

# Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr Coulomb Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D

## *Rock Slope Stability Analysis with the Hoek-Brown and Mohr Coulomb Collapse Criteria Approach using the 2D Plaxis Numerical Method*

Desti Santi Pratiwi<sup>1</sup>, Yuki Achmad Yakin<sup>1</sup>, Aldo Mahaputra<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jln. PHH. Mustopha No.23 Bandung. Telp: (022) 7272215. Email: [destisantipratiwi@itenas.ac.id](mailto:destisantipratiwi@itenas.ac.id)

### Abstrak

Stabilitas lereng merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam merancang suatu lereng batuan. Aktivitas penggalian dalam massa batuan dapat mengakibatkan terjadinya kelongsoran atau keseimbangan lereng terganggu. Analisis stabilitas lereng batuan dapat dipengaruhi oleh tiga faktor seperti kekuatan massa batuan, faktor kerusakan akibat peledakan dan geometri lereng. Pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan analisis lereng batuan menggunakan model material Hoek-Brown (HB) dan Mohr-Coulomb (MC) berdasarkan persamaan Hoek-Brown Tahun 2002. Klasifikasi massa batuan akan menggunakan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Geological Strength Index* (GSI). Metode Elemen Hingga pada program Plaxis 2D digunakan untuk menentukan nilai faktor keamanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa selisih perbedaan nilai faktor keamanan antara model HB dan MC tidak signifikan. Nilai perbedaan paling besar yaitu 10%. Selain itu, antara kedua model ini menghasilkan bidang gelincir yang mirip. Sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan Hoek-Brown Tahun 2002 dapat digunakan sebagai korelasi parameter Mohr-Coulomb.

**Kata Kunci:** Hoek-brown; kriteria keruntuhan; lereng batuan; mohr-coulomb; plaxis 2D

### Abstract

*Slope stability is one of the important factors that must be considered in designing a rock slope. Excavation activities in rock mass cause landslides or disturb the slope balance. Analysis of rock slope stability can be influenced by three factor such as the rock mass strength, the damage caused by blasting and the slope geometry. In this study, a comparison of rock slope analysis will be carried out using the Hoek-Brown (HB) and Mohr-Coulomb (MC) material models based on Hoek-Brown equation in 2002. The classification of rock mass uses the Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) system. The Finite Element Method in the Plaxis 2D software is used to determine the safety factor. The analysis results showed that the difference in the safety factor between Hoek-Brown and Mohr-Coulomb models was not significant. The biggest difference value is 10%. Moreover, the two models produce a similar failure surface. It can be concluded that Hoek-Brown (2002) equation can be used as a correlation parameter for Mohr-Coulomb.*

**Keywords:** Hoek-brown; failure criterion; rock slope; mohr-coulomb; plaxis 2D.

## PENDAHULUAN

Banyaknya lereng batuan di Indonesia, yang dapat kita jumpai di jalan raya maupun daerah permukiman, menyebabkan perlunya analisis kestabilan lereng yang akurat. Analisis kestabilan lereng dilakukan agar dapat mengurangi risiko kelongsoran yang mengakibatkan korban jiwa. Kelongsoran dapat diprediksi berdasarkan nilai faktor keamanan (FK). Jika nilai faktor keamanan

lebih kecil dari 1, maka lereng akan mengalami kelongsoran. Pada SNI 8460 Tahun 2017 dikatakan bahwa untuk lereng batuan nilai faktor keamanan yang disyaratkan yaitu sebesar 1.5.

Pada analisis stabilitas lereng batuan sudah banyak metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan, salah satunya yaitu Metode Elemen Hingga. Program PLAXIS yang berbasis Metode Elemen Hingga sudah sering

digunakan untuk menganalisis kasus-kasus geoteknik.

Pada Program PLAXIS, pemodelan material batuan dapat didekati dengan model material Hoek-Brown (HB) maupun Mohr-Coulomb (MC). Parameter yang digunakan pada kedua model tersebut jelas berbeda. Umumnya model HB digunakan untuk memodelkan material batuan, sedangkan model MC dapat digunakan untuk memodelkan tanah ataupun batuan. Korelasi parameter batuan MC dapat diperoleh berdasarkan parameter batuan HB.

