

ANALISIS KESTABILAN LERENG PADA BATUAN LAPUK MENGUNAKAN KRITERIA KERUNTUHAN *GENERALIZED* HOEK-BROWN DAN MOHR-COULOMB EKUIVALEN (*SLOPE STABILITY ANALYSIS OF WEATHERED ROCK APPLYING GENERALIZED HOEK-BROWN AND EQUIVALENT MOHR-COULOMB FAILURE CRITERION*)

Hery Mulyanto

Direktorat Preservasi Jalan dan Jembatan Wilayah II

Jl. Pattimura No, 20 Jakarta

e-mail: hery.mulyanto@pu.go.id

Diterima: 21 Februari 2021; direvisi: 28 Mei 2022; diterbitkan: 30 Juni 2022.

ABSTRAK

*Dalam model keruntuhan tanah, kekuatan hanya dikontrol oleh friksi antar butiran dimana jika dianalogikan dalam keruntuhan massa batuan, ini sama dengan kekuatan batuan intak. Kekuatan diskontinuitas jelas tidak diperhitungkan dalam kriteria keruntuhan tanah. Dalam makalah ini dilakukan analisis kestabilan lereng di dua lokasi pada batuan lapuk yang mengambil obyek di rencana pembangunan jalan lintas selatan Jawa Timur, ruas pantai Serang – Batas Kabupaten Malang. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan mekanika batuan dengan menggunakan kriteria keruntuhan non-linier *Generalized Hoek-Brown*. Kriteria ini diekuivalenkan dengan kriteria keruntuhan linier *Mohr-Coulomb* dimana kriteria *Mohr-Coulomb* ini sudah lazim dilakukan dalam analisis kestabilan lereng. Analisis kestabilan lereng dengan menggunakan kriteria keruntuhan *generalized Hoek-Brown* selalu menghasilkan faktor keamanan (F_s) kritis dibanding analisis kestabilan lereng menggunakan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb* ekuivalen, dengan selisih nilai F_s 50,5% di STA. 16+350 dan 16,03% di STA. 14+125. Bidang gelincir kritis yang dihasilkan pada analisis dengan kriteria keruntuhan *generalized Hoek-Brown* selalu berada pada area yang lebih dangkal jika dibandingkan dengan bidang gelincir kritis pada analisis dengan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb* ekuivalen.*

Kata Kunci: lereng batuan lapuk, *generalized hoek-brown*, *mohr-coulomb* ekuivalen, geological strength index, lintas selatan jawa.

ABSTRACT

*In the soil failure model, the strength of soil masses is controlled by the friction of grains, as analogous to the strength of intact rock in the rock mass failure. Discontinuity strength is obviously not considered in the soil failure criterion. Slopes of weathered rock masses analyzed in this paper were located on the two cut slopes of highway construction on the southern coast of East Java, Serang Beach – Malang Regency Section. The rock mechanic approach was applied by using a non-linear failure criterion of *generalized Hoek-Brown*. This criterion was correlated to the linear failure criterion of *Mohr-Coulomb* which was common in a slope stability analysis practice. Analysis using *generalized Hoek-Brown* was always generating critical factor of safety (F_s), compared to the *Mohr-Coulomb* equivalent with F_s difference of 50.5% and 16.03% at the STA. 16+350 and STA. +14+125 respectively. Critical slip surfaces produced by *generalized Hoek-Brown* were always laying on the shallower area, compared to the *Mohr-Coulomb* critical slip surfaces.*

Keywords: weathered rock slope, *generalized hoek-brown*, equivalent *mohr-coulomb*, geological strength index, southern coast java road.

