

## **Analisis Kestabilan Lereng Berdasarkan Mohr-Coulomb dan *Generalized* Hoek-Brown pada Tambang Terbuka Batubara, Desa Tegalrejo dan sekitarnya, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan**

**Faiza Melati Siswanda<sup>\*1)</sup>, Herry Riswandi<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

<sup>\*</sup>Siswanda.faizamelati@gmail.com

**Abstrak** – Pemilihan penggunaan kriteria keruntuhan yang tepat dalam analisis kestabilan lereng dapat mengurangi ketidaktepatan hasil analisis dalam memperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) dari desain lereng yang dibuat, sehingga dibutuhkan dasar dalam pemilihan penggunaan kriteria keruntuhan yang tepat. *Limit Equilibrium Methods* (LEM) dan *Morgenstren-Price* merupakan metode yang digunakan dalam analisis ini. Klasifikasi massa batuan yang digunakan yaitu *Rock Mass Rating* (RMR) dan dari hasil analisisnya tergolong sedang hingga baik. Hasil perbandingan kriteria keruntuhan *Generalized* Hoek-Brown dengan maupun tanpa *damage region* menunjukkan nilai FK yang lebih kecil dibandingkan pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Nilai FK pada Mohr-Coulomb berkisar dari 1,463-1,830 sedangkan nilai FK pada *Generalized* Hoek-Brown tanpa *damage region* sebesar 1,024-1,438 nilai FK pada *Generalized* Hoek-Brown dengan *damage region* sebesar 1,110-1,875. Hasil nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) menunjukkan nilai yang sama yaitu 0%. Nilai FK *Generalized* Hoek-Brown dengan maupun tanpa *damage region* yang lebih kecil dibandingkan Mohr-Coulomb dipengaruhi oleh variabel pada litologi seperti struktur dan kondisi bidang diskontinuitas serta nilai *disturbance factor* (*D*) sebagai dampak dari aktivitas penggalian dan peledakan yang mereduksi nilai FK sehingga lebih memvisualisasi kondisi aktual di lapangan sedangkan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb tidak dipengaruhi oleh kondisi tersebut dan secara sederhana hanya melibatkan nilai *material properties* dari batuan itu sendiri.

**Kata Kunci:** *Generalized* Hoek-Brown, kestabilan lereng, klasifikasi massa batuan, Mohr-Coulomb, Muara Enim

**Abstract** – Determining the appropriate use of failure criteria in slope stability analysis can reduce the inaccuracy of analysis results in obtaining the Safety Factor (SF) value from the slope design created so that a basis is needed for determining the appropriate use of failure criteria. *Limit Equilibrium Methods* (LEM) and *Morgenstren-Price* are the methods used in this analysis. The rock mass classification used is *Rock Mass Rating* (RMR) and the analysis results are classified as moderate to good. The comparison result of the *Generalized* Hoek-Brown failure criteria with and without *damage region* show a smaller SF value compared to the Mohr-Coulomb failure criteria. The SF value on Mohr-Coulomb ranges from 1,463-1,830 while the SF value on *Generalized* Hoek-Brown without *damage region* is 1,024-1,438 and the SF value on *Generalized* Hoek-Brown with *damage region* is 1,110-1,875. The results of the Probability of Failure (PoF) value show the same value 0%. The SF value of *Generalized* Hoek-Brown with and without *damage region* is smaller than the Mohr-Coloumb are influenced by variables in lithology such as the structure and condition of discontinuity as well as the *disturbance factor* (*D*) value as the impact of excavation and blasting activities which reduces the SF value and it can better visualizes the actual conditions in the field. Meanwhile, the Mohr-Columb failure criteria are not influenced by those conditions and simply involve the value of the *material properties* of the rock itself.

**Keywords:** *Generalized* Hoek-Brown, safety factor, rock mass rating, Mohr-Coulomb, Muara Enim

### **PENDAHULUAN**

#### **Latar Belakang**

Daerah penelitian berada di PIT X, Desa Tegalrejo, Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. Secara fisiografis, daerah penelitian ini termasuk ke dalam cekungan Sumatra Selatan dengan formasi Muara Enim yang merupakan formasi pembawa lapisan batubara (Irwansyah dkk, 2016).

Batubara banyak dieksploitasi melalui penambangan tambang terbuka. Pada setiap pembukaan area tambang terbuka dibuat lereng-lereng guna mendapatkan sumber daya yang akan dieksploitasi. Kajian terhadap stabilitas lereng selalu dilakukan karena faktor geometri lereng, karakteristik fisik dan mekanik material penyusun lereng, kondisi air tanah,

kondisi struktur bidang lemah dan getaran dari hasil aktivitas penambangan itu sendiri mampu mengganggu stabilitas lereng (Wardani dkk, 2019).

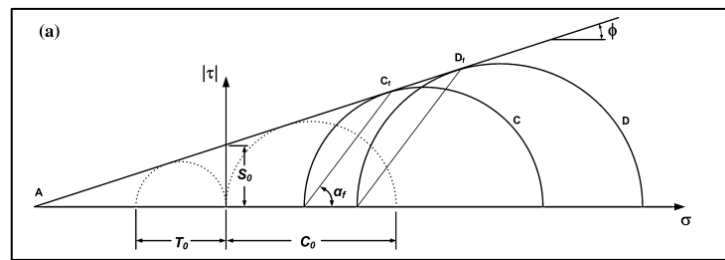
Pemilihan penggunaan kriteria keruntuhan yang tepat dalam analisis kestabilan lereng dapat mengurangi kesalahan analisis dalam memperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) dari desain lereng yang dibuat. Selain itu analisis ini juga dilakukan guna menunjang keselamatan kerja serta mampu meningkatkan produktivitas pertambangan. Hal tersebut yang mendasari peneliti perlu melakukan kajian detail terkait kriteria keruntuhan yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng di daerah penelitian. Parameter kriteria keruntuhan diperoleh dari hasil pengukuran dan perhitungan kualitas massa batuan dengan menggunakan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) dan *Geological Strength Index* (GSI) pada kriteria keruntuhan *Generalized* Hoek-Brown dan pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb digunakan data dari hasil pengujian di laboratorium berupa *Unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam

**Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb**

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb biasanya digunakan dalam analisis keruntuhan material lepas dengan pengujian *triaxial*. Kriteria Coulomb, 1773 dalam Labuz, 2012 merupakan kriteria linier yang menunjukkan bahwa tegangan geser ( $\tau$ ) bergantung pada tegangan normal ( $\sigma$ ) yang merupakan kekuatan geser dalam material. Persamaan dari pengukuran kuat geser sebagai berikut.

$$\tau = c' + \sigma \tan \Phi \dots\dots\dots (1)$$

dengan  $\tau$  adalah tegangan geser (N/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  adalah tegangan normal (N/m<sup>2</sup>),  $c'$  adalah kohesi (MPa), dan  $\Phi$  adalah sudut geser dalam (°).