Penelitian-penelitian yang terkait mengenai analisis stabilitas lereng batuan menggunakan model HB sudah banyak dilakukan, seperti perbandingan model Limit-Equalibrium, numerik dan fisik dari stabilitas lereng dinding pun sudah dilakukan oleh Alejano dkk (2011). Lin dan Chen (2017) melakukan analisis balik pada lereng homogen di area kritisnya, serta beberapa peneliti telah melakukan analisis stabilitas lereng batuan menggunakan metode Strength Reduction (Jiang dkk, 2015; Ledesma dkk, 2016). Selain itu, beberapa peneliti melakukan perbandingan antara analisis stabilitas lereng model numerik menggunakan HB dan MC (Chen dan Lin, 2018; Shen dan Karakus, 2012a; Lee dkk, 2012). Andajani dan Triarso melakukan analisis korelasi antara parameter Indeks Plastisitas dengan sudut geser tanah dengan penambahan kapur terhadap stabilitas daya dukung fondasi dangkal (2020).

Pada penelitian ini akan memodelkan lereng batuan Diorit dengan menggunakan parameter MC dan HB pada Program PLAXIS 2D. Parameter MC akan ditentukan menggunakan rumus empirik berdasarkan parameter HB yang diketahui (Hoek, 2002). Hasil analisis yang didapatkan yaitu berupa nilai Faktor Keamanan (FK) dan selanjutnya akan dibandingkan. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui seberapa besar perbandingan hasil analisis dari pemodelan lereng dengan menggunakan parameter MC dan HB serta memvalidasi pendekatan persamaan untuk memperoleh parameter MC melalui *Hoek-Brown Failure Criterion* (Hoek, 2002).

**METODE**

Bagan alir merupakan suatu alur kegiatan yang akan dilakukan pada penelitian ini. Bagan alir dari penelitian ini mengacu pada ruang lingkup penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1.

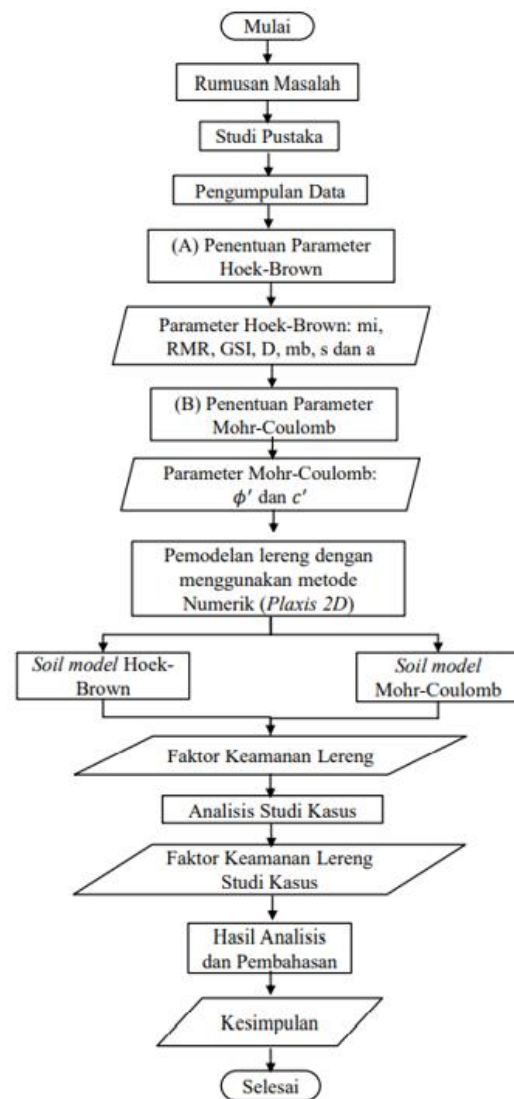
**Kriteria Keruntuhan Batuan**

Hoek dan Brown (1980) mengusulkan sebuah metode untuk mendapatkan kekuatan massa batuan

terkekarkan. Kriteria keruntuhan diturunkan dari hasil penelitian keruntuhan batuan utuh oleh Hoek (1968) dan studi model dari perilaku kekar massa batuan oleh Brown (1970). Akan tetapi, kriteria keruntuhan ini pun mengalami beberapa kali modifikasi dan pengembangan klasifikasi. Pada tahun 1994, Hoek melakukan pengembangan klasifikasi baru yang disebut *Geological Strength Index* (GSI), kemudian dimodifikasi (Hoek, dkk., 2002). Kriteria ini kemudian dikenal dengan *Generalize Hoek-Brown Criterion* melalui Persamaan 1 berikut ini.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}'} + s \right)^a \dots\dots\dots[1]$$

