

Pengaruh Beban Dinamik pada Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Numerik 3 Dimensi Menggunakan Model Hoek-Brown dan Mohr Coulomb

DESTI SANTI PRATIWI^{1*}, MUHAMMAD DAFFA RIZKY²

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: destisantipratiwi@itenas.ac.id

ABSTRAK

Indonesia terletak pada wilayah Ring of Fire Pasifik yang ditandai dengan aktivitas tektonik dinamis. Selain itu, data historis menunjukkan bahwa tanah longsor dan gempa bumi merupakan dua fenomena yang paling sering terjadi, dengan frekuensi hampir setiap tahun. Stabilitas lereng batuan memiliki tantangan yang menarik untuk diteliti, terutama dengan pendekatan Metode Numerik. Dua kriteria material yang umum digunakan dalam analisis batuan adalah Hoek-Brown (HB) untuk batuan heterogen dan Mohr-Coulomb (MC) untuk material tanah-batuan homogen. Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan kinerja kriteria HB dan MC dalam pemodelan stabilitas lereng batuan di bawah pengaruh beban dinamik melalui simulasi numerik dengan PLAXIS 3D pada tiga variasi kemiringan lereng (1:1, 3:1, 5:1) menggunakan data gempa bermagnitudo 6,54. Hasil menunjukkan nilai faktor keamanan (FK) yang relatif serupa dengan selisih 9,68% - 24,03%. Namun, analisis deformasi mengungkap perbedaan signifikan, khususnya pada arah vertikal (u_y) dengan selisih mencapai 93,94%, sementara deformasi horizontal (u_x) lebih konsisten. Disimpulkan bahwa meskipun kedua model dapat dikorelasikan untuk analisis stabilitas berdasarkan FK, respons deformasi mereka, terutama secara vertikal, sangat berbeda.

Kata kunci: lereng, batuan, dinamik, numerik, faktor keamanan

ABSTRACT

Indonesia is situated within the Pacific Ring of Fire, characterized by dynamic tectonic activity. Historical data further indicates that landslides and earthquakes are among the most frequently occurring natural phenomena, happening almost annually. The stability of rock slopes presents a compelling challenge for research, particularly through a numerical modeling approach. Two material criteria commonly used in rock analysis are Hoek-Brown (HB) for heterogeneous rock masses and Mohr-Coulomb (MC) for homogeneous soil-rock materials. This study aims to analyze and compare the performance of the HB and MC criteria in modeling the stability of rock slopes under dynamic seismic loading. This was conducted through numerical simulation using PLAXIS 3D on three slope variations (1:1, 3:1, 5:1) employing earthquake data with a magnitude of 6.54. The results show relatively similar values for the factor of safety (FS), with a difference of 9.68% to 24.03%. However, deformation analysis revealed a significant difference, particularly in the vertical direction (u_y) with a discrepancy of up to 93.94%, while horizontal deformation (u_x) was more consistent. It is concluded that although the two models can be correlated for stability analysis based on FS, their deformation responses, especially in the vertical direction, are vastly different.

Keywords: rock slope, dynamic, numerical, spun pile, factor of safety

1. PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia terletak pada wilayah *Ring of Fire* Pasifik yang ditandai dengan aktivitas tektonik dinamis, fluktuasi iklim ekstrem, dan gejala cuaca signifikan. Kondisi ini menjadikan negara ini rentan terhadap berbagai bencana kebumihantaran seperti gempa bumi, tanah longsor, banjir, dan badai. Data historis menunjukkan bahwa tanah longsor dan gempa bumi merupakan dua fenomena yang paling sering terjadi, dengan frekuensi hampir setiap tahun. Stabilitas lereng menjadi faktor krusial dalam mitigasi risiko longsor, mengingat lereng merupakan bentuk topografi dengan kemiringan tertentu yang rentan terhadap ketidakstabilan mekanis. Upaya meminimalkan risiko bencana ini, analisis kuantitatif stabilitas lereng batuan melalui perhitungan faktor keamanan (FK) menjadi esensial. Berdasarkan SNI 8460 [1] nilai FK minimum yang disyaratkan untuk stabilitas lereng batuan adalah 1,5, dengan ambang kritis $FK < 1$ mengindikasikan potensi kelongsoran.

Secara teoretis, stabilitas lereng batuan mengacu pada prinsip keseimbangan gaya antara *shear strength* (τ) dan *shear stress* (σ) material [2]. Dalam analisis numerik bidang geoteknik, Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* – FEM) telah menjadi pendekatan dominan untuk pemodelan stabilitas lereng. Perangkat lunak PLAXIS, yang berbasis FEM, menawarkan fleksibilitas dalam memodelkan karakteristik geoteknik kompleks, termasuk material batuan [3][4]. Dua kriteria material yang umum digunakan adalah Hoek-Brown (HB) untuk batuan heterogen dan Mohr-Coulomb (MC) untuk material tanah-batuan homogen.