Gambar 1. Kriteria Mohr-Coulomb (Labuz, 2012)

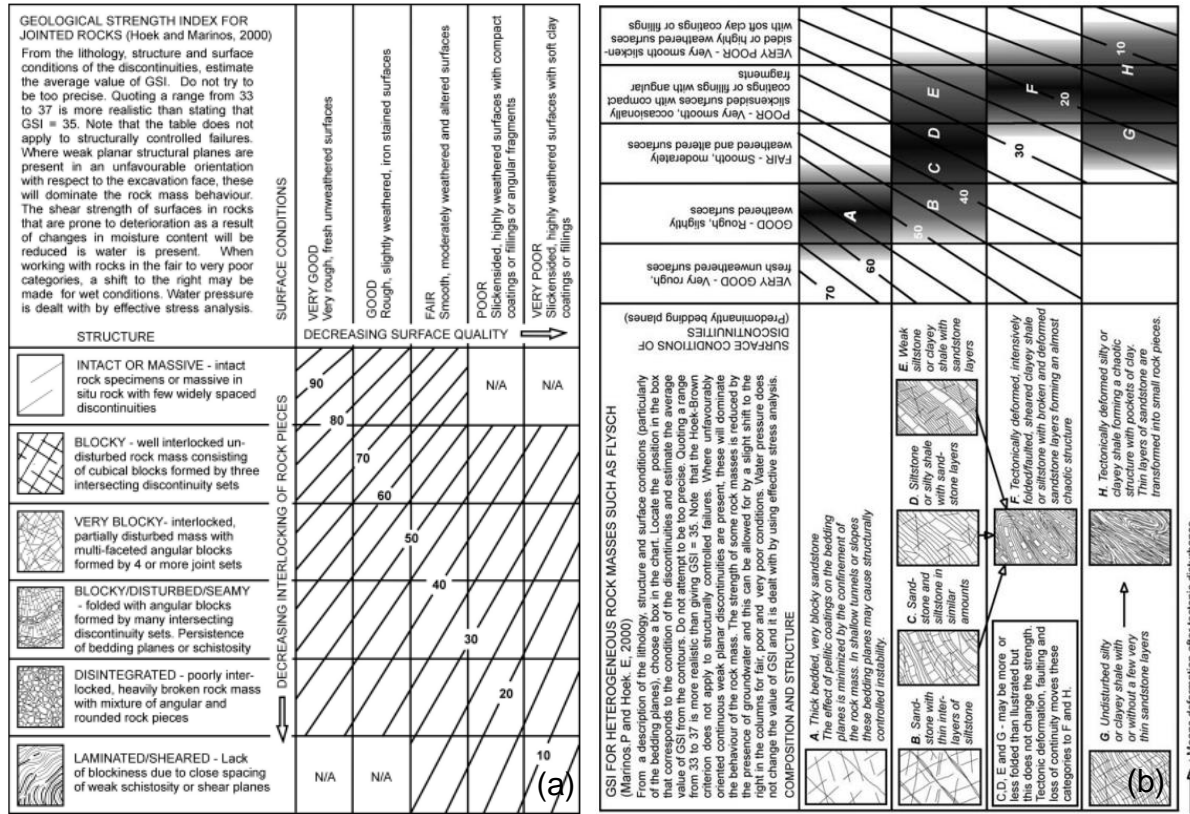
**Kriteria Keruntuhan Generalized Hoek and Brown**

Kriteria keruntuhan *Generalized* Hoek dan Brown, 1980 dalam Horne, 2002 biasanya digunakan dalam analisis keruntuhan untuk mengetahui kekuatan massa batuan yang terkekarkan. Selanjutnya klasifikasi ini dimodifikasi dalam pengembangannya. Hoek mengembangkan klasifikasi baru pada tahun 1994, berupa klasifikasi *Geological Strength Index* (GSI).

*Geological Strength Index* (GSI) merupakan nilai massa batuan dengan melihat kondisi permukaan lereng secara aktual di lapangan berdasarkan struktur dan kondisi permukaan struktur. Perhitungan Nilai GSI dapat juga diperoleh dari nilai RMR yang diperoleh dari klasifikasi massa batuan menurut Bieniawski tahun 1989, dengan persamaan sebagai berikut:

$$GSI = RMR - 5 \dots\dots\dots (2)$$

dengan GSI adalah *Geological Strength Index* dan RMR adalah nilai *Rock Mass Rating*



**Gambar 2.** (a) Klasifikasi nilai GSI (Marinos dkk, 2005); (b) Estimasi nilai GSI untuk massa batuan yang heterogen (Marinos dkk, 2005)

Selanjutnya, pengembangan *Generalize Hoek-Brown Criterion dengan persamaan berikut (Pratiwi dkk, 2022).*

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \dots \dots \dots (3)$$

Dengan  $\sigma_1'$  dan  $\sigma_3'$  adalah nilai tegangan efektif maksimal dan minimal saat batuan mengalami keruntuhan (N/m<sup>2</sup>),  $\sigma_{ci}$  adalah nilai kuat tekan massa batuan (N/m<sup>2</sup>),  $m_b$ ,  $s$  dan  $a$  adalah nilai konstanta untuk massa batuan

Patameter nilai  $m_b$ ,  $s$  dan  $a$  diperoleh dari persamaan dengan memperhatikan nilai  $m_i$  yang merupakan konstanta untuk material batuan utuh dan nilai  $D$  yaitu faktor gangguan yang tergantung pada tingkat gangguan ke massa batuan yang telah dilakukan peledakan dan pengenduran tegangan.