- Halmana:  
 $\sigma_1'$  dan  $\sigma_3'$  = nilai tegangan efektif maksimum dan minimum saat batuan mengalami keruntuhan  
 $\sigma_{ci}$  = nilai kuat tekan massa batuan  
 $m_b, s$  dan  $a$  = nilai konstanta untuk massa batuan



Gambar 1. Bagan alir penelitian

**Geological Strength Index (GSI)**

Dalam mencari nilai *Geological Strength Index* (GSI) dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan melakukan pengamatan di lapangan (seperti pada Gambar 2) atau menghitung berdasarkan nilai *Rock Mass Rating* (RMR) seperti pada Persamaan 2 (Hoek dkk, 1994).

$$GSI = RMR - 5 \dots\dots\dots[2]$$

Setelah nilai GSI didapatkan, parameter-parameter yang menggambarkan karakteristik massa batuan dapat dihitung dengan Persamaan 3 hingga Persamaan 5.

$$m_b = m_i \exp \left[ \frac{GSI-100}{28-14D} \right] \dots\dots\dots[3]$$

$$s = \exp \left[ \frac{GSI-100}{9-3D} \right] \dots\dots\dots[4]$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[ e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right] \dots\dots\dots[5]$$

Untuk parameter  $m_b$ ,  $s$  dan  $a$  dibutuhkan konstanta  $m_i$  dan  $D$ . konstanta  $m_i$  ditentukan berdasarkan jenis batuan (sedimen, malihan dan beku) sedangkan konstanta  $D$  adalah faktor kerusakan yang tergantung pada kerusakan massa batuan akibat penggalian atau peledakan. Nilai konstanta  $m_i$  dan  $D$  dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

**Rock Mass Rating (RMR)**

Nilai RMR dapat ditentukan berdasarkan persamaan yang telah dibuat oleh Bieniawski Tahun 1989. Pada penentuan nilai RMR dibutuhkan beberapa parameter, yaitu nilai kuat tekan batuan (UCS), nilai RQD yang diperkenalkan oleh Deere (1964), jarak diskontinuitas, kondisi diskontinuitas, dan kondisi muka air tanah. Setelah mendapatkan parameter tersebut, selanjutnya menentukan nilai bobot dari masing-masing parameter dan akhirnya dapat menentukan nilai RMR.

**Modulus Deformasi**

Modulus defromasi dapat dihitung menggunakan persamaan Hoek-Brown berdasarkan nilai faktor efek kerusakan akibat ledakan ( $D$ ) dan tekanan relaksasi. Perhitungan Modulus deformasi dibagi menjadi dua tergantung dari nilai kuat tekan massa batuan ( $\sigma_{ci}$ ). Jika nilai  $\sigma_{ci} \leq 100$  Mpa maka gunakan Persamaan 6, sedangkan jika nilai  $\sigma_{ci} > 100$  Mpa maka gunakan Persamaan 7.

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \dots\dots\dots[6]$$

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \dots\dots\dots[7]$$

Halmana:

- $\sigma_{ci}$  = nilai kuat tekan massa batuan
- $D$  = faktor efek kerusakan akibat ledakan
- $GSI$  = *Geological Strength Index*

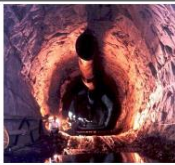




STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY			
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	50			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	30			
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	20			
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A		10
		80	60	40	20

Gambar 2. Nilai GSI berdasarkan pengamatan geologi di lapangan (Sumber: Hoek, 2006)