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb (MC) menyatakan bahwa longsor terjadi ketika tahanan geser melebihi kuat geser tanah. Sementara itu, kriteria *Hoek-Brown* (HB) memperhitungkan anisotropi batuan melalui konstanta material m_b , s , dan a yang diturunkan dari *Geological Strength Index* (GSI) [5]. Kedua model ini menjadi dasar pemodelan numerik dalam studi ini, dengan HB lebih cocok untuk batuan terfragmentasi dan MC untuk material homogen. Studi dalam menentukan nilai GSI sudah banyak dilakukan [6][7]. Studi sebelumnya oleh telah mengaplikasikan kedua model ini dalam analisis stabilitas lereng batuan [8][9][10]. Namun, terdapat *gap* penelitian yaitu belum memperhitungkan beban seismik. Hal tersebut tentunya sangat penting mengingat di Indonesia potensi terjadi gempa sangat tinggi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perbandingan kinerja kriteria HB dan MC dalam pemodelan stabilitas lereng batuan di bawah pengaruh beban dinamik. Melalui simulasi numerik tiga dimensi, studi ini akan mengkuantifikasi nilai faktor keamanan dan deformasi lereng untuk mengevaluasi efektivitas kedua model tersebut dalam konteks kondisi geoteknik Indonesia.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi numerik untuk menganalisis stabilitas lereng batuan yang terbentuk akibat proses galian. Analisis dilakukan terhadap beberapa variasi kemiringan lereng menggunakan perangkat lunak PLAXIS 3D yang berbasis metode elemen hingga. Fokus utama penelitian ini adalah membandingkan kinerja dua model konstitutif yang umum digunakan dalam analisis geoteknik, yaitu model Hoek-Brown yang merepresentasikan perilaku massa batuan, serta model Mohr-Coulomb yang bersifat lebih sederhana namun banyak diterapkan dalam praktik rekayasa geoteknik. Penggunaan analisis lereng batuan dengan PLAXIS 2D sudah dilakukan oleh Pratiwi dkk [11].

2.1 Kriteria Keruntuhan Hoek Brown

Hoek dan Brown mengusulkan kriteria keruntuhan empiris untuk memperkirakan kekuatan massa batuan yang terkekarkan [12]. Seiring perkembangannya, kriteria ini mengalami beberapa modifikasi dan pengembangan, khususnya dalam hal klasifikasi kualitas massa batuan. Pada tahun 1994, Hoek dkk memperkenalkan sistem klasifikasi baru yang dikenal sebagai *Geological Strength Index* (GSI) [13], yang kemudian disempurnakan pada publikasi selanjutnya [14]. Hasil pengembangan ini melahirkan bentuk kriteria yang dikenal sebagai *Generalized Hoek-Brown Criterion*, yang ditunjukkan pada **Persamaan 1** dan berkaitan dengan **Persamaan 2** hingga **Persamaan 4**.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

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

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp \left(\frac{-GSI}{15} \right) - \exp \left(\frac{-20}{3} \right) \right] \quad (4)$$

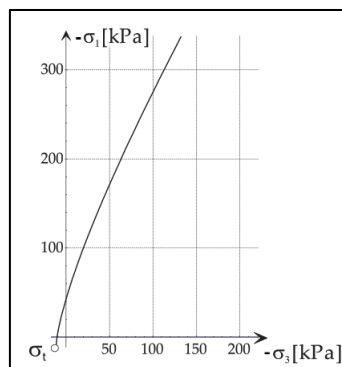
halmana:

σ'_1 dan σ'_3 = nilai tegangan efektif maksimum dan minimum saat batuan mengalami keruntuhan [kPa];

σ_{ci} = kuat tekan uniaksial material batuan utuh [kPa];

m_b = nilai tereduksi dari parameter batuan utuh m_i , bergantung pada Indeks Kekuatan Geologi (GSI) dan Faktor Gangguan (D);

s dan α = konstanta material tambahan untuk massa batuan.



Gambar 1. Kriteria keruntuhan Hoek-Brown pada tegangan utama

Dari nilai σ_{ci} (didefinisikan sebagai nilai positif), kuat tekan uniaksial batuan spesifik yang dipertimbangkan (σ_c) dapat diperoleh dengan **Persamaan 5**.

$$\sigma_c = -|\sigma_{ci}| s^\alpha \quad (5)$$

halmana:

σ_{ci} = kuat tekan uniaksial material batuan utuh [kPa],

s dan α = konstanta material tambahan untuk massa batuan.

Sedangkan, kekuatan tarik batuan spesifik yang dipertimbangkan (σ_t) dapat diperoleh dengan **Persamaan 6** dan kontur kegagalan Hoek-Brown penuh ($f_i = 0$) dalam ruang tegangan utama diilustrasikan di **Gambar 1**.

$$\sigma_t = \frac{s |\sigma_{ci}|}{m_b} \quad (6)$$

halmana:

σ_t = kekuatan tarik batuan spesifik yang dipertimbangkan [kPa].

2.1.1 Geological Strength Index (GSI)

Tahun 1994 Hoek, memperkenalkan *Geological Strength Index* (GSI) untuk memperkirakan berkurangnya kekuatan suatu massa batuan yang disebabkan oleh perbedaan kondisi geologi. Nilai *GSI* dapat ditentukan melalui dua cara, yaitu pengamatan geologi di lapangan dengan bantuan dan dapat diperkirakan berdasarkan nilai *Rock Mass Rating* (RMR). Saat ini, beberapa peneliti telah menyelidiki hubungan antara Bieniawski *Rock Mass Rating* (RMR_{89}) dan GSI [15]. Pertama, mereka menyarankan perhitungan **Persamaan 7** dengan RMR_{89} dapat dihitung dengan **Persamaan 8** [16][17][18]. Batuan utuh setara dengan GSI = 100, sedangkan struktur tanah berada di dekat GSI = 0.

$$GSI = RMR_{89} - 5 \text{ untuk } RMR_{89} > 23 \quad (7)$$

$$RMR_{89} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 \quad (8)$$

halmana:

R1 = kekuatan tekan uniaksial [MPa];

R2 = penunjukan kualitas batuan, RQD;

R3 = *average joint space*;

R4 = *joint wall conditions*;

R5 = air, dalam definisi asli, R5 harus didefinisikan sebagai kering (yaitu, 15) untuk menilai inti bor.

2.1.2 Rock Mass Rating (RMR)

Nilai *Geological Strength Index* (GSI) diperoleh melalui proses klasifikasi massa batuan menggunakan metode *Rock Mass Rating* (RMR). Klasifikasi ini mengacu pada sistem yang dikembangkan oleh Bieniawski [15], di mana hasil penilaian RMR kemudian dikonversi menjadi nilai GSI sesuai dengan grafik korelasi yang telah tersedia. Beberapa parameter utama yang digunakan dalam penilaian RMR antara lain dijelaskan sebagai berikut:

a. *Uniaxial Compressive Strength* (UCS)

Bobot penilaian untuk nilai UCS dapat dilihat pada **Tabel 1**, yang mencakup klasifikasi mulai dari batuan sangat lemah hingga sangat kuat, sesuai dengan standar [15].

b. *Rock Quality Designation* (RQD)

Rock Quality Designation (RQD) disebutkan sebagai indeks kuantitatif untuk menilai kualitas massa batuan berdasarkan panjang inti bor utuh. Nilai RQD dihitung menggunakan **Persamaan 9** [19].

$$RQD = \frac{\text{sum of core places } \geq 10 \text{ cm}}{\text{total drill run}} \times 100\% \quad (9)$$

Selain menggunakan perhitungan langsung berdasarkan panjang inti ≥ 10 cm, nilai RQD juga dapat dihitung secara empiris melalui persamaan yang dikembangkan oleh Priest dan Hudson, terutama ketika data hasil pengeboran tidak tersedia secara lengkap [20]. Persamaan tersebut ditunjukkan pada **Persamaan 10**. Bobot (*rating*) untuk parameter

RQD dalam sistem klasifikasi RMR dapat dilihat pada **Tabel 2**, yang menunjukkan rentang nilai RQD beserta kontribusinya terhadap total skor penilaian massa batuan.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda} \times (0,1\lambda + 1) \quad (10)$$

halmana:

λ = jumlah kekar per meter (*discontinuity frequency*),

e = bilangan natural eksponensial.

Tabel 1. Nilai Bobot dari Hasil Pengujian Kuat Tekan (UCS) [21]

Deskripsi Kualitatif	Kekuatan Tekan [MPa]	Kekuatan Beban Titik [MPa]	Rating
Kekuatan Luar Biasa Kuat	>250	8	15
Sangat Kuat	100 – 250	4 – 8	12
Kuat	50 – 100	2 – 4	7
Rata-rata	25 – 50	1 – 2	4
Lemah	10 – 25	Penggunaan kekuatan tekan uniaksial lebih disukai.	2
Sangat Lemah	2 – 10	-do-	1
Sangat-Sangat Lemah	1 – 2	-do-	0

Tabel 2. Nilai Bobot (*Rating*) Rock Quality Designation (RQD) [21]

Deskripsi Kualitatif	RQD	Rating
Sangat Baik	90 – 100	20
Baik	75 – 90	17
Cukup Baik	50 – 75	13
Buruk	25 – 50	8
Sangat Buruk	<25	3

c. Jarak antar diskontinuitas (*Spacing of Discontinuities*)

Kriteria penilaian terhadap parameter ini ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Nilai Bobot (*Rating*) Spacing of Discontinuities [15]

Deskripsi	Jarak [m]	Rating
Sangat Lebar	>2	20
Lebar	0,6 – 2	15
Moderat	0,2 – 0,6	10
Rapatan	0,06 – 0,2	8
Sangat Rapat	<0,06	5

d. *Condition of Discontinuities*

Kategori penilaian serta bobot (*rating*) untuk parameter ini ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Nilai Bobot (*Rating*) Condition of Discontinuities [21]

Deskripsi	Rating
Sangat Kasar dan tidak tererosi, batuan dinding padat dan tidak terpisah.	30
Kasar dan sedikit tererosi, permukaan batuan dinding terpisah <1mm	25
Agak kasar dan cukup hingga sangat tererosi, permukaan batuan dinding terpisah <1mm	20
Permukaan batuan dinding yang tergosok atau goresan tebal 1-5 mm atau rekahan berkelanjutan 1-5 mm	10
Gauge lembut berketebalan 5mm, rekahan berkelanjutan lebar 5mm	0

e. *Ground Water Condition*

Nilai *rating* untuk kondisi ini ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Nilai Bobot (Rating) Ground Water Condition [21]

Inflow per 10 m tunnel length (litre/min)	None	< 10	10 – 25	25 – 125	>125
Koint water presseure / major principal stress	0	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	>0,5
General description	Completely dry	Dump	Wet	Dripping	Flowing
Rating	15	10	7	4	0
Inflow per 10 m tunnel length (litre/min)	None	< 10	10 – 25	25 – 125	>125
Koint water presseure / major principal stress	0	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	>0,5
General description	Completely dry	Dump	Wet	Dripping	Flowing
Rating	15	10	7	4	0

2.1.3 Modulus Deformasi

Modulus deformasi massa batuan (*modulus of deformation*) dapat diperkirakan menggunakan pendekatan empiris berdasarkan kriteria Hoek-Brown. Estimasi ini mempertimbangkan faktor gangguan (*disturbance factor, D*) untuk merepresentasikan pengaruh proses peledakan dan relaksasi tegangan, khususnya pada batuan yang digali secara tidak terkendali. Nilai modulus elastisitas massa batuan (E_m) dalam satuan GPa dapat dihitung menggunakan **Persamaan 11**. untuk kondisi dimana $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa. Apabila $\sigma_{ci} > 100$ MPa, maka modulus elastisitas dihitung dengan bentuk sederhana dari rumus tersebut menjadi **Persamaan 12**.

$$E_m [\text{GPa}] = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (11)$$

$$E_m [\text{GPa}] = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (12)$$

halmana:

E_m = nilai Elastis Modulus Young [GPa],

D = *Disturbance factor* (0 untuk pengalihan terkendali, hingga 1 untuk peledakan intensif).

2.2 Kriteria Mohr-Coulomb

Kekuatan geser dari massa batuan pada permukaan geser yang diungkapkan oleh kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb perlu pendekatan untuk menentukan sudut geser dalam (ϕ') dan kohesi (c') antara kriteria keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb untuk dapat menganalisis stabilitas suatu lereng. Penentuan parameter sudut geser dalam dan kohesi dapat dilihat pada **Persamaan 13** dan **Persamaan 14** yang merupakan korelasi dan pendefinisian dari grafik hubungan *major principal stresses* dan *minor principal stresses* antara kriteria keruntuhan dari Hoek-brown dan Mohr-Coulomb yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (13)$$

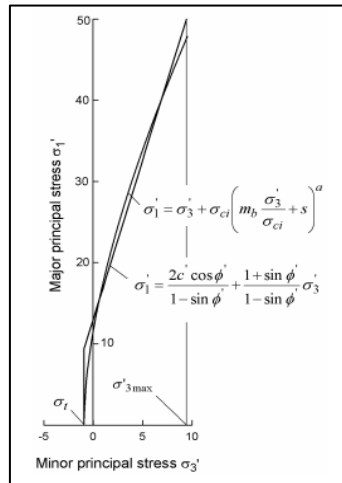
$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1-a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/(1+a)(2+a)}} \quad (14)$$

halmana:

c' = kohesi;

ϕ' = sudut geser [$^\circ$];

σ'_{3n} = $\sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$, halmana σ'_{3max} yaitu batas atas tegangan pembatas.



Gambar 2 Hubungan Major dan Minor Principal Stresses Hoek Brown dan Mohr Coulomb [14]

2.3 Parameter dan Data Pemodelan

Data parameter tanah yang digunakan untuk memperoleh kapasitas daya dukung berdasarkan korelasi nilai SPT. Parameter yang digunakan akan disajikan pada **Tabel 6**. Parameter batuan yang digunakan yaitu nilai berat isi sebesar $26,43 \text{ kN/m}^3$ dan $E_{ref} = 101.790 \text{ kN/m}^2$. Selain itu, parameter batuan lainnya, yaitu σ_{ci} sebesar 34.692 kN/m^2 dan $GSI = 47$; $D = 0,7$; nilai $m_i = 30$. Untuk mendapatkan klasifikasi massa batuan bisa dilakukan dengan hasil pengamatan dari lapangan atau menentukannya dengan *Rock Mass Rating (RMR)*. Pada penelitian ini, untuk mendapatkan nilai *Geological Strength Index (GSI)* didapatkan dari hasil pengamatan di lapangan, pada **Tabel 7** dapat dilihat klasifikasi massa batuan berdasarkan pengamatan langsung di lapangan dari lokasi yang ditinjau.

Tabel 6. Parameter Batuan untuk Kekakuan, RQD dan Kondisi Diskontinuitas

Kedalaman		Kekuatan		RQD		Spasi Diskontinuitas		Kondisi Diskontinuitas			
Dari	Ke	UCS [MPa]	Rating	%	Rating	m	Rating	Persistence [m]	Rating	Aperature [mm]	Rating
10	24	65	7	35	8	0,08	8	8	2	0,2	4
24	35	124	12	40	8	0,09	8	5	2	0,2	4

Tabel 7. Parameter Batuan untuk Kondisi Diskontinuitas dan Keairan

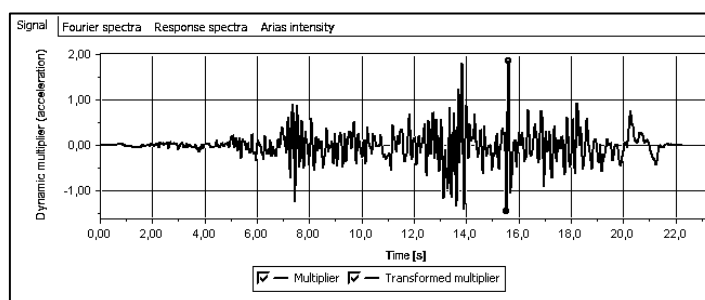
Kedalaman		Kondisi Diskontinuitas						Keairan			RMR
Dari	Ke	Roughness	Rating	Infilling	Rating	Weathered	Rating	Total	Desk	Rating	
10	24	Slightly Rough	3	Hard filling > 5mm	2	Moderately	3	14	Dry	15	52
24	35	Rough	4	Hard filling < 5mm	4	Slightly	5	15	Dry	15	62

Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa nilai RMR yang akan digunakan adalah 52. Selanjutnya jika nilai RMR yang sudah didapatkan, maka dapat menentukan nilai GSI dengan menggunakan **Persamaan 7** kemudian didapatkan hasil dari nilai GSI adalah 47. Untuk nilai konstanta m_i dapat ditentukan berdasarkan jenis batuan yang ada pada lereng yang ditinjau yaitu batuan beku atau *igneous rock* dengan nilai m_i sebesar 30. Sedangkan, nilai kerusakan D untuk lereng batuan adalah 0,7.

Parameter material dalam pemodelan terdiri dari dua model konstitutif, yaitu Hoek–Brown dan Mohr–Coulomb, dengan asumsi batuan andesit. Berat isi jenuh dan tidak jenuh masing-masing

sebesar $26,50 \text{ kN/m}^3$ dan $26,43 \text{ kN/m}^3$; serta modulus elastisitas sebesar $101.730,55 \text{ kN/m}^2$ dan rasio *poisson* 0,2 digunakan pada kedua model. Pada model Hoek–Brown, digunakan parameter $\sigma_{ci} = 34.692,59 \text{ kN/m}^2$; $m_i = 30$; $GSI = 47$; dan $D = 0,7$; sehingga diperoleh $mb = 1,6308$; $s = 0,00046$ dan $\alpha = 0,50704$. Sementara itu; model Mohr–Coulomb menggunakan sudut geser dalam $\phi' = 62,384^\circ$ dan kohesi $c' = 26 \text{ kN/m}^2$. Seluruh parameter ini diinput ke dalam PLAXIS 3D untuk analisis kestabilan lereng.

Selain itu, pada penelitian ini dibutuhkan data gempa untuk dapat diinput ke dalam pemodelan stabilitas lereng. Data gempa ini diperoleh dari web PeerBarkeley.edu dengan menggunakan data gempa dari California, United States of America dengan nilai magnitude sebesar 6,54 (**Gambar 3**).



Gambar 3. Grafik pergerakan tanah (*ground motion*)

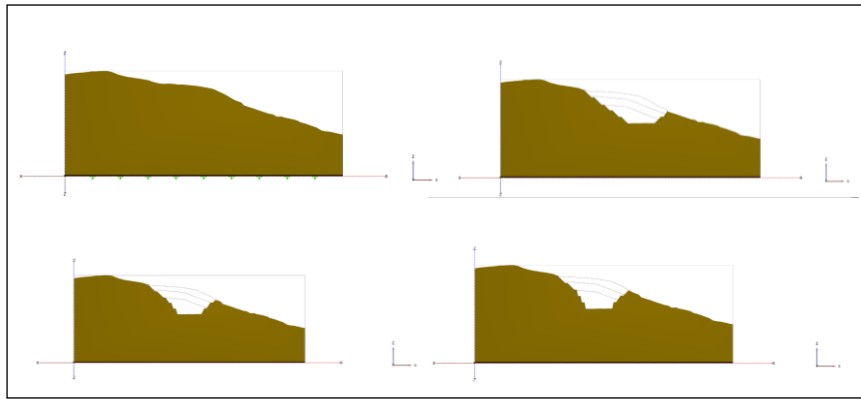
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri lereng batuan dimodelkan dengan tinggi 73 meter dan tiga variasi kemiringan galian, yaitu 1:1, 3:1, dan 5:1, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4**. Analisis dilakukan terhadap enam model lereng batuan, yang terdiri dari tiga model menggunakan *soil* model Hoek–Brown dan tiga model menggunakan Mohr–Coulomb, dengan masing-masing model mewakili satu variasi kemiringan. Pemilihan PLAXIS 3D sebagai alat analisis bertujuan untuk menghasilkan simulasi numerik yang mendekati kondisi lapangan secara aktual. Hasil utama dari analisis ini meliputi nilai faktor keamanan (FK) dan deformasi pada arah horizontal (ux) dan vertikal (uy) untuk kondisi gempa.

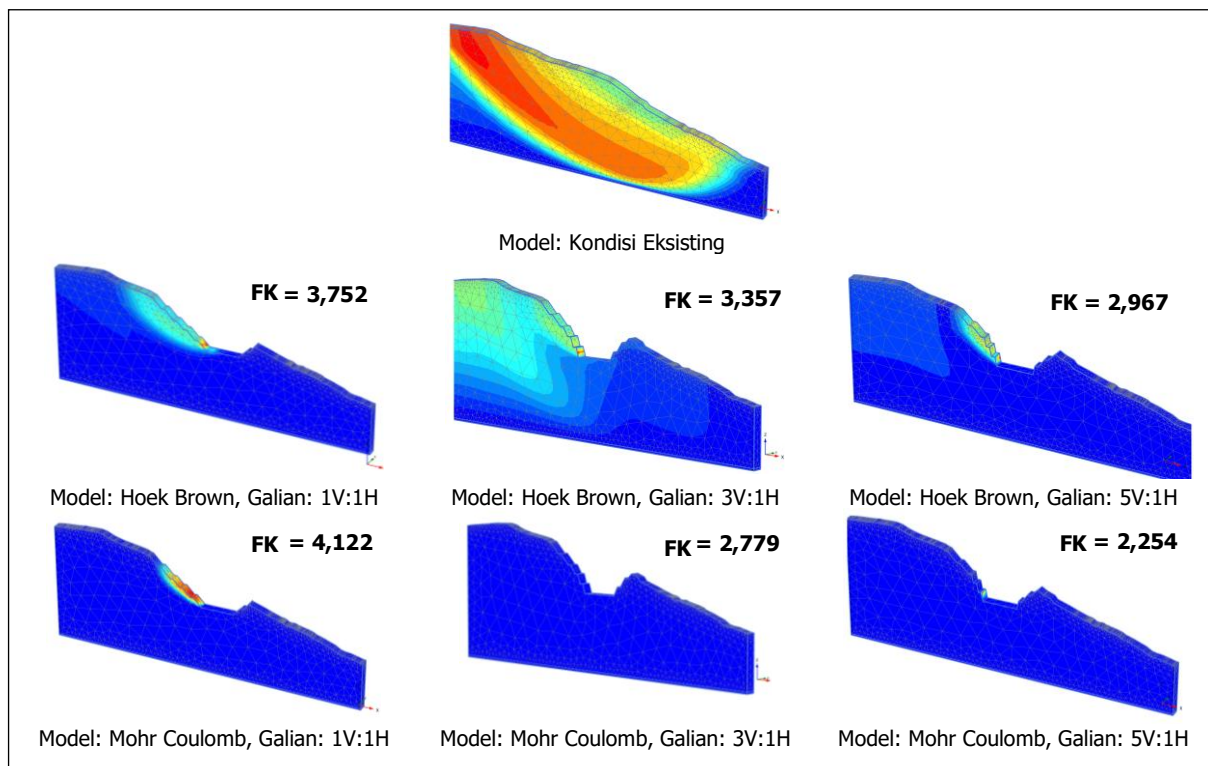
Hasil analisis numerik diperoleh dalam bentuk nilai FK yang disajikan pada **Tabel 8**, sedangkan visualisasi bidang gelincir dapat dilihat pada **Gambar 5**. Pada **Tabel 8** dapat dilihat bahwa nilai FK untuk masing-masing variasi kemiringan lereng adalah sebagai berikut: untuk kemiringan 1:1, nilai FK pada model Mohr–Coulomb sebesar 4,122, sedangkan pada model Hoek–Brown sebesar 3,752; untuk kemiringan 3:1; nilai SF pada model Mohr–Coulomb sebesar 2,779; sedangkan pada model Hoek–Brown sebesar 3,357; dan untuk kemiringan 5:1; nilai FK pada model Mohr–Coulomb sebesar 2,254; sedangkan pada model Hoek–Brown sebesar 2,967.

Berdasarkan rekapitulasi pada **Tabel 8** tersebut, dapat disimpulkan bahwa seluruh hasil pemodelan menunjukkan kondisi lereng yang stabil dan aman. Nilai FK yang diperoleh telah memenuhi kriteria minimum sesuai dengan standar SNI 8460:2017, yaitu $FK > 1,5$. Hal ini berlaku baik untuk model Mohr–Coulomb maupun model Hoek–Brown, terutama pada kondisi eksisting. Namun, untuk kondisi setelah galian, terlihat bahwa masing-masing variasi kemiringan memberikan hasil FK yang berbeda. Secara umum, semakin curam kemiringan lereng, maka nilai FK yang dihasilkan cenderung semakin kecil, sebaliknya semakin landai kemiringan lereng, nilai FK yang diperoleh semakin besar. Pola ini konsisten pada kedua model konstitutif yang digunakan.

Pengaruh Beban Dinamik pada Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Numerik 3 Dimensi Menggunakan Model Hoek-Brown dan Mohr Coulomb



Gambar 4. Pemodelan Geometri Lereng Batuan dengan Kemiringan 1:1, 3:1 dan 5:1



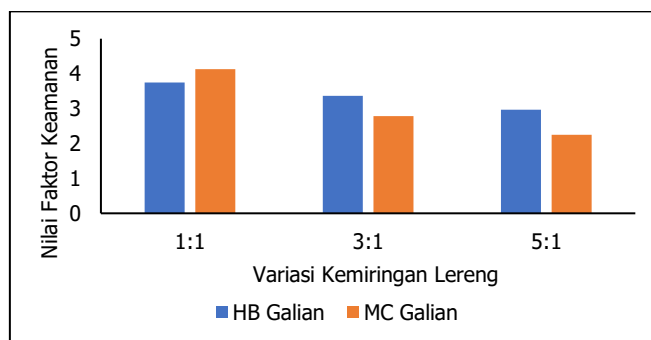
Gambar 5. Hasil Analisis Berupa Bidang Gelincir dan Nilai FK

Tabel 8. Hasil Nilai Faktor Keamanan

No	Kemiringan			Keterangan
	1:1	3:1	5:1	
1	3,752	3,357	2,967	Hoek-Brown Setelah Galian
2	4,122	2,779	2,254	Mohr-Coulomb Setelah Galian
3	9,68	17,22	24,03	Perbedaan SF Galian (%)

Perbandingan antara kedua model menunjukkan bahwa nilai FK hasil pemodelan dengan Mohr–Coulomb cenderung sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan model Hoek–Brown pada kemiringan 1:1, namun sebaliknya pada kemiringan 3:1 dan 5:1, nilai SF dari model Hoek–Brown justru lebih tinggi. Persentase perbedaan terbesar antara kedua model terjadi pada variasi kemiringan 5:1, sedangkan perbedaan terkecil terdapat pada variasi 1:1. Secara keseluruhan, nilai FK yang dihasilkan dari pemodelan baik menggunakan Hoek–Brown maupun Mohr–Coulomb menunjukkan hasil yang dapat diterima dalam praktik rekayasa geoteknik,

sesuai dengan kriteria stabilitas lereng menurut SNI 8460:2017 yang ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Perbandingan hasil analisis FK pada variasi kemiringan tanpa gempa

Sedangkan analisis dengan beban gempa berupa deformasi lateral (u_x) dan deformasi vertikal (u_y) ditunjukkan pada **Tabel 9** dan **Tabel 10**. Berdasarkan ditunjukkan bahwa setelah diberikan beban gempa, nilai deformasi u_x mengalami peningkatan yang cukup signifikan, bahkan mencapai tambahan hingga 30 cm. Sementara itu, deformasi u_y hanya mengalami peningkatan yang relatif kecil, yaitu berkisar antara 3 hingga 7 cm. Pada kondisi galian; deformasi u_x antara model Hoek–Brown dan Mohr–Coulomb memiliki selisih yang kecil; yakni berkisar antara 0,07% hingga 0,28%; menunjukkan korelasi yang cukup baik antara kedua model. Namun; untuk deformasi vertikal (u_y) pada kondisi galian, perbedaan antara kedua model menjadi lebih besar; dengan kisaran antara 1,81% hingga 88,88%; tergantung variasi kemiringan lereng.

Tabel 9. Hasil Nilai Deformasi Horizontal

Kondisi	Model	Kemiringan			Satuan
		1:1	3:1	5:1	
Tanpa Gempa	Hoek-Brown	2,795	3,489	3,680	cm
	Mohr Coulomb	2,797	3,495	3,688	
Dengan Gempa	Hoek-Brown	35,64	33,4	32,46	
	Mohr Coulomb	35,89	35,55	35,03	

Tabel 10. Hasil Nilai Deformasi Vertikal

Kondisi	Model	Kemiringan			Satuan
		1:1	3:1	5:1	
Tanpa Gempa	Hoek-Brown	0,004	0,005	0,019	cm
	Mohr Coulomb	0,004	0,006	0,002	
Dengan Gempa	Hoek-Brown	4,811	3,764	4,136	
	Mohr Coulomb	3,104	7,3	4,584	

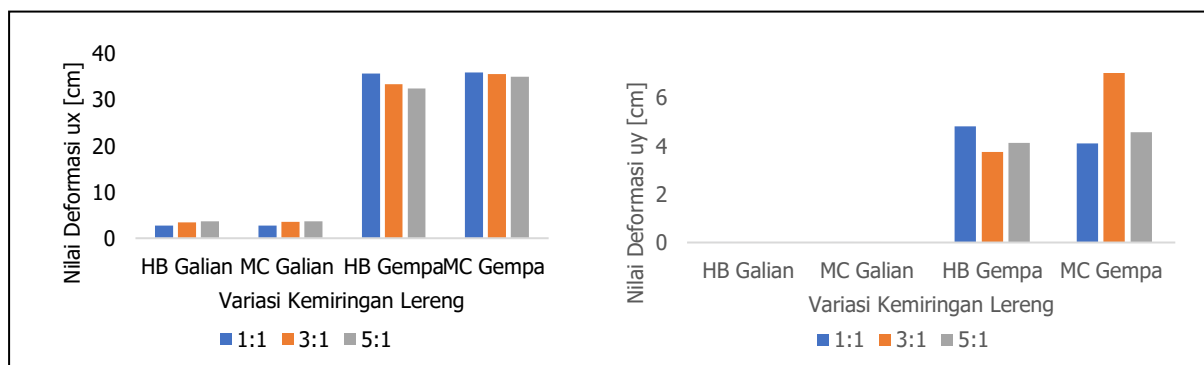
Sementara itu, pada kondisi gempa, perbedaan deformasi u_x antara kedua model berada dalam kisaran 0,701% hingga 7,917%; sedangkan perbedaan deformasi u_y berkisar antara 10,85% hingga 93,94%. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan respons deformasi vertikal antara kedua model jauh lebih signifikan dibandingkan dengan deformasi horizontal, terutama saat pengaruh beban dinamik diperhitungkan. **Gambar 7** menunjukkan perbedaan antara perbandingan nilai deformasi lateral dan vertikal berdasarkan model Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik yang membandingkan model konstitutif Hoek–Brown dan Mohr–Coulomb terhadap variasi kemiringan lereng di bawah pengaruh beban dinamik dengan

magnitudo sebesar 6,54; diperoleh beberapa temuan penting. Pertama, kriteria keruntuhan Hoek–Brown (2002) terbukti dapat digunakan sebagai dasar korelasi terhadap model Mohr–Coulomb dalam pemodelan geoteknik. Kedua; perbandingan nilai faktor keamanan antara kedua model menunjukkan hasil yang relatif serupa; dengan selisih terkecil sebesar 9,68% pada kemiringan 1:1 dan selisih terbesar sebesar 24,03% pada kemiringan 5:1.

Analisis deformasi juga menunjukkan adanya perbedaan antara kedua model. Untuk arah horizontal (u_x); selisih deformasi berkisar antara 0,07% hingga 0,701% pada kemiringan 1:1; antara 0,17% hingga 6,437% pada kemiringan 3:1; serta antara 0,28% hingga 7,917% pada kemiringan 5:1. Hasil ini mengindikasikan bahwa deformasi horizontal antara kedua model masih dapat dikorelasikan secara konsisten. Namun, pada arah vertikal (u_y), perbedaan deformasi jauh lebih signifikan. Pada kemiringan 1:1; selisihnya berada di kisaran 1,81%–35,48%; pada kemiringan 3:1 antara 12,85%–93,94%; dan pada kemiringan 5:1 antara 10,85%–88,88%. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi vertikal antara model Hoek–Brown dan Mohr–Coulomb cenderung tidak seragam. Perbedaan terkecil tercatat pada deformasi horizontal (u_x) kondisi galian dengan kemiringan 1:1 sebesar 0,07%; sedangkan perbedaan terbesar terjadi pada deformasi vertikal (u_y) kondisi gempapada kemiringan 3:1; yakni sebesar 93,94%.



Gambar 7. Perbandingan nilai deformasi lateral dan vertikal

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460-2017:Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [2] Fellenius, W. (1927). Erdstatische Berechnungen (calculation of stability of slopes) (Revised edition, 1939.). Berlin: W. Ernst and Sohn.
- [3] Luc Leroy, M. N., Kenmoe, O. M., Tchognia Nkuissi, H. J., Lawou Kouayep, S., Nkenwoum Chebou, G., Chéagé Chamgoué, A., & Mohamadou, I. (2024). Comparative Analysis of the Slope Stability Using Slide and Plaxis 2D Software: A Case Study of Tombel Pozzolan Quarry (South-West Cameroon). *Applied and Environmental Soil Science*, 2024(1), 8260177.
- [4] Mahmoodzadeh, A., Alanazi, A., Hussein Mohammed, A., Babeker Elhag, A., Alqahtani, A., & Alsubai, S. (2024). An optimized model based on the gene expression programming method to estimate safety factor of rock slopes. *Natural Hazards*, 120(2), 1665-1688.
- [5] Hoek, E., & Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC press.
- [6] Somodi, G., Bar, N., Kovács, L., Arrieta, M., Török, A., & Vásárhelyi, B. (2021). Study of rock mass rating (RMR) and Geological Strength index (GSI) correlations in granite, siltstone, sandstone and quartzite rock masses. *Applied Sciences*, 11(8), 3351.
- [7] Pozo, R. (2021). Equivalent Geological Strength Index (GSI) approach with application to rock mass slope stability. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37(4), 53-70.

- [8] Song, Z., Zhang, J., & Wu, S. (2023). Mohr–Coulomb and Modified Hoek–Brown Strength Criteria of Layered Sandstone Considering the Unloading Effect and Anisotropy. *Sustainability*, 15(19), 14418.
- [9] Wu, D., Chen, X., Tao, Y., & Meng, X. (2023). Estimating Mohr–Coulomb strength parameters from the Hoek–Brown criterion for rock slopes undergoing earthquake. *Sustainability*, 15(6), 5405.
- [10] Hu, S., Li, L., Zou, S., & Huang, D. (2023). Strength reduction strategy for rock slope stability using the variation principle based on the Hoek–Brown failure criterion. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8), 297.
- [11] Pratiwi, D. S., Yakin, Y. A., & Mahaputra, A. (2022). Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Kriteria Keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr Coulomb Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 4(2), 74-81.
- [12] Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. London: The Institution of Mining and Metallurgy.
- [13] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- [14] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, (pp. 267-273).
- [15] Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York, NY, USA: Wiley.
- [16] Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Rotterdam: AA Balkema
- [17] Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.
- [18] Zhang, Q., Huang, X., Zhu, H., & Li, J. (2019). Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 73-81.
- [19] Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech Eng Geol*, 1(1), 16-22.
- [20] Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 13, 135-148.
- [21] Bieniawski, Z. T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *roceedings of the 4th International Congress on Rock*.