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad \dots \dots \dots (4)$$






$$S = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

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

**Tabel 1.** Nilai konstanta mi batuan utuh (Hoek, 1997)

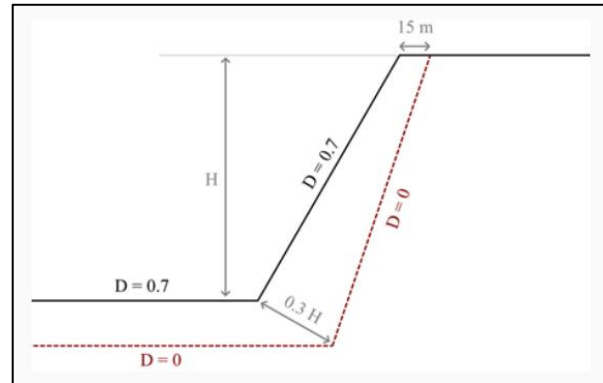
Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19 — Greywacke (18)	Siltstone 9	Claystone 4
		Organic		Chalk 7 — Coal (8-21)		
	Non-Clastic	Carbonate	Breccia (20)	Spartic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
		Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 25 - 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists 4 - 8	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
		Gabbro 27 Norite 22	Dolerite (19)	Basalt (17)		
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

**Tabel 2.** Nilai faktor kerusakan (D) (Hoek dkk, 2002)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of <i>D</i>
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	<i>D</i> = 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.	<i>D</i> = 0 <i>D</i> = 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.	<i>D</i> = 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.	<i>D</i> = 0.7 Good blasting <i>D</i> = 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.	<i>D</i> = 1.0 Production blasting <i>D</i> = 0.7 Mechanical excavation

### Damage Region

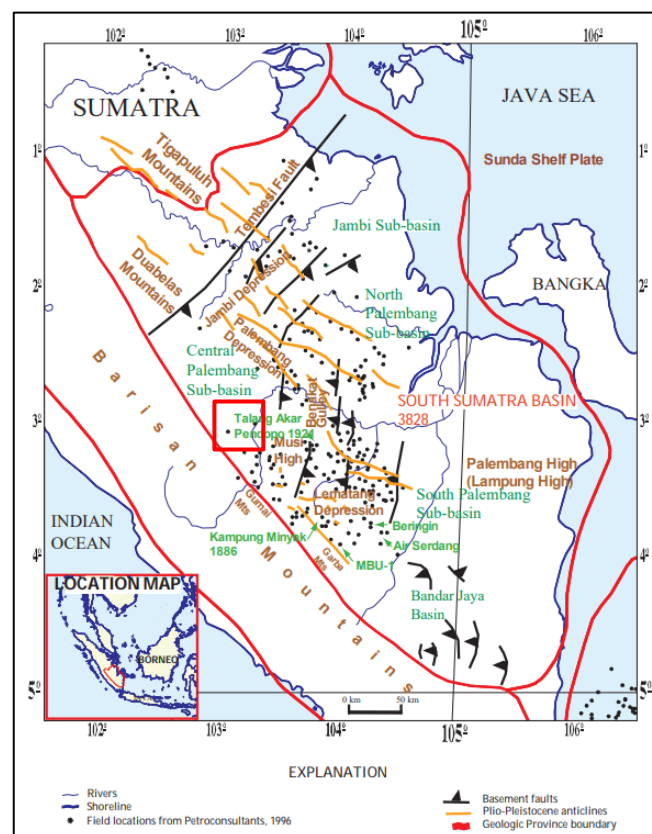
Damage Region atau area terdampak merupakan area dimana batuan di sekitar permukaan area penggalian atau peledakan memiliki nilai *disturbance factor* ( $D$ ) yang mampu mempengaruhi nilai *material properties*. Dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* diperlukan pembagian wilayah yang terdampak dan area yang tidak terdampak aktivitas penggalian maupun peledakan dengan ketentuan sebagai berikut.



Gambar 3. Ketentuan pembagian damage region ([bit.ly/rockscience-DR](http://bit.ly/rockscience-DR), 2024)

### Geologi Regional

Secara fisiografis, daerah penelitian ini termasuk ke dalam Formasi Muara Enim yang terletak di cekungan Sumatra Selatan. Cekungan Sumatra Selatan terbentuk dari hasil penurunan (*depression*) yang dikelilingi oleh tinggian-tinggian batuan Pra-Tersier, berupa tinggian Tigapuluh di sebelah Barat Laut yang membatasi antara cekungan Sumatra Selatan dengan cekungan Sumatra Tengah, tinggian Musi di Barat Daya, dan tinggian Lampung di Tenggara (Barber et al, 2005 dalam Algadri Nafian & Rizal, 2021). Stratigrafi cekungan Sumatra selatan tersusun oleh basement, Formasi Lahat, Formasi Talang Akar, Formasi Baturaja, Formasi Gumai, Formasi Air Benakat, Formasi Muara Enim, dan Formasi Kasai. (Bishop, 2001).



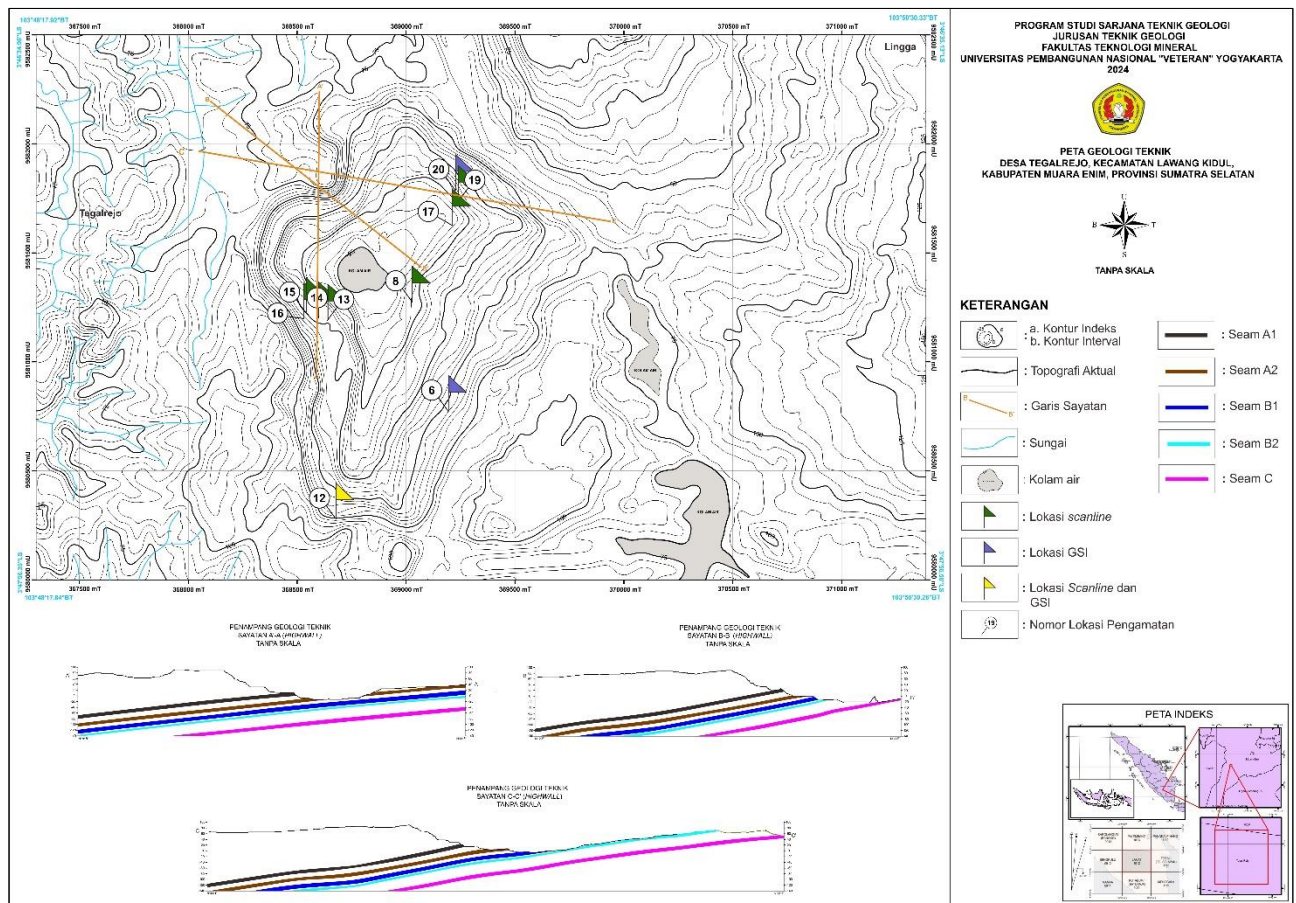
Gambar 4. Stratigrafi cekungan Sumatra Selatan (Bishop, 2001)

## METODE

Metode yang digunakan yaitu metode studi pustaka, deskriptif dan analitik. Metode deskriptif dilakukan dengan melakukan pengamatan secara langsung terhadap kondisi permukaan bidang diskontinuitas dan jenis litologi penyusun lereng serta melakukan pengukuran terhadap bidang diskontinuitas menggunakan metode *scanline* hingga memperoleh data untuk dilakukan analisis dengan metode analitik. Metode analitik merupakan metode yang digunakan dalam pengolahan data baik menggunakan *software* seperti *excel* dan *geostudio* maupun dengan analisis di laboratorium.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Pemetaan Geologi Teknik



Gambar 5. Peta geologi teknik daerah penelitian

Terdapat 8 (delapan) lapisan batuan yang dilakukan pembobotan massa batuan dengan metode *scanline*. Pembobotan massa batuan ini dilakukan dengan mengukur setiap bidang diskontinuitas yang melintasi lintasan *scanline* dan dianalisis kondisi bidang diskontinuitasnya. Hasil pengukuran dan perhitungannya terlampir pada Tabel 1. maka dapat dilakukan klasifikasi RQD dan klasifikasi RMR berdasarkan Bineawski, 1989. Nilai GSI diperoleh dari hasil perhitungan nilai dari RMR-5. Namun pada beberapa litologi seperti batulempung dan batulanau dengan unit IB A2-B1, IB B1-B2 dan UB C dilakukan *scoring* langsung di lapangan dengan diagram GSI. *Scoring* dilakukan karena bidang diskontinuitas yang ditemukan berupa bidang perlapisan dan laminasi dan *scoring* dilakukan dengan diagram yang berbeda, bergantung dari kondisi singkapan yang homogen atau heterogen.

**Tabel 3.** Hasil perhitungan nilai RQD dan RMR

No	Unit	Litologi	RQD	Klasifikasi RQD (Bineawski, 1989)	RMR	Klasifikasi RMR (Bineawski, 1989)	GSI
1	OB A1	Batulempung	79.5219	Baik	57.45	Sedang	52
2	Seam A1	Batubara	25.0966	Jelek	52.86	Sedang	48
3	IB A1-A2	Batupasir Tuffan	73.7959	Sedang	62.84	Baik	58
4	Seam A2	Batubara	34.5	Jelek	56.54	Sedang	52
5	IB A2-B1	Batulempung	-	-	-	-	77
6	Seam B1	Batubara	71.88	Jelek	54.68	Sedang	50
7	IB B1-B2	Batulempung	-	-	-	-	25
8	Seam B2	Batubara	29.6206	Jelek	55.58	Sedang	51
19	IB B2-C	Batupasir	98.851	Sangat baik	71.75	Baik	68
10	Seam C	Batubara	62.2578	Sedang	60.54	Sedang	56
11	UB C	Batulanau	-	-	-	-	35

### Masukan Data Generalized Hoek-Brown

Data yang digunakan sebagai parameter *Generalized Hoek-Brown* berupa data *unit weight*, kuat tekan (UCS), GSI, konstanta *mi* dan *D* (*disturbance factor*). Nilai *unit weight* dan kuat tekan (UCS) diperoleh sebagai data sekunder dari perusahaan hasil pengujian sifat fisik, *triaxial* dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS). Nilai konstanta *mi* dan *D* diperoleh dari tabel Hoek, 2002.

**Tabel 2.** Masukan data analisis kestabilan lereng menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown*

No	Unit	Litologi	$\gamma$ Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	UCS (mpa)	GSI	<i>mi</i>	<i>D</i>
1	OB A1	Batulempung	20	2191.35	52	4	0.7
2	Seam A1	Batubara	13.33	8680.63	48	8	0.7
3	IB A1-A2	Batupasir Tuffan	19.39	3436.08	58	19	0.7
4	Seam A2	Batubara	12.16	9744.86	52	8	0.7
5	IB A2-B1	Batulempung	19.79	2068.61	77	4	0.7
6	Seam B1	Batubara	12.18	7352.9	50	8	0.7
7	IB B1-B2	Batulempung	20.83	409.31	25	4	0.7
8	Seam B2	Batubara	13.05	7239.58	51	8	0.7
19	IB B2-C	Batupasir	20.82	1881.19	68	19	0.7
10	Seam C	Batubara	12.03	6090.6	56	8	0.7
11	UB C	Batulanau	21.39	2560.17	35	9	0.7

### Masukan Data Mohr-Coulomb

Data yang digunakan sebagai parameter Mohr-Coulomb berupa data *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam sebagai data sekunder dari perusahaan hasil pengujian sifat fisik dan *triaxial*.

**Tabel 3.** Masukan data analisis kestabilan lereng menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

No	Unit	Litologi	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Kohesi (mpa)	Sudut Geser Dalam (°)
1	OB A1	Batulempung	20	98.2	22.39
2	Seam A1	Batubara	13.33	120.52	29.64
3	IB A1-A2	Batupasir Tuffan	19.39	113.56	21.95
4	Seam A2	Batubara	12.16	209.08	25.68
5	IB A2-B1	Batulempung	19.79	116.97	20.26
6	Seam B1	Batubara	12.18	145.78	23.1
7	IB B1-B2	Batulempung	20.83	147.4	24
8	Seam B2	Batubara	13.05	210.41	23.94
19	IB B2-C	Batupasir	20.82	103	23.67
10	Seam C	Batubara	12.03	158.24	23.78
11	UB C	Batulanau	21.39	120.97	25.6

### Data Probabilitas Kelongsoran

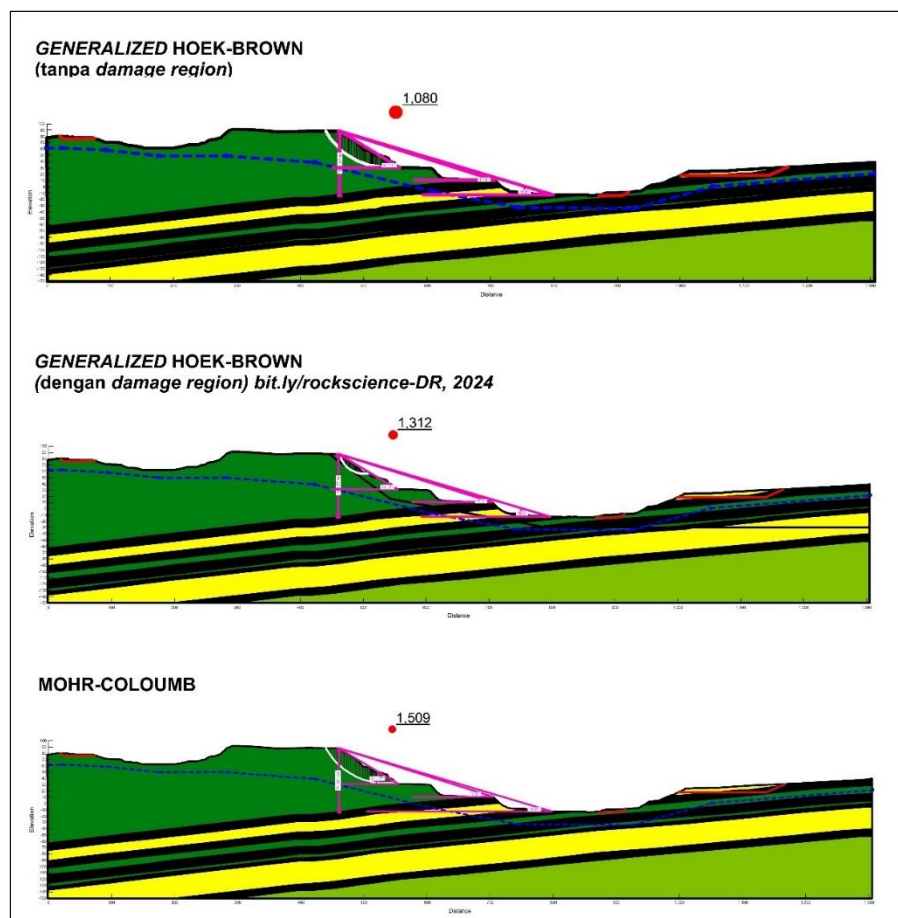
Data Probabilitas Kelongsoran (PK) yang digunakan sebagai parameter Mohr-Coulomb berupa data *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam sedangkan data Probabilitas Kelongsoran (PK) yang digunakan sebagai parameter Mohr-Coulomb berupa data *unit weight*. Distribusi yang digunakan yaitu distribusi normal.

**Tabel 4.** Data Probabilitas Kelongsoran (PK)

No	Unit	Litologi	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )		Susut geser dalam (derajat)		Kohesi (mpa)	
			Standar Deviasi	Offset mean	Standar Deviasi	Offset mean	Standar Deviasi	Offset mean
1	OB A1	Batulempung	0.2	0	2.1	-3.8	25	50
2	Seam A1	Batubara	0.2	0	2.9	0.2	11.175	12
3	IB A1-A2	Batupasir Tuffan	0.2	0	2.3	-3	28	62
4	Seam A2	Batubara	0.2	0	0.7	0	10	-6
5	IB A2-B1	Batulempung	0.2	0	3	2	16.4	1
6	Seam B1	Batubara	0.2	0	1.8	-2.5	15.8	7
7	IB B1-B2	Batulempung	0.2	0	1.9	-2.3	14.2	9
8	Seam B2	Batubara	0.2	0	1.4	-1.5	21	-7
19	IB B2-C	Batupasir	0.2	0	2.2	-4	18.5	13
10	Seam C	Batubara	0.2	0	1.8	-3	14	3
11	UB C	Batulanau	0.2	0	1.3	-1.7	14	22

### Analisis Kestabilan Lereng

- Section A'-A *Inter-ramp*



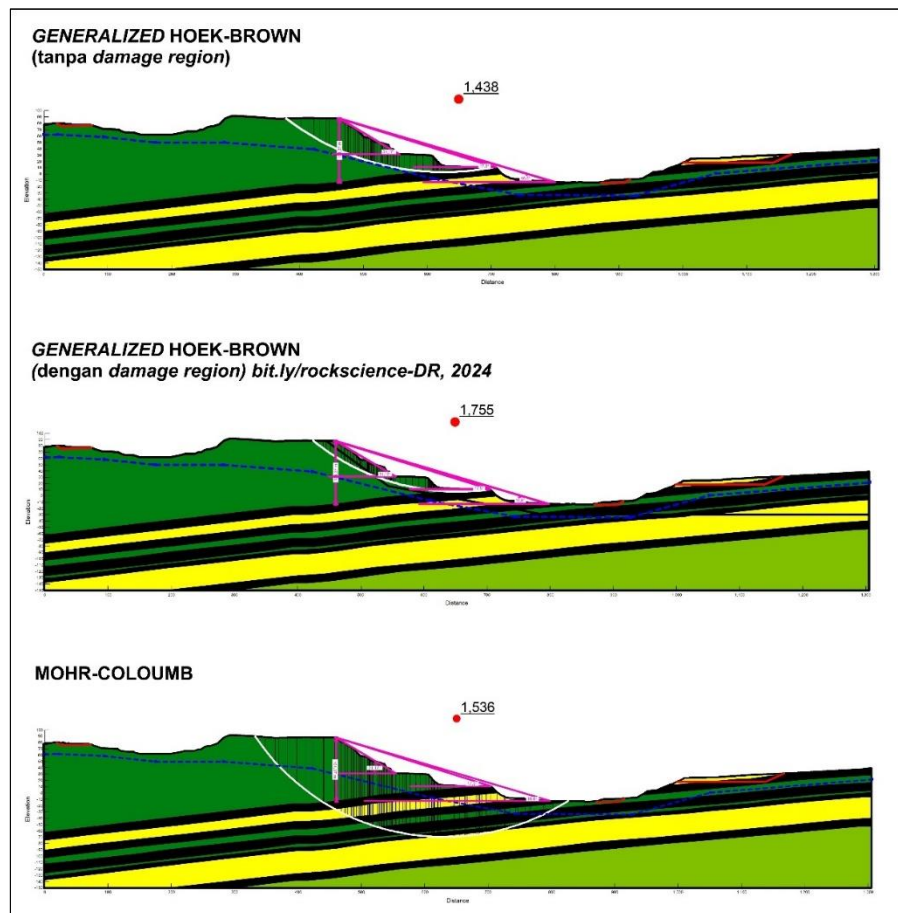
**Gambar 6.** Hasil analisis section A'-A *inter-ramp*

*Section A'-A inter-ramp area overburden* yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta  $m_i$ ,  $D$  dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,080 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,312 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. *Section A'-A* pada *inter-ramp area overburden* yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,509 yang termasuk



kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018.

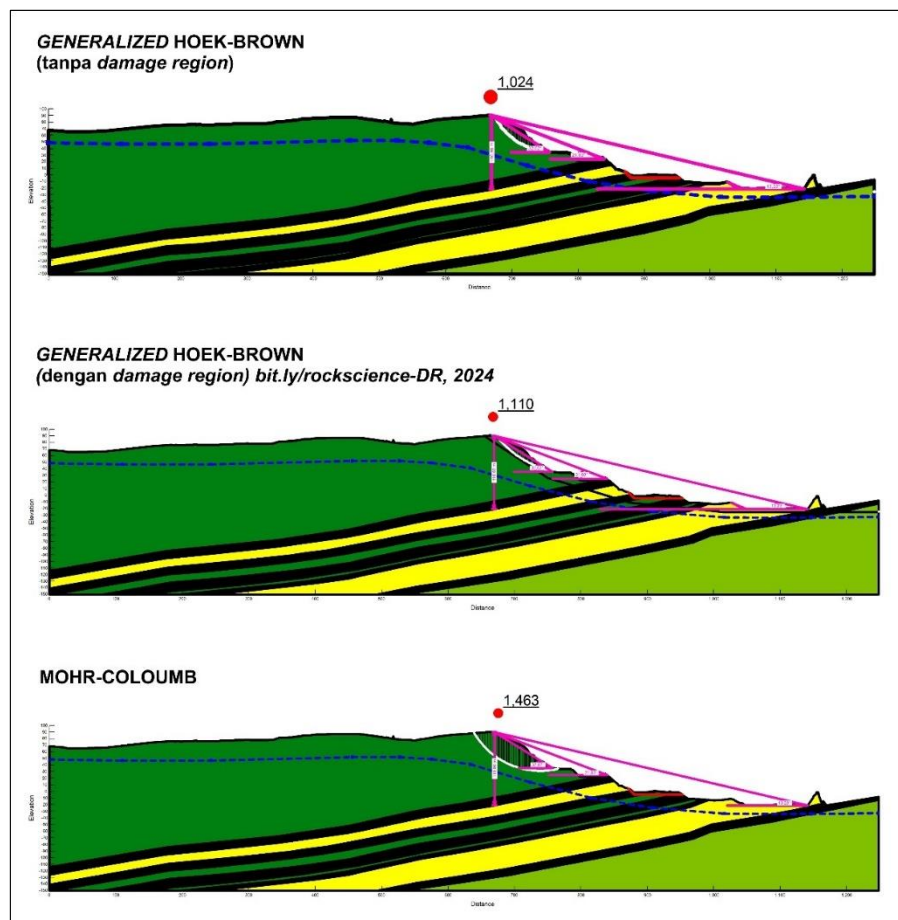
- **Section A'-A overall**



**Gambar 7.** Hasil analisis section A'-A overall

Section A'-A pada overall slope yang memiliki litologi batulempung, batupasir dan batubara yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta *mi*, *D* dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,438 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,755 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Section A'-A pada overall slope yang memiliki litologi batulempung, batubara, dan batupasir yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,536 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018.

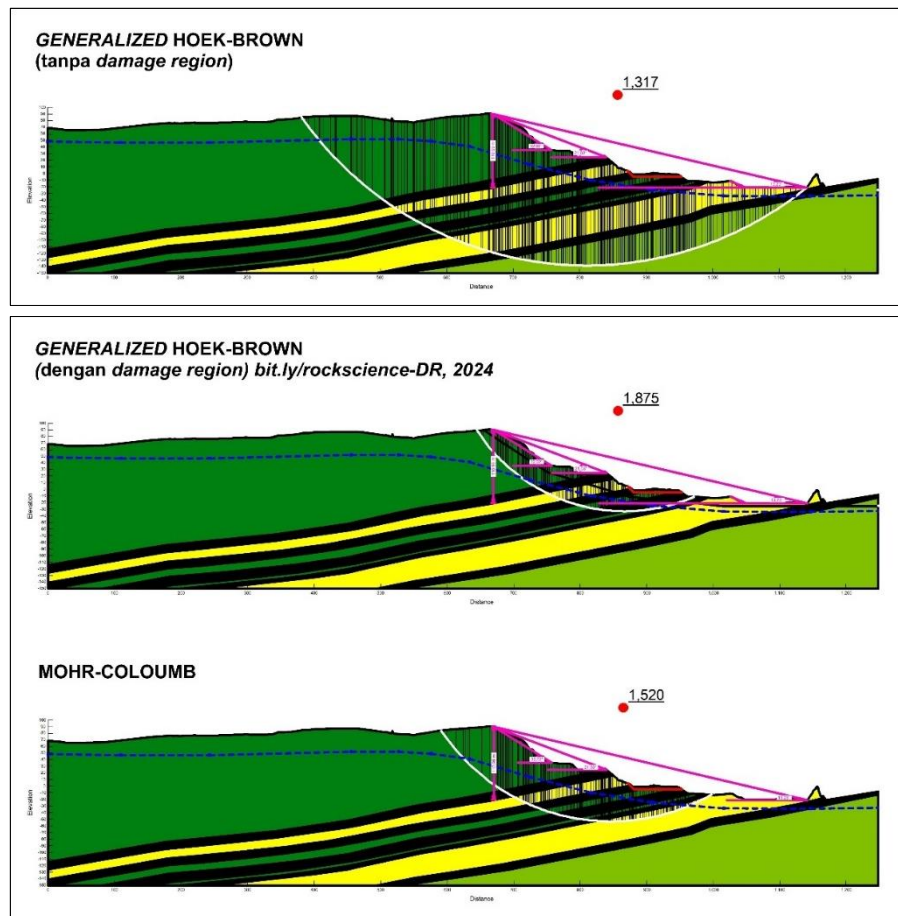
- **Section B-B' inter-ramp**



**Gambar 8.** Hasil analisis *section B-B' inter-ramp*

*Section B-B'* pada *inter-ramp* area *overburden* yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta *m<sub>i</sub>*, *D* dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,024 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,110 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. *Section B-B'* pada *inter-ramp* area *overburden* yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,463 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018.

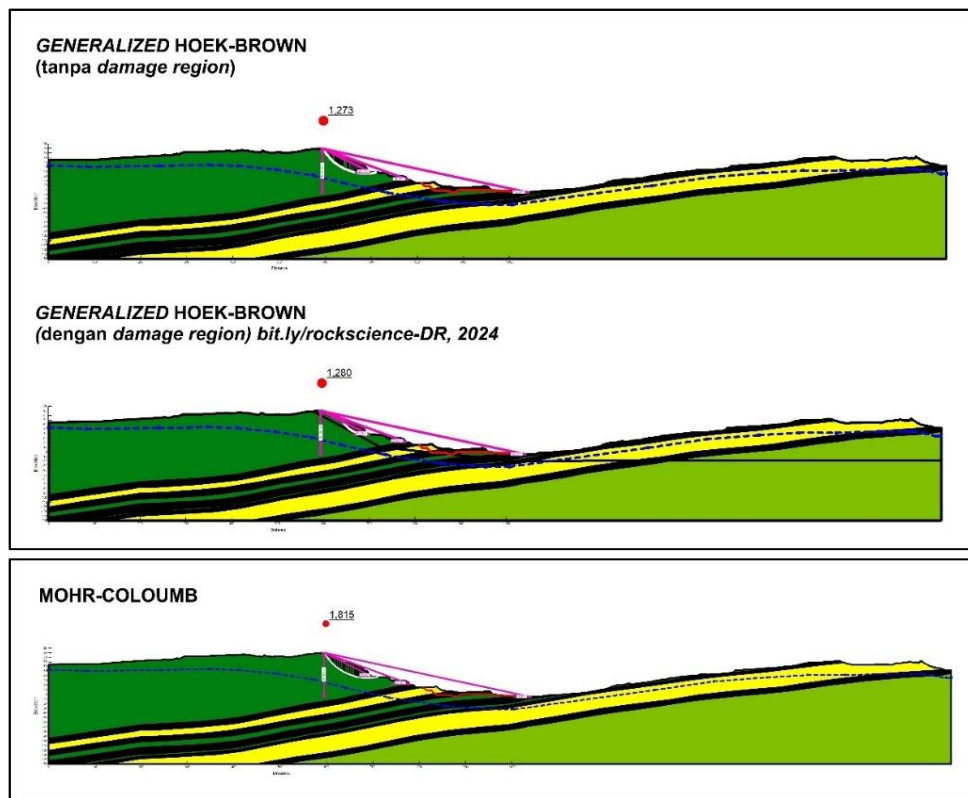
- **Section B-B' overall**



**Gambar 9.** Hasil analisis section B-B' overall

Section B-B' pada overall slope yang memiliki litologi batulempung, batupasir dan batubara yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta  $m_i$ ,  $D$  dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,317 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,875 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Section B-B' pada overall slope yang memiliki litologi batulempung, batubara, dan batupasir yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,520 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018.

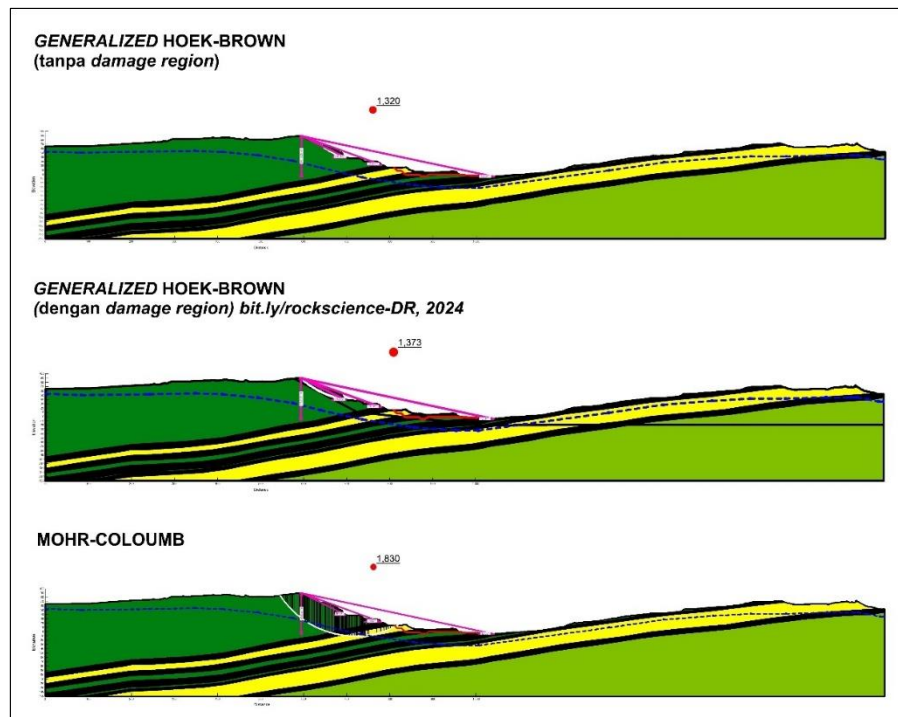
- **Section C-C' inter-ramp**



**Gambar 10.** Hasil analisis section C-C' inter-ramp

Section C-C' pada inter-ramp area overburden yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta *m<sub>i</sub>*, *D* dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,273 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,280 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Section C-C' pada inter-ramp area overburden yang memiliki litologi batulempung yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,815 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018.

- **Section C-C' overall**



**Gambar 11.** Hasil analisis *section C-C' overall*

*Section C-C'* pada *overall slope* yang memiliki litologi batulempung, batupasir dan batubara yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* dengan menggunakan parameter *unit weight*, kuat tekan (UCS), konstanta *mi*, *D* dan nilai GSI dari hasil lapangan dengan pengukuran pengamatan kondisi bidang diskontinuitas diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,320 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. Kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,373 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% menurut KEPMEN 1827K/30/MEM/2018. *Section C-C'* pada *overall slope* yang memiliki litologi batulempung, batubara, dan batupasir yang dianalisis menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dengan menggunakan parameter *unit weight*, kohesi dan sudut geser dalam diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yaitu 1,830 yang termasuk kategori aman dengan nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) 0% KEPMEN1827K/30/MEM/2018.

#### **Perbandingan Kriteria Keruntuhan dan Interpretasi**

Perbandingan dilakukan terhadap kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* maupun tanpa *damage region*. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan geometri lereng yang sama terhadap tiga kondisi lereng yang berbeda yaitu sayatan A'-A, B-B' dan C-C'. Selain itu, perbandingan juga dilakukan dengan menggunakan parameter sifat fisik yang sama yaitu nilai *unit weight*. Nilai *seismic load* yang digunakan juga sama yaitu 0,05 dan data probabilitas *unit weight* yang sama serta kondisi MAT yang sama yaitu pada kedalaman rata-rata 10,91 meter dari permukaan.

Parameter yang digunakan dalam input pengolahan dalam memperoleh nilai FK dan PK yang berbeda yaitu berasal dari parameter sifat mekanik serta adanya pengaruh kondisi bidang diskontinuitas, dimana pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb menggunakan parameter kohesi dan sudut geser dalam sedangkan pada kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* menggunakan parameter kuat tekan (UCS), nilai konstanta *mi* yang merupakan konstanta dari nilai *intact rock* dan *D* (*Disturbance factor*) sebagai nilai akibat gangguan proses peledakan dan penggalian serta nilai GSI yang diperoleh dari hasil pengukuran orientasi bidang diskontinuitas dan kondisinya yang dibobotkan menggunakan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR). Data probabilitas kohesi dan sudut geser dalam hanya di input pada kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.

**Tabel 5.** Hasil nilai FK dan PK dari analisis perbandingan penggunaan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan *Generalized Hoek-Brown*

No	Sayatan	Lereng	Mohr-Coloumb (KEPMEN 1827K/30/MEM/2018)			<i>Generalized Hoek-Brown</i> tanpa <i>damage region</i> (KEPMEN 1827K/30/MEM/2018)			<i>Generalized Hoek-Brown</i> dengan <i>damage region</i> (KEPMEN 1827K/30/MEM/2018)		
			FK	PK	Kategori	FK	PK	Kategori	FK	PK	Kategori
1	A'-A	Inter-Ramp	1,509	0	Aman	1,080	0	Aman	1,312	0	Aman
2		Overall	1,536	0		1,438	0		1,755	0	
3	B-B'	Inter-Ramp	1,463	0		1,024	0		1,110	0	
4		Overall	1,520	0		1,317	0		1,875	0	
5	C-C'	Inter-Ramp	1,815	0		1,273	0		1,280	0	
6		Overall	1,830	0		1,320	0		1,373	0	

Hasil perbandingan yang dilakukan terhadap kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan *Generalized Hoek-Brown* dengan menggunakan *software* Geostudio dengan beberapa parameter yang sama dan berbeda diperoleh kesimpulan bahwa ketika menggunakan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan maupun tanpa *damage region* menunjukkan nilai FK yang lebih kecil dibandingkan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Nilai FK pada Mohr-Coulomb berkisar dari 1,463-1,830 sedangkan nilai FK pada *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* sebesar 1,024-1,438 nilai FK pada *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* sebesar 1,110-1,875. Hasil nilai Probabilitas Kelongsoran (PK) menunjukkan nilai yang sama yaitu 0%.

Perbandingan nilai FK pada kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* tanpa *damage region* lebih kecil nilainya dibandingkan pada kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* dan rata-rata perbedaan nilainya sebesar 20,8%. Hal tersebut dipengaruhi oleh batuan di sekitar permukaan area penggalian atau peledakan mampu mempengaruhi nilai *material properties*, sehingga diperlukan pembagian wilayah yang terdampak dan area yang tidak terdampak aktivitas penggalian maupun peledakan.

Nilai FK *Generalized Hoek-Brown* yang lebih kecil dibandingkan nilai FK Mohr-Coulomb dipengaruhi oleh variable pada litologi seperti struktur litologi dan kondisi bidang diskontinuitas dari hasil pembobotan menggunakan GSI dan nilai *disturbance factor (D)* sebagai dampak dari aktivitas penggalian dan peledakan sedangkan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb tidak dipengaruhi oleh kondisi tersebut dan secara sederhana hanya melibatkan nilai *material properties* dari batuan itu sendiri. Dan penyebab analisis *overall slope* pada kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* memiliki nilai FK yang lebih tinggi sekitar 28,7% dibandingkan dengan Mohr-Coulomb yaitu akibat *software* yang merata-ratakan nilai UCS untuk semua litologi penyusun lereng sehingga lereng dianggap memiliki kuat tekan yang lebih tinggi pada lereng keseluruhan.

## PENUTUP

Penggunaan kriteria keruntuhan *Generalized Hoek-Brown* dengan *damage region* lebih cocok digunakan pada lokasi penelitian karena nilai FK dan PK yang dihasilkan mendekati kondisi aktual di lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Algadri Nafian, M., & Rizal, Y. (2021). Geologi Batubara Daerah Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. *Bulletin Of Geology*, 5(2), 589. <https://doi.org/10.5614/bull.geol.2021.5.2.3>.
- Barber, A. J., M. J. Crow, dan J. S. Milsom. 2005. *Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution*. London: Geological Society Memoir No. 31. Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution - Google Buku
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual For Engineers And Geologists In Mining, Civil, And Petroleum Engineering*. Canada: John Wiley & Sons Inc.
- Bishop, M. G. (2001). South Sumatra Basin Province, Indonesia: The Lahat/Talang Akar-Cenozoic Total Petroleum System. *U. S. Geological Survey*.
- Hoek, E., dan Brown, E. T. (1997). Practical estimates of Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mass Strength Vol. 34 No. 8*.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion. *Proceedings of NARMS-Tac, 1(1), 267-273*
- Irwansyah, S., Daryono, S. K., Rahmad, B. 2016. Geologi dan Lingkungan Pengendapan Batubara Seam A1, Seam A2, dan Seam B, Formasi Muara Enim, Daerah Muara Tiga Besar Utara dan Sekitarnya Kecamatan Marapi, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatra Selatan. *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea Vol. 3 No. 1*.

- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik. *Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 K 30 MEM 2018.pdf*
- Labuz, J. F., Arno, Z. (2012). Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mech Rock Eng. DOI 10.1007/s00603-012-0281-7*.
- Marinos, V., Marinos, P., dan Hoek, E. (2005). The Geological Strength Index: Applications and Limitations. *Bull Eng Geol Environ 64: 55-65*.
- Pratiwi, D. S., Yuki A. Y., Aldo M. (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). Vol.4(2). E-ISSN: 2655-6421*.
- Rockscience. (2024). Damage Regions (Generalized Hoek-Brown). *Slide2 Tutorials | 27 - Damage Regions (Generalized Hoek-Brown) (rockscience.com)*
- Wardani, R. T., Maryanto., Amukti, R. (2019). Analisis Kestabilan Lereng Tambang Batubara dengan Metode Keseimbangan Batas di PT Bukit Makmur Mandiri Utama Jobsite Geo Energy Group “Kapuas Coal Project”, Blok Maharu, Kecamatan Kapuas Tengah, Kabupaten Kapuas, Provinsi Kalimantan Tengah. *Prosiding Teknik Pertambangan Vol 5, No. 1*.