Rock type	Class	Group	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very fine	
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones (17 ± 4)	Siltstones (7 ± 2)	Claystones (4 ± 2)	
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)	
						Marls (7 ± 2)	
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)	
		Evaporites		Gypsum (8 ± 2)	Anhydrite (12 ± 2)		
	Organic				Chalk (7 ± 2)		
METAMORPHIC	Non Foliated	Marble (9 ± 3)	Hornfels (19 ± 4)	Quartzites (20 ± 3)			
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)			
	Foliated*	Gneiss (28 ± 5)	Schists (12 ± 3)	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)		
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite (32 ± 3)	Diorite (25 ± 5)			
		Dark	Gabbro (27 ± 3)	Norite (20 ± 5)	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)	
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Andesite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)	Basalt (25 ± 5)
		Pyroclastic		Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)

Gambar 3. Nilai konstanta  $m_i$  (Sumber: Hoek, 2006)

<https://doi.org/10.26740/proteksi.v4n2.p74-81>

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Gambar 4. Faktor kerusakan (D) (Sumber: Hoek, 2002)

**Pendekatan Persamaan Mohr-Coulomb**

Kekuatan geser dari massa batuan pada permukaan geser yang diungkapkan oleh kriteria keruntuhan MC perlu pendekatan atau kesetaraan untuk menentukan sudut geser dalam ( $\phi'$ ) dan kohesi ( $c'$ ) antara kriteria keruntuhan HB dan MC untuk menganalisis stabilitas suatu lereng. Hoek (2002) memberikan persamaan untuk mencari kriteria keruntuhan HB dan kriteria keruntuhan MC seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 8 hingga Persamaan 10.

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3 \dots \dots \dots [8]$$

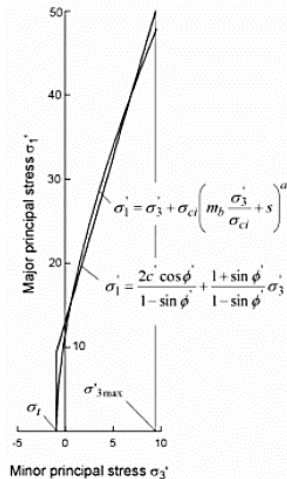
$$\phi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \dots \dots \dots [9]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/(1+a)(2+a)}} \dots \dots [10]$$

Keterangan:  
 $\sigma'_1$  dan  $\sigma'_3$  = nilai tegangan efektif maksimum dan minimum saat batuan mengalami keruntuhan

$\sigma_{ci}$  = nilai kuat tekan  
 $m_b, s$  dan  $a$  = nilai konstanta untuk massa batuan  
 $\phi'$  = nilai kuat geser dalam  
 $c'$  = nilai kohesi

Persamaan 9 merupakan definisi dari grafik hubungan *major principal stress* dan *minor principal stress* antara keruntuhan HB dan MC yang ditunjukkan pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Hubungan *major dan minor principal stress* dari HB dan MC (Sumber: Hoek, 2002)

**Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Numerik**

Pada analisis stabilitas lereng batuan dapat menggunakan berbagai metode mulai dari yang sederhana hingga rumit. Dalam penelitian ini, penulis meninjau kestabilan lereng dengan Metode Elemen Hingga menggunakan Program PLAXIS 2D. PLAXIS 2D adalah salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang geoteknik. PLAXIS 2D dikembangkan melalui pendekatan prinsip Finite Element Method (Metode Elemen Hingga) untuk membuat model lereng dan menganalisis hingga mendekati kondisi sebenarnya. Pada penelitian ini, PLAXIS 2D digunakan untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan (FK).

Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai FK yaitu Metode Pengurangan Kekuatan Geser (Strength Reduction Method). Menurut Brinkgreve (2016), metode ini memiliki prinsip mereduksi nilai kuat geser tanah berupa nilai kohesi ( $c$ ) dan sudut geser ( $\phi$ ) secara bertahap hingga terjadi keruntuhan. Persamaan yang digunakan untuk mencari nilai FK ditunjukkan pada Persamaan 11 dan 12 di bawah ini.

$$c_f = \frac{c}{SRF} \dots \dots \dots [11]$$

$$\phi_f = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right) \dots \dots \dots [12]$$