PENDAHULUAN

Batuan lapuk yang dibahas dalam makalah ini adalah batuan lunak dimana batuan tersebut memiliki UCS < 25 MPa dan / atau masuk dalam derajat lapuk sedang sampai dengan lapuk sempurna menurut kriteria ISRM (1981). Penelitian akan difokuskan pada lereng dengan *like-soil rock* dimana massa batuan ini berada dalam kondisi transisi antara batuan keras dan tanah kohesif. Kondisi massa batuan ini akan semakin memburuk apabila terekspos dalam jangka panjang akibat pengaruh cuaca dan air. Penurunan kekuatan batuan ini akibat pengaruh air bersifat tetap sedangkan pada tanah kohesif bersifat sementara tergantung kadar air dan pembebanan pada massa tanah (Nickmann, Spaun and Thuro 2006). Mekanisme keruntuhan massa batuan ini juga berada pada zona transisi antara kriteria keruntuhan tanah dan batuan. Keruntuhan pada massa batuan dikontrol oleh kekuatan batuan intak dan / atau kekuatan bidang diskontinuitas sedangkan keruntuhan pada masa tanah dikontrol oleh friksi antar butiran. Transisi ini terjadi pada rentang UCS 1-15 MPa (Castro, Carvalho and Sá 2013).

Pendekatan kriteria keruntuhan tanah kurang tepat dalam analisis kekuatan massa batuan lunak ini karena tidak adanya pertimbangan kekuatan bidang diskontinuitas yang mungkin masih mempengaruhi keruntuhan massa batuan. Pada sisi lain pendekatan kriteria keruntuhan massa batuan juga tidak sepenuhnya tepat karena kekuatan batuan intak sudah sangat lemah sehingga keruntuhan massa batuan tidak murni dikontrol oleh rotasi ataupun translasi antar blok-blok batuan pada bidang diskontinuitas. Analisis kestabilan lereng pada batuan lapuk lebih sering menggunakan pendekatan empiris ataupun analisis balik (Castro, Carvalho and Sá 2013).

Keruntuhan akibat mekanisme pergeseran ataupun rotasi antar blok batuan intak memang kurang tepat digunakan pada batuan lunak tapi setidaknya dalam klasifikasi massa batuan GSI (salah satu parameter kriteria keruntuhan yang digunakan) terdapat komponen kondisi permukaan diskontinuitas yang mengakomodir derajat pelapukan walaupun pelapukan yang dimaksud disini adalah pelapukan bidang diskontinuitas. Berdasarkan hal tersebut maka analisis kestabilan lereng batuan lapuk dalam makalah ini menggunakan pendekatan mekanika

batuan. Kriteria keruntuhan yang digunakan adalah kriteria keruntuhan non-linier *generalized* Hoek-Brown dan kriteria keruntuhan linier Mohr-Coulomb ekuivalen. Perbandingan faktor keamanan lereng hasil analisis kedua metode ini dibandingkan untuk mengetahui metode mana yang menghasilkan faktor keamanan kritis.

Dengan hasil analisis yang disajikan dalam makalah ini diharapkan akan didapatkan penangan alternatif metode analisis dalam perancangan lereng pada batuan lapuk yang selama ini lebih sering menggunakan metode empiris atau bahkan menggunakan pendekatan keruntuhan tanah. Hasil analisis dalam makalah ini juga diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan kriteria keruntuhan linier atau non-linier dalam analisis kestabilan lereng batuan lapuk.

HIPOTESIS

Faktor keamanan (F_s) yang dihasilkan analisis kestabilan lereng menggunakan GHB mendekati faktor keamanan (F_s) menggunakan MC-Ekuivalen.

METODOLOGI

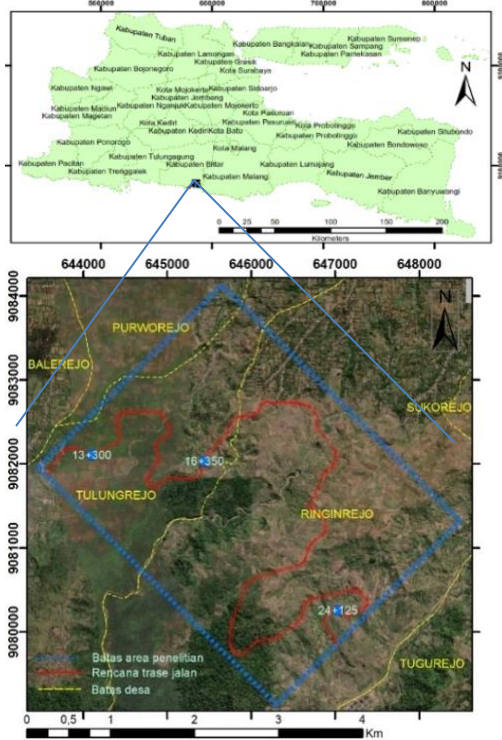
Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil sampel pada lereng rencana pembangunan jalan lintas Pantai Selatan Jawa Timur pada segmen ruas jalan Pantai Serang – Batas. Kab. Malang STA. 12+600 sampai dengan STA. 24+700. Dua sampel lokasi rencana lereng merupakan lereng batuan lapuk pada rencana galian terdalam. Dua lokasi tersebut adalah STA. 16+350 dan STA. 24+125 seperti pada Gambar 1.

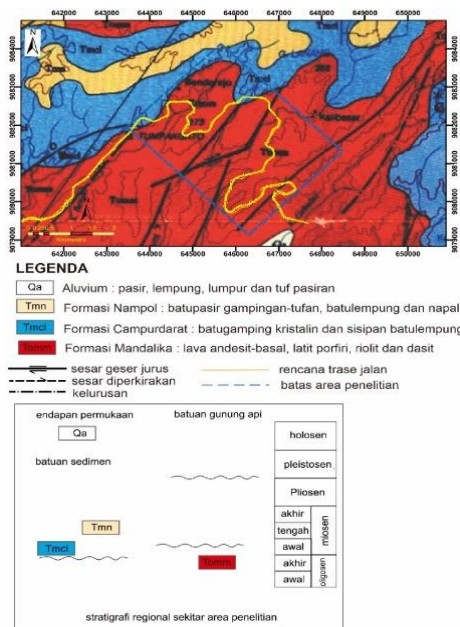
Geologi Area Penelitian

Area penelitian terletak pada zona pegunungan selatan pada sub zona pegunungan Sewu yang terdiri atas perbukitan karst dan batuan vulkanik. Morfologi area penelitian adalah morfologi perbukitan yang terletak pada ketinggian 186-368 mdpl dengan kemiringan rata-rata $14,48^\circ$.

Litologi yang berada di area penelitian adalah basal dan batu gamping seperti pada Gambar 2. Basal menempati 76% luas area dan batu gamping menempati 24% luas area penelitian.



Sumber: Pemprov. Jatim. (2018), Google earth (2019)
Gambar 1. Lokasi penelitian rencana ruas jalan Pantai Serang - Bts. Kab. Malang STA. 12+600 - STA.24+700



Sumber: Sjarifudin dan Hamidi (1992).
Gambar 2. Bagian peta geologi regional lembar Blitar ditampilkan dengan rencana trase jalan di area penelitian

Kriteria Keruntuhan Massa Batuan

Kriteria keruntuhan *generalized* Hoek-Brown digunakan pada lingkup massa batuan dengan

keruntuhan akibat rotasi ataupun pergeseran antar blok massa batuan. Kondisi ideal untuk kriteria ini adalah massa batuan dengan diskontinuitas yang intensif dan saling mengunci dengan kekuatan batuan intak yang tinggi (Hoek and Brown 2018). Kriteria keruntuhan *generalized* Hoek-Brown dinyatakan seperti pada Persamaan (1).

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

dimana

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

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

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- σ_1, σ_3 : tegangan prinsip mayor dan minor.
- σ_{ci} : kuat tekan batuan intak.
- m, m_i : konstanta Hoek-Brown massa batuan terkait kekuatan friksi antar blok batuan pada massa batuan dan kekuatan intrinsik pada batuan intak.
- s : parameter terkait pengaruh kekuatan saling mengunci massa batuan pada rentang $0 \leq s \leq 1$. $s = 0$ pada kondisi kekuatan saling mengunci antar blok batuan sudah hilang, tanpa kohesi, $s = 1$ pada kondisi blok batuan saling mengunci
- α : Parameter linearitas massa batuan terkait kompetensi massa batuan
- GSI : *geological strength index*, dijelaskan pada sub bab selanjutnya.
- D : *disturbance factor*, terkait pelepasan tegangan dan pengaruh gangguan akibat proses penggalan.

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb merupakan kriteria keruntuhan material linier yang sering dipakai dalam analisis kestabilan lereng tanah. Dalam bentuk hubungan $\sigma_1 - \sigma_3$ kriteria ini dinyatakan seperti pada Persamaan (5)

$$\sigma_1 = q_u + \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \phi/2) \dots\dots\dots(5)$$

dimana

$$q_u = 2c \tan(45^\circ + \phi/2) \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan:

- σ_1, σ_3 : tegangan prinsip mayor dan minor.
- q_u : kuat tekan tak terkekang
- c : kohesi.
- ϕ : sudut gesek internal

Kriteria *generalized* Hoek-Brown (GHB) dan *Mohr-Coulomb* (M-C) dapat disetarakan dalam penggunaannya pada *like-soil rock* dengan pendekatan sebagai berikut. Nilai $D = 0$ (metode penggalian menggunakan penggalian mekanis yang sama sekali tidak mengganggu kondisi tegangan massa batuan). Semakin mendekati tanah, $\alpha \approx 1$ (semakin linier) dan semakin mendekati batuan, $\alpha \approx 0,5$ (non-linier). Dengan pendekatan ini Castro (2013) membuat penyesuaian kriteria *generalized* Hoek-Brown untuk *like-soil rock*. Dengan $D = 0$ dan pada kondisi batas bawah ($\alpha = 1$) Persamaan (1) akan menjadi Persamaan (7)

$$\sigma_1 = s\sigma_{ci} + (m + 1)\sigma_3 \dots\dots\dots(7)$$

sehingga penyetaraan Persamaan (1) dan (7) menghasilkan Persamaan (8) dan (9).

$$q_u = s\sigma_{ci} \dots\dots\dots(8)$$

dan

$$(m + 1) = \tan^2(45^\circ + \phi/2) \dots\dots\dots(9)$$

Kriteria keruntuhan *generalized* Hoek-Brown (GHB) dapat ditampilkan dalam hubungan tegangan normal - tegangan geser (Hoek, Carranza and Corkum 2002), (Hammah et al. 2005) dengan mengkombinasikan σ_1 dan σ_3 seperti pada Persamaan (10) dan (11).

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \frac{\alpha m \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{3ci}} + s \right)^{\alpha-1}}{2 + \alpha m \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{3ci}} + s \right)^{\alpha-1}} \dots\dots\dots(10)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \frac{\sqrt{1 + \alpha m \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{3ci}} + s \right)^{\alpha-1}}}{2 + \alpha m \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{3ci}} + s \right)^{\alpha-1}} \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan:

- σ_n : tegangan normal
- τ_n : tegangan geser

Kriteria keruntuhan yang sudah lazim digunakan pada analisis kestabilan lereng adalah kriteria M-C, oleh karena itu dalam makalah ini dibandingkan kriteria keruntuhan non-linier GHB dan kriteria keruntuhan linier M-C. Ekuivalen kriteria keruntuhan M-C dapat diperoleh dari kriteria keruntuhan GHB pada level tegangan tertentu (Hoek, Carranza and Corkum 2002). Rentang tegangan prinsip minor (σ_3) yang dapat digunakan untuk ekuivalensi adalah $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$. *Fitting curve* dilakukan dengan meratakan area grafik di atas dan di bawah perpotongan kurva. Ekuivalen nilai sudut

gesek internal dan kohesi dirumuskan seperti pada Persamaan (12) dan (13).

$$\phi_{eq} = \sin^{-1} \left[\frac{6\alpha m (s + m\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha) + 6\alpha m (s + m\sigma'_{3n})^{\alpha-1}} \right] \dots\dots\dots(12)$$

$$c_{eq} = \frac{\sigma_{ci} [(1+2\alpha)s + (1-\alpha)m\sigma_{3n}] (s + m\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha) \sqrt{\frac{1+6\alpha m (s + m\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha)}}} \dots\dots\dots(13)$$

dimana

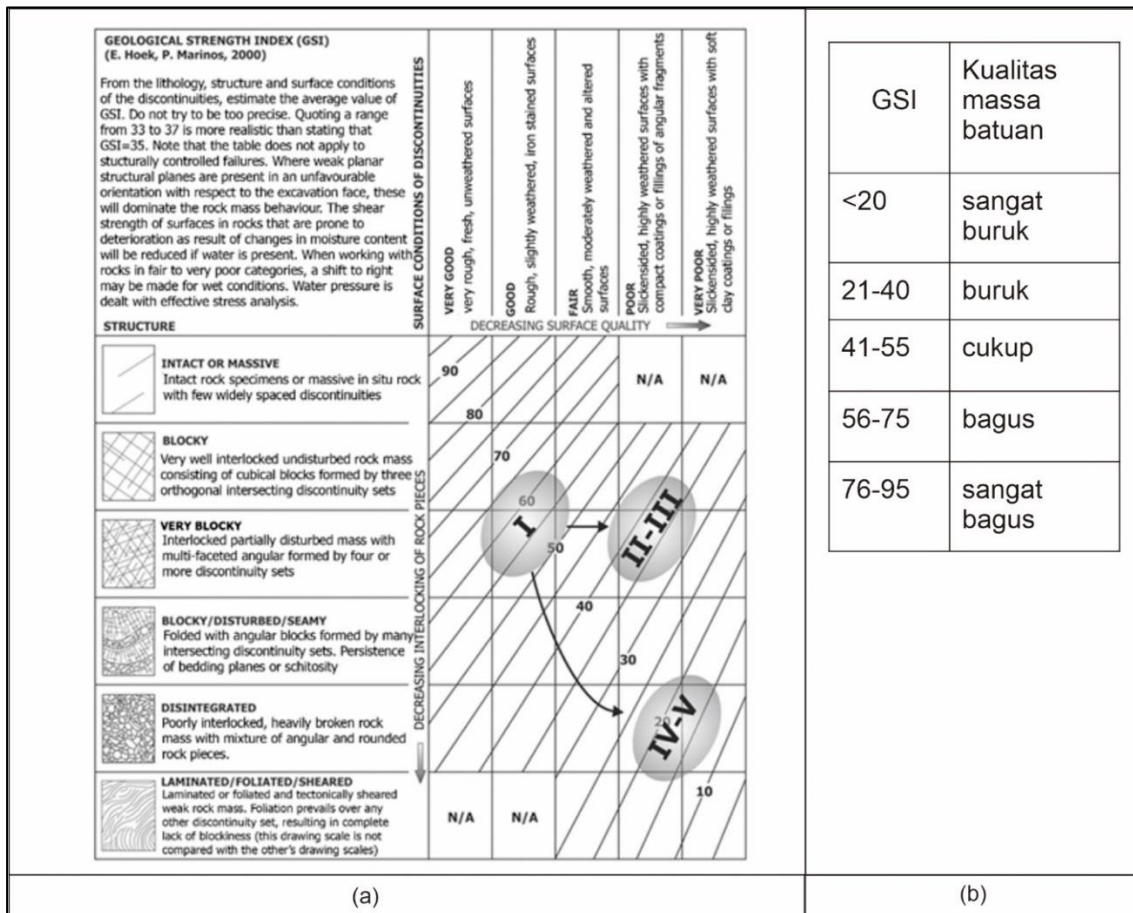
$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}} \dots\dots\dots(14)$$

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma_H} \right)^{-0,91} \dots\dots\dots(15)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m+4s - \alpha(m-8s)] [m/4 + s]^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha)} \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan:

- ϕ_{eq} : sudut gesek internal ekuivalen *generalized* Hoek-Brown.
- c_{eq} : kohesi ekuivalen *generalized* Hoek-Brown.
- σ_{3n} : Perbandingan nilai tegangan prinsip minor terhadap kuat tekan batuan intak.
- σ_{3max} : batas atas tegangan prinsip minor hubungan *generalized* Hoek-Brown dan *Mohr-Coulomb* dapat diterapkan dimana persamaan (15) spesifik digunakan untuk lereng.
- σ_{cm} : kekuatan global massa batuan tanpa mempertimbangkan detail perambatan retak



Sumber: Marinos (2018)

Keterangan: I:batuan segar, II:batuan lapuk ringan, III:batuan lapuk sedang, IV:batuan lapuk kuat, V:batuan lapuk sempurna
Gambar 3. (a) GSI massa batuan terkait dengan tingkat pelapukan (b) Kualitas massa batuan berdasarkan GSI.

Geological Strength Index (GSI) bawah permukaan

Pada dasarnya GSI ditentukan berdasarkan pengamatan struktur massa batuan dan kondisi permukaan bidang diskontinuitasnya.

Media singkapan merupakan media yang paling baik untuk pengamatan GSI sehingga nilai GSI dapat diinterpretasi menggunakan Gambar 3(a), namun tidak semua lokasi memiliki kondisi singkapan ideal yang dapat diamati. Informasi bawah permukaan terkadang hanya diperoleh dari pengamatan sampel inti pengeboran. Kemampuan ekstrapolasi seorang *engineering geologist* yang berpengalaman sangat diperlukan untuk membuat model massa batuan bawah permukaan. Hoek and Diederichs (2013) mengembangkan sebuah korelasi nilai GSI dengan nilai kondisi diskontinuitas pada RMR 1989 (JCond89) dan RQD dengan persamaan seperti pada Persamaan (17).

$$GSI = 1,5 JCond_{89} + \frac{RQD}{2} \dots \dots \dots (17)$$

Keterangan:

JCond₈₉ : kondisi diskontinuitas berdasarkan kriteria RMR₈₉

RQD : *rock quality designation*, perbandingan panjang utuh kumulatif sampel inti >10 cm terhadap panjang sampel tiap laju pengeboran.

Nilai JCond₈₉ dan RQD ini dapat diamati secara langsung dari sampel inti sehingga dari data-data ini bisa didapatkan nilai GSI.

Analisis Kestabilan Lereng Menggunakan Kriteria Keruntuhan Generalized Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb Ekuivalen

Hammah et al. (2004) membandingkan F_s lereng homogen dengan kriteria keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen menggunakan metode kesetimbangan batas *simplified* Bishop dan metode elemen hingga. Ketinggian lereng 10 meter, UCS = 30 MPa, GSI = 5, m_i = 2 dan D = 0. Seluruh F_s yang dihasilkan sangat dekat di

sekitar 1,15. Selisih F_s dengan metode *simplified* Bishop antara GHB dan M-C ekuivalen sebesar 0,4%.

Lereng yang diambil sebagai sampel penelitian adalah lereng batuan basal pada dua lokasi dimana masing-masing memiliki karakteristik massa batuan yang berbeda. Lereng pada STA. 16+350 rencana kedalaman galian 17,3m dan lereng pada STA. 24+125 rencana kedalaman galian 27,3m.

Intepretasi massa batuan bawah permukaan menggunakan data pengamatan sampel inti. Perlapisan massa batuan ditentukan berdasarkan perbedaan litologi dan tingkat pelapukan massa batuan. Tingkat pelapukan diinterpretasi menggunakan kriteria seperti pada Marinos 2018 (Gambar 3). Nilai GSI didapatkan dari korelasi seperti pada Persamaan (17), dihitung tiap *core run* kemudian dirata-rata untuk tiap lapisan. Parameter-parameter analisis kestabilan lereng didapatkan dari pengujian laboratorium. Parameter Hoek-Brown m_i dan σ_{ci} diperoleh dari uji tekan triaksial batuan, disturbance factor (D) ditentukan dengan asumsi bahwa lereng akan digali menggunakan penggalian mekanis yang hanya menyebabkan sedikit gangguan pada permukaan lereng. Pada kondisi ini $D = 0,7$.

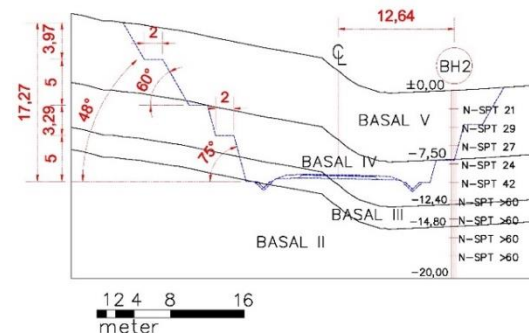
Analisis kestabilan lereng menggunakan metode kesetimbangan batas dengan metode *simplified* Bishop, pola bidang gelincir sirkular. Metode *simplified* Bishop dipilih karena metode inilah yang digunakan untuk penurunan parameter σ_{3max} pada Persamaan (15). Pemilihan bidang gelincir sirkular disesuaikan dengan asumsi bidang gelincir pada batuan lapuk dengan diskontinuitas yang intensif dan acak. Software yang digunakan untuk analisis adalah Slide (Rocscience. Inc).

Hasil F_s dan bidang gelincir kedua kriteria keruntuhan selanjutnya dibandingkan. Bidang gelincir hasil analisis GHB (bidang gelincir-1) dianalisis balik menggunakan MC-ekuivalen dan bidang gelincir hasil analisis M-C ekuivalen (bidang gelincir-2) dianalisis balik menggunakan GHB. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan F_s dan kuat geser pada masing-masing bidang gelincir.

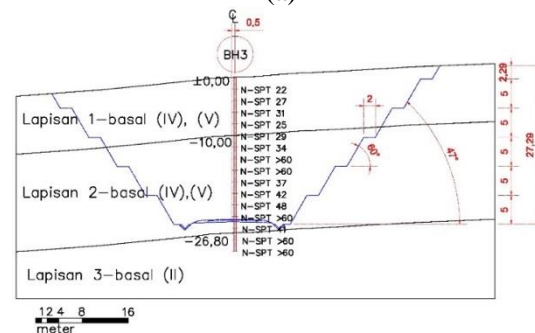
HASIL DAN ANALISIS

Intepretasi Model Perlapisan Massa Batuan

Model massa batuan bawah permukaan pada STA. 16+350 dibagi menjadi 4 lapisan berdasarkan tingkat pelapukan seperti ditunjukkan pada Gambar 4(a). Lereng pada lokasi ini berada pada litologi basal dengan pelapukan berurutan dari atas ke bawah lapuk sempurna (V), lapuk kuat (IV), lapuk sedang (III) dan lapuk ringan (II). Analisis GSI bawah permukaan seperti pada Tabel 1 dan parameter analisis seperti pada Tabel 3.



(a)



(b)

Sumber: hasil analisis (2020)

Gambar 4. Model perlapisan massa batuan pada lereng (a) STA. 16+350; (b) ST. 24+125

Intepretasi massa batuan bawah permukaan pada STA. 24+125 dibagi menjadi 3 perlapisan seperti pada Gambar 4(b). Lereng pada lokasi ini berada pada litologi basal dengan pelapukan kuat (IV) sampai dengan lapuk sempurna (V) yang diselingi dengan *boulder-boulder* besar berukuran lebih dari 1 meter pada kondisi segar (I) sampai dengan lapuk sedang (III). Pola pelapukan seperti ini terjadi sampai dengan dasar rencana galian. Jika *boulder* dianggap sebagai fragmen dan massa batuan lapuk sebagai matriks maka hubungan kontak antar keduanya adalah *matrix supported* dimana *boulder* tersusun acak dalam massa batuan. Berdasarkan kondisi tersebut keruntuhan yang terjadi pada massa batuan ini akan dikontrol oleh matriksnya yaitu massa batuan lapuk (IV) dan (V) oleh karena itu *boulder* tidak dimodelkