rock Mass Parameters</i>			
Tensile strength (MPa)	2,08	2,13	1,89
<i>Mohr Coulomb Fit</i>			
Cohesion (MPa)	6,14	9,49	12,96
Friction Angle (°)	47,87	52,17	55,89

Model Lubang Buka

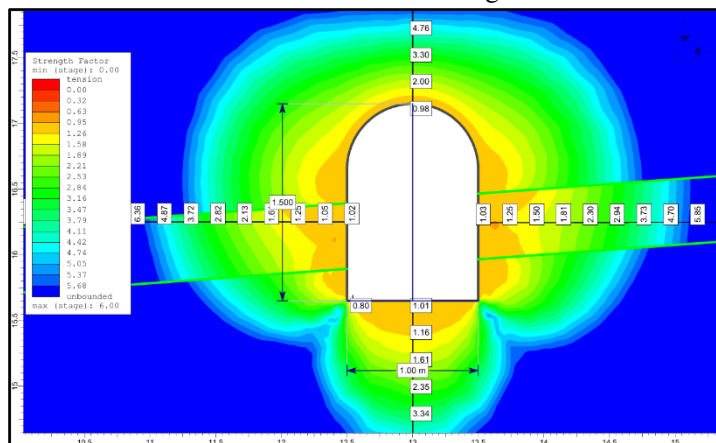
Pemodelan dilakukan menggunakan tiga variasi nilai m_i terkecil, rata-rata, dan terbesar berdasarkan hasil metode numerik. Proses ini dilakukan di perangkat lunak Rocscience RS2 untuk menilai kestabilan massa batuan di sekitar lubang bukaan. Hasil pemodelan mencakup distribusi *Strength Factor* (SF), *total displacement*, serta tegangan utama maksimum (σ_1) dan minimum (σ_3). Salah satu hasil



Gambar 7. Principal Stress Plot – Set 5



Gambar 8. Mesh Pada Lubang Buka

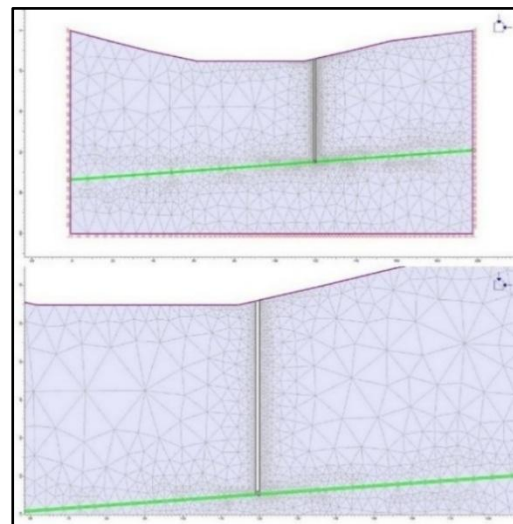


Gambar 9. Distribusi *Strength Factor* pada Lubang Buka dengan Nilai m_i Rata-Rata

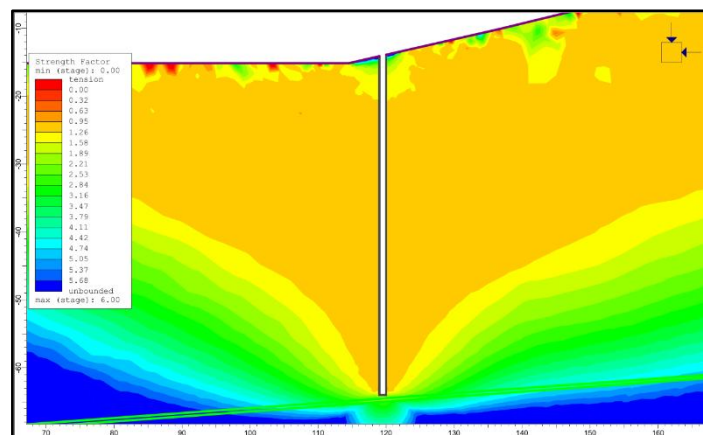
Tabel 10. Hasil Simulasi Kestabilan Lubang Buka dengan Nilai m_i Rata-Rata

Parameter	m_i Rata-Rata
<i>Strength Factor</i>	0,80
<i>Total Displacement</i> (m)	0,00112
σ_1 (MPa)	6,71
σ_3 (MPa)	-0,34

Selain melakukan analisis stabilitas pada lubang buka, dilakukan juga analisis stabilitas pada *vertical shaft*, yang dapat dilihat pada contoh Gambar 10. – 11. Dan Tabel 11.



Gambar 10. Mesh Pada *Vertical Shaft*



Gambar 11. Distribusi *Strength Factor* pada *Vertical Shaft* dengan Nilai m_i Rata-Rata

Tabel 11. Hasil Simulasi Kestabilan *Vertical Shaft* dengan Nilai m_i Rata-Rata

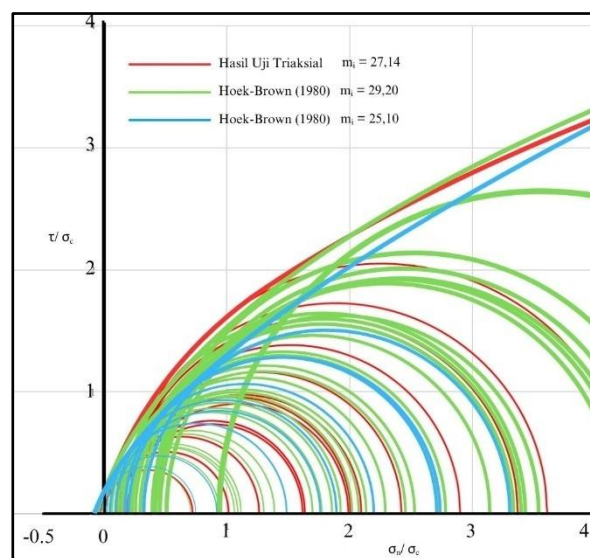
Parameter	m_i Rata-Rata
<i>Strength Factor</i>	0,49
<i>Total Displacment</i> (m)	0,0194
Sigma 1 (MPa)	8,62
Sigma 3 (MPa)	-0,54

PEMBAHASAN

Konstanta Massa Batuan Utuh (m_i)

Uji triaksial digunakan untuk menentukan kekuatan batuan dibawah tiga komponen tegangan. Dalam pengujian ini, batuan dikenai tegangan utama minimum (σ_3) serta beban aksial hingga mencapai kondisi *failure*, sehingga dapat diperoleh tegangan aksial maksimum (σ_1) pada tegangan utama minimum (σ_3) yang berbeda. Berdasarkan Hoek-Brown (1980), data uji triaksial digunakan untuk menentukan konstanta massa batuan utuh (m_i). Konstanta ini dibutuhkan mengingat Hoek-Brown menurunkan *failure criterion* non-linier berdasarkan uji triaksial. Pada Gambar 12. dapat dilihat kurva tegangan utama pada beberapa nilai m_i dan pada Gambar 13. dapat dilihat lingkaran Mohr pada beberapa nilai m_i .

Pada Gambar 13. menunjukkan perbandingan kurva tegangan utama hasil uji triaksial dengan kurva referensi Hoek-Brown (1980). Nilai m_i hasil uji triaksial sebesar 27,14 berada di antara 25,10 dan 29,20 dari literatur, menandakan bahwa hasil perhitungan m_i berada dalam rentang literatur dan dapat digunakan untuk analisis. Gambar 13. Menunjukkan lingkaran Mohr hasil uji triaksial dibandingkan dengan lingkaran Mohr dari literatur Hoek-Brown (1980).



Gambar 13. Perbandingan lingkaran Mohr Hasil Uji Triaksial dengan Lingkaran Mohr dari Hoek & Brown (1980)

Lingkaran Mohr hasil uji triaksial dengan nilai $m_i = 27,14$ tampak selaras dan menyentuh kurva referensi dari Hoek-Brown (1980) dengan nilai $m_i = 25,10$ dan 29,20, menandakan kesesuaian dengan hasil literatur.

Penentuan konstanta massa batuan utuh (m_i) dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu statistik dan numerik. Pada metode statistik, digunakan regresi linier sebagai pendekatan dari generalized Hoek-Brown failure criterion. Nilai koefisien determinasi (R^2) ditetapkan lebih dari 0,5, sesuai dengan acuan Shen dan Karakus (2014). Penentuan konstanta massa batuan utuh (m_i) melalui pendekatan metode numerik menggunakan persamaan yang sama yaitu *generalized Hoek-Brown failure criterion* namun dilakukan kalibrasi menggunakan algoritma *modified cuckoo* untuk menghasilkan nilai m_i .

yang optimal, sehingga memberikan hasil yang lebih objektif dan akurat dibandingkan *fitting* manual. Tabel 12. menyajikan perbandingan nilai m_i yang diperoleh dari pendekatan statistik dan pendekatan numerik berdasarkan data hasil uji triaksial.

Tabel 12. Perbandingan Nilai m_i Berdasarkan Metode Statistik dan Numerik

Parameter	m_i Pendekatan Statistik	m_i Pendekatan Numerik
Set 1	37,59	16,08
Set 2	22,86	25,53
Set 3	27,80	39,81
Rata-Rata	29,47	27,14

Tabel 12. menyajikan perbandingan nilai m_i dari pendekatan statistik dan numerik. Rata-rata nilai yang diperoleh adalah 29,46 (statistik) dan 27,14 (numerik), menunjukkan konsistensi hasil kedua metode. Perbedaan nilai ini disebabkan oleh perbedaan pendekatan, metode statistik menggunakan transformasi linier dari persamaan Hoek-Brown yang dapat menyederhanakan karakteristik data, sedangkan metode numerik mempertahankan bentuk non-linier asli dan mengoptimalkannya menggunakan algoritma *modified cuckoo*. Nilai m_i pendekatan numerik dipilih sebagai acuan dalam analisis kestabilan lubang bukaan karena mampu mencerminkan variasi data secara lebih akurat.

Analisis Kesesuaian Nilai m_i Hasil Penelitian dengan Nilai m_i Menurut Hoek & Brown (2006)

Analisis kesesuaian nilai m_i yang diperoleh dalam penelitian ini sesuai dengan rentang nilai referensi dari Hoek (2006). Tujuannya untuk melihat sejauh mana parameter hasil penelitian sudah sesuai dengan standar literatur. (Lihat Tabel 13.)

Tabel 13. Perbandingan Nilai m_i

	Pendekatan Statistik	Pendekatan Numerik	Referensi Hoek (2006)
Terkecil	22,86	16,08	
Rata-Rata	29,47	27,14	25±5
Terbesar	37,59	39,81	

Nilai m_i rata rata pendekatan statistik (29,47) berada dalam rentang referensi 25 ± 5 seperti referensi dari Hoek (2006). Dengan demikian, nilai m_i yang diperoleh dari pendekatan statistik cukup sesuai dengan literatur. Nilai m_i rata rata pendekatan numerik (27,14) berada dalam

rentang referensi 25 ± 5 seperti referensi dari Hoek (2006). (Tabel 14.)

Tabel 14. Penentuan Nilai m_i (Modifikasi Hoek, 2006)

Tipe Batuan	Kelas	Kelompok	Tekstur	
Batuan Sedimen	Klastik	Kasar	Konglomerat (21±3) Breksi (19±5)	Sangat Halus Batu Lempung (4±2) Batu Serpih (7±2) Maris (7±2)
	Non-Klastik	Karbonat	Batu Gamping Kristalin (12±3)	Dolomit (9±2)
Batuan Metamorf	Non-Foliasi	Evaporit	Organik	Batu Kapur (7±2)
	Sedikit Foliated	Marmor	Marmor (9±3)	Kuarsit (20±3)
	Terfoliasi	Migmatit (29±3)	Amfibolit (26±6) Sekis (12±3) Diorit (25±5) Granodiorit (29±3)	Gneis (28±5) Filit (7±3) Slate (7±4)
	Plutonik	Terang	Granit (32±3)	Dolerit (16±5)
Batuan Batu	Hipabisal	Gelap	Gabro (27±3) Niorit (20±5) Porfiri (20±5)	Diabasa (15±5) Dasit (25±3) Basalt (25±5) Tuf (13±5)
	Vulkanik	Lava	Riolit (25±5) Andesit (25±5) Breksi (19±5)	Obsidian (19±3)

Nilai m_i dari pendekatan numerik sesuai dengan referensi Hoek (2006), dengan kisaran 16,08 – 39,81. Nilai terendah lebih kecil daripada batas referensi, nilai tertinggi melebihi batas referensi, namun tetap dapat diterima karena pada dasarnya pengujian yang dilakukan menggunakan batuan yang memiliki kekuatan yang berbeda. Untuk nilai m_i yang paling kecil memiliki nilai tegangan utama maksimum (σ_1) yang rendah, sedangkan untuk nilai m_i yang paling besar sebaliknya, yaitu memiliki nilai tegangan utama maksimum (σ_1) yang tinggi. Hal tersebut dapat menghasilkan nilai m_i yang sesuai dengan hasil uji triaksialnya. Perhitungan ini juga diperoleh melalui optimasi menggunakan algoritma *modified cuckoo*. Secara keseluruhan, baik pendekatan statistik maupun numerik menghasilkan nilai m_i yang konsisten dan valid untuk batuan andesit, sehingga layak digunakan dalam analisis kestabilan lubang bukaan

Pemodelan Geoteknik Lubang Bukaan

Pemodelan ini bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan lubang bukaan berdasarkan parameter batuan hasil pengujian laboratorium, khususnya nilai m_i . Simulasi menggunakan perangkat lunak elemen hingga dengan *generalized* Hoek-Brown *failure criterion*. Nilai m_i terkecil, rata-rata, dan terbesar dari pendekatan numerik digunakan

sebagai variasi masukkan. Hasil simulasi meliputi *Strength Factor* (SF), *total displacement*, serta tegangan utama maksimum (σ_1), dan minimum (σ_3)

Tabel 15. Hasil Pemodelan Lubang Buka

Parameter	m_i Terkecil	m_i Rata- Rata	m_i Terbesar
<i>Strength Factor</i>	0,76	0,80	0,82
<i>Total Displacement</i> (m)	0,00106	0,00112	0,00123
σ_1 (MPa)	6,83	6,71	6,30
σ_3 (MPa)	-0,36	-0,34	-0,30

Strength Factor (SF) menunjukkan perbandingan antara kekuatan batuan dan tegangan aktual. Nilai $SF < 1,00$ menandakan batuan telah memasuki fase plastis, sehingga mengalami deformasi permanen. Pada simulasi ini, seluruh variasi m_i menghasilkan $SF < 1,00$, menunjukkan kondisi tidak stabil. *Total displacement* berkisar 1,06 – 1,23 mm (masih < 5 mm), yang menurut Hoek (2000) dan Harrison & Hudson (2000), tergolong aman. Tegangan utama maksimum (σ_1) berkisar 6,30 – 6,83 MPa, masih jauh di bawah kuat tekan uniaksial batuan, sehingga tidak menunjukkan risiko keruntuhan akibat gaya tekan. Namun, tegangan utama minimum (σ_3) bernilai negatif pada semua variasi model (-0,36 - -0,30 MPa), menunjukkan adanya tegangan tarik di sekitar lubang bukaan. Batuan sangat lemah terhadap gaya tarik, sehingga kondisi ini berpotensi menyebabkan *failure*, terutama di dekat permukaan lubang bukaan.

Meskipun perpindahan kecil, nilai $SF < 1,00$ dan tegangan utama minimum (σ_3) bernilai negatif menunjukkan perlunya sistem penyangga tambahan, seperti *square set*.

Setelah analisis kestabilan lubang bukaan horizontal dilakukan, penelitian dilanjutkan dengan analisis kestabilan pada *vertical shaft* menggunakan parameter *Strength Factor* (SF), *total displacement*, serta tegangan utama maksimum (σ_1) dan minimum (σ_3) (Lihat Tabel 16.)

Tabel 16. Hasil Simulasi Kestabilan *Vertical Shaft*

Parameter	m_i Terkecil	m_i Rata- Rata	m_i Terbesar
<i>Strength Factor</i>	0,48	0,49	0,51

<i>Total Displacement</i> (m)	0,0180	0,0194	0,0198
σ_1 (MPa)	8,55	8,60	8,62
σ_3 (MPa)	-0,52	-0,54	-0,57

Nilai *Strength Factor* (SF) dari ketiga variasi m_i berada di bawah 1,00, menunjukkan bahwa batuan telah mengalami fase plastis dan tidak dapat kembali ke bentuk semula. Hal ini mengindikasikan kondisi tidak stabil di sekitar *vertical shaft*.

Total displacement meningkat seiring naiknya nilai m_i , dengan nilai maksimum sebesar 1,98 cm pada m_i terbesar. Nilai ini melebihi ambang batas aman *total displacement* yaitu < 5 mm (Hoek, 2000), sehingga *vertical shaft* dianggap tidak aman.

Tegangan utama maksimum (σ_1) berkisar antara 8,55 – 8,62 MPa, masih jauh di bawah kuat tekan batuan, sehingga tidak menimbulkan risiko *failure* akibat tekan. Namun, tegangan utama minimum (σ_3) bernilai negatif (-0,52 hingga -0,57 MPa), menandakan adanya tegangan tarik di sekitar *vertical shaft*. Tegangan ini berbahaya karena batuan sangat lemah terhadap tarikan dan dapat menyebabkan rekahan pada massa batuan.

Dengan nilai $SF < 1,00$, *total displacement* > 5 mm, dan terdapat tegangan tarik, maka *vertical shaft* tergolong tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan penyangga tambahan, disarankan menggunakan kayu dengan struktur *cribbing* karena mudah didapat di lokasi sekitar tambang.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai konstanta massa batuan utuh (m_i) diperoleh dari uji triaksial pada batuan andesit menggunakan *generalized* Hoek-Brown *failure criterion*. Dengan hasil m_i rata-rata 29,47 (statistik) dan 27,14 (numerik), memiliki selisih yang kecil.
2. Nilai m_i kedua pendekatan berada dalam atau sangat dekat dengan rentang berdasarkan literatur dari Hoek (2006) sebesar 25 ± 5 , sehingga dapat dianggap valid.
3. Simulasi menunjukkan lubang bukaan dan *vertical shaft* berada dalam kondisi tidak stabil ($SF < 1,00$). Oleh karena itu, penyangga diperlukan, dengan *square set* untuk lubang bukaan dan *cribbing* untuk *vertical shaft*.

Saran

1. Disarankan untuk melakukan pengujian tambahan atau memasukkan faktor yang dapat memengaruhi uji triaksial.
2. Disarankan untuk melakukan pengujian dengan lebih dari satu jenis batu lalu dibandingkan hasilnya dengan nilai referensi literatur agar terdapat konsistensi.
3. Disarankan untuk melakukan evaluasi penyanggaan lebih lanjut untuk memastikan keselamatan operasi tambang bawah tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada para penambang rakyat di Tambang Emas Bawah Tanah Plampang II, Kulon Progo, Yogyakarta yang telah memberikan izin dan data lapangan untuk mendukung penelitian ini. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Singgih Saptono Pembimbing atas kesabaran dan bimbingan yang telah diberikan selama proses penyusunan penelitian ini. Terima kasih untuk semua pihak yang telah membantu dalam keberjalanan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih untuk *reviewer* yang telah bersedia mereview artikel ini. Penulis berharap bahwa penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan penelitian di bidang geomekanika.

DAFTAR PUSTAKA

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 4–16.
DOI:[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hoek, E. (2006). Practical rock engineering – Chapter 11: Rock mass properties. Rocscience.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980a). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 106(9), 1013–1035.
<https://doi.org/10.1061/AJGEB6.000102>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980b). *Underground excavation in rock*. London: CRC Press.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2002). Failure criterion. In *Proceedings of the NARMS-TAC Conference* (Vol. 1, pp. 267–273). Toronto, Canada.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2006). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of underground excavation in hard rock*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Pringgoprawiro, H., & Riyanto, A. (1987). *Geologi lembar Yogyakarta dan sekitarnya, Jawa*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Saptono, S., Yulianto, M. R., Vergiagara, V., & Sofyan, H. (2019). Rock mass classification for sedimentary rock masses in Indonesia coal mining areas. *2nd International Conference on Earth Science, Mineral, and Energy*, 2245. DOI:[10.1063/5.0007049](https://doi.org/10.1063/5.0007049)
- Shen, B., & Karakus, M. (2014). A simplified method for estimating the Hoek–Brown constant for intact rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70, 269–272.
DOI:[10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001116](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001116)
- SNI 2825:2008. *Cara uji kuat tekan batu*. Badan Standardisasi Nasional.
- Ulusay, R., & Hudson, J. A. (Eds.). (2007). *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006*. ISRM Turkish National Group.
DOI: [10.2113/gseegeosci.15.1.47](https://doi.org/10.2113/gseegeosci.15.1.47)