**Penentuan Parameter Pemodelan**

Data yang telah didapatkan di lapangan selanjutnya akan dilakukan pengujian di laboratorium untuk mendapatkan parameter-parameter yang dibutuhkan. Hasil uji laboratorium material batuan tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Laboratorium Material Batuan

Parameter	Satuan	Nilai
$\gamma_{unsat}$	gr/cm <sup>3</sup>	26,41
$\gamma_{sat}$	gr/cm <sup>3</sup>	26,56
$E$	kg/cm <sup>2</sup>	34400
$\sigma_c$	kg/m <sup>2</sup>	477,699

Analisis stabilitas lereng batuan pada penelitian ini didasarkan pada *Hoek-Brown Failure Criterion* (2002). Kriteria keruntuhan HB ini digunakan untuk mendapatkan parameter MC yaitu nilai sudut geser dalam ( $\phi'$ ) dan nilai kohesi ( $c'$ ) dengan menggunakan parameter nilai  $m_b$ ,  $s$  dan  $a$ . Parameter tersebut didapat dengan menggunakan parameter nilai GSI, RMR, nilai  $m_i$  dan faktor kerusakan (D). Klasifikasi massa batuan dengan RMR dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari hasil pengklasifikasian massa batuan menggunakan metode RMR didapatkan nilai RMR 52. Nilai RMR digunakan untuk menghitung *Geological Strength Index* (GSI) dengan cara pengurangan 5 dari nilai RMR, sehingga nilai GSI adalah 47. Parameter-parameter yang telah didapatkan selanjutnya dapat digunakan untuk mengetahui nilai sudut geser dalam ( $\phi'$ ) dan nilai kohesi ( $c'$ ).

Tabel 2. Pengklasifikasian massa batuan dengan menggunakan sistem RMR

Parameter	Nilai	Bobot
Strength	65 MPa	7
RQD	35 %	8
Spacing of discontinuities	0,08 m	8
Condition of dscontinuities	Panjang 8 m, terbuka 0,2 mm, sedikit kasar, lapuk sedang	14
Keairan	kering	15
Jumlah Bobot		52

(Sumber: Bieniawski, 1979)

Pada proses menentukan parameter sudut geser dan kohesi digunakan Persamaan Hoek (2002). Parameter yang dibutuhkan dalam persamaan yaitu nilai  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $\sigma_c$ ,  $E_m$ ,  $\sigma'_{cm}$ , dan  $\sigma'_{3n}$ . Rekapitulasi nilai parameter-parameter yang dibutuhkan untuk

mencari parameter MC ditunjukkan pada Tabel 3 di bawah ini.

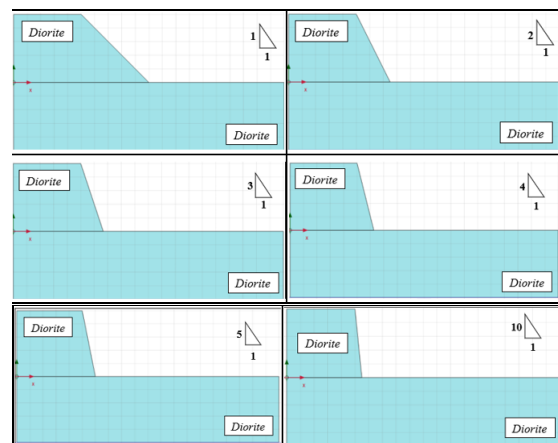
Tabel 3. Parameter yang Dibutuhkan untuk Korelasi

Parameter	Satuan	Nilai
$m_b$	-	1,63086
$s$	-	0,00046
$a$	-	0,50705
$\sigma_c$	kN/m <sup>2</sup>	953,267
$\sigma_t$	kN/m <sup>2</sup>	-13,555
$\sigma'_{cm}$	kN/m <sup>2</sup>	7.787,72
$\sigma'_{3n}$	kN/m <sup>2</sup>	0,00289

**Tahapan Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Program Plaxis 2D**

Analisis stabilitas lereng batuan dilakukan dengan menggunakan Program PLAXIS 2D. Tahapan yang dilakukan untuk menganalisis stabilitas lereng batuan yaitu sebagai berikut:

1. Membuat geometri pemodelan lereng batuan dengan kemiringan 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 dan 10:1 (Gambar 6) pada Program PLAXIS 2D.
2. Memasukkan parameter tanah dan batuan yang telah dianalisis. Parameter tanah didapatkan dari analisis pendekatan Hoek-Brown 2002.
3. Melakukan tahapan analisis, yaitu *Gravity Loading* dan *Safety Analysis*. Pada tahap *Gravity Loading*, tegangan awal yang diperhitungkan yakni berat tanah di atasnya. Sedangkan pada tahap *Safety Analysis*, nilai FK dicari menggunakan Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength Reduction Method*).
4. Hasil analisis berupa nilai Faktor Keamanan/*Safety Factor* (SF) akan dibandingkan antara Model HB dan MC.



Gambar 6. Pemodean geometri lereng pada Plaxis 2D dengan berbagai kemiringan

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter MC yang telah didapatkan berdasarkan Persamaan 10 dan 11 (Hoek, 2002), yaitu nilai kohesi sebesar 125,2 kN/m<sup>2</sup> dan nilai sudut geser sebesar 63,90. Rekapitulasi parameter yang digunakan dalam analisis ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Parameter Hoek-Brown

Parameter	Satuan	Nilai
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	26,046
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	25,899
$E_m$	kN/m <sup>2</sup>	118.372,51
$\nu$	-	0,2
$\sigma_{ci}$	kN/m <sup>2</sup>	46.846,269
$m_i$	-	30
GSI	-	47
D	-	0,7
$m_b$	-	1,63086

Tabel 5. Parameter Mohr-Coulomb

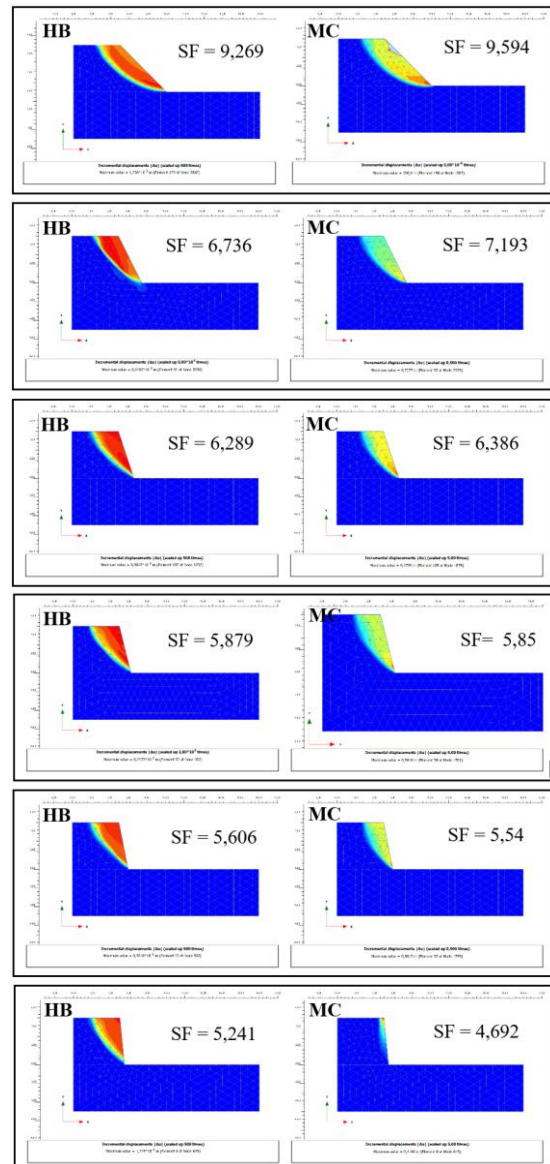
Parameter	Satuan	Nilai
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	26,046
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	25,899
$E_m$	kN/m <sup>2</sup>	118.372,51
$\nu$	-	0,2
$\phi'$	o	63,888
$c'$	kN/m <sup>2</sup>	125,251

Hasil analisis berupa skema bidang gelincir pada pemodelan HB dan MC ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa kedalaman dan bentuk bidang gelincir antara model HB dan MC relatif mirip kecuali pada kemiringan 10V:1H. Pada kemiringan 10V:1H, pemodelan MC menunjukkan bidang gelincir berupa keruntuhan permukaan saja, sedangkan pemodelan HB menunjukkan gambar keruntuhan rotasi.

Hasil analisis berupa rekapitulasi nilai faktor keamanan ditunjukkan pada Tabel 6, sedangkan grafik hubungan antara kemiringan dengan nilai faktor keamanan ditunjukkan pada Gambar 8. Pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa nilai faktor keamanan antar model HB dan MC memiliki nilai yang mirip. Pada lereng dengan kemiringan 1:1 hingga 5:1 persentase perbandingan perbedaan nilai faktor keamanan antara model HB dan MC yaitu masih di bawah 10%, yakni 3.6% untuk kemiringan 1:1, 6.8% untuk kemiringan 2:1, 1.6% untuk kemiringan 3:1, 1.2% untuk kemiringan 4:1, dan 1.1% untuk kemiringan 5:1. Sedangkan untuk kemiringan 10:1, persentase perbedaannya yaitu sebesar 10.5%.

Pada Gambar 8 menunjukkan grafik hubungan antara kemiringan lereng dengan nilai faktor keamanan. Pada grafik dapat dilihat bahwa untuk model HB dan MC memiliki bentuk yang cenderung

mirip, terutama di kemiringan 4:1. Pada kemiringan 1:1 hingga 3:1, nilai SF pada pemodelan MC lebih besar dibandingkan dengan nilai SF pada pemodelan HB. Sedangkan untuk kemiringan 4:1 hingga 10:1, nilai SF pada pemodelan HB lebih besar dibandingkan modelan MC. Berdasarkan kemiringan, model HB mengalami penurunan nilai faktor keamanan sebesar 43%, sedangkan model MC sebesar 51%.



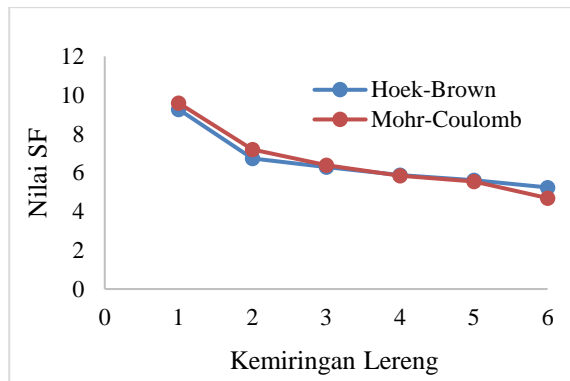
Gambar 7. Distribusi bidang gelincir pada pemodelan HB dan MC

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Nilai Faktor Keamanan

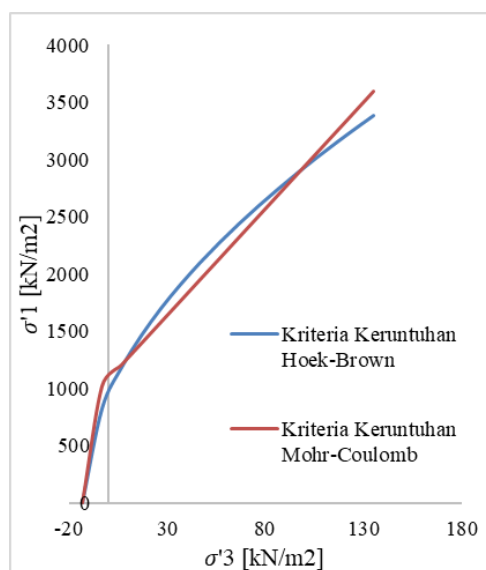
Model	Kemiringan					
	1:1	2:1	3:1	4:1	5:1	10:1
HB	9,26	6,73	6,28	5,87	5,60	5,24
MC	9,59	7,19	6,38	5,8	5,54	4,69

Hasil analisis berupa hubungan tegangan major dan minor antara keruntuhan HB dan MC disajikan pada Gambar 9. Berdasarkan Gambar 9,

grafik kriteria keruntuhan HB ditunjukkan dengan garis warna biru memiliki sifat non-linier sedangkan untuk grafik kriteria keruntuhan MB yang ditunjukkan dengan garis warna oranye memiliki sifat linier. Grafik hubungan antara kedua kriteria keruntuhan tersebut telah sesuai dengan Hoek-Brown *Failure Criterion* (2002).



Gambar 8. Grafik hubungan antara kemiringan lereng dengan nilai faktor keamanan



Gambar 9. Hubungan major dan minor antara kriteria keruntuhan Hoek-Brown dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

## KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis dari pemodelan stabilitas lereng batuan menggunakan pemodelan numerik dapat disimpulkan bahwa persamaan Hoek-Brown Failure Tahun 2002 dapat digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan parameter MC berdasarkan parameter HB. Nilai faktor keamanan yang dihasilkan pemodelan HB dan MC memiliki kecenderungan yang mirip, adapun persentase perbedaannya yaitu di bawah 10%. Selain itu,

persentase penurunan nilai faktor keamanan antara lereng dengan kemiringan 1:1 dan 10:1 adalah sebesar 43% untuk model HB dan 51% untuk model MC.

Hubungan major dan minor antara kriteria keruntuhan Hoek-Brown dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb telah sesuai dengan Hoek-Brown Failure Criterion (2002). Setelah melakukan analisis terhadap semua jenis pemodelan, dapat disimpulkan bahwa Hoek-Brown *Failure Criterion* (2002) dapat dijadikan acuan dalam mencari parameter batuan untuk soil model Mohr-Coulomb.

## REFERENSI

- Alejano, L. R., Ferrero, A. M., Ramírez-Oyanguren, P., Fernández, M. I. A. 2011. Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability. *Int J Rock Mech Min Sci*, 48, 16–26.
- Andajani, N., Triarso, A. 2020. Korelasi Antara Parameter Indeks Plastisitas dengan Sudut Gese Tanah dengan Penambahan Kapur Terhadap Stabilisasi Daya Dukung Pondasi Dangkal. *Proteksi*, 2(1), 21-26
- Bieniawski, Z. T. 1979. The geomechanics classification in rock engineering applications. In: *Proceedings of the 4th International Congress on Rock Mechanics*, 41–48
- Brinkgeve, R. B., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M. 2016. *Material Models Manual*. Netherlands: Plaxis 2D.
- Brown, E.T. 1970. Strength of models of rock with intermittent joints. *J. Soil Mech. Foundn Div*, 96(6), 1935-1949.
- Chen, J., Lin, H. 2018. Consistency analysis of Hoek–Brown and equivalent Mohr–Coulomb parameters in calculating slope safety factor. *Null Eng Geol Environ*, 78, 4349-4361.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech Eng Geol*, 1(1), 16–22.
- Hoek, E., Brown, E. T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div., ASCE*, 106 (GT9), 1013-1035.
- Hoek, E. 1968. *Brittle failure of rock*. In *Rock Mechanics in Engineering Practice*. (eds K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz). London: Wiley
- Hoek, E., Brown, E. T. 1980. *Underground excavations in rock*. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 267-273.

- Hoek, E. 2006. *Practical Rock Engineering*. Canada.
- Jiang, Q. H., Qi, Z. F., Wei, W., Zhou, C. B. 2015. Stability assessment of a high rock slope by strength reduction finite element method. *Bull Eng Geol Environ*, 74,1153–1162.
- Ledesma, O., Mandive, I. G., Sfriso, A. 2016. Factor of Safety by The Strength-Reduction Technique Applied to The Hoek-Brown Model. *Mecanica Computacional XXXIV*, 2599-2622.
- Lin, H., Chen, J. 2017. Back analysis method of homogeneous slope at critical state. *KSCE J Civ Eng*, 21, 670–675.
- Shen, J. Y., Karakus, M. 2012. Determination of Mohr–coulomb shear strength parameters from generalized Hoek–Brown criterion for slope stability analysis. *Rock Mech Rock Eng*, 45, 23–129.
- Shen, J. Y., Karakus, M. Xu, C., S. 2012. Direct expressions for linearization of shear strength envelopes given by the generalized Hoek-Brown criterion using genetic programming. *Comput Geotech*, 44, 139–146.
- SNI 8460. 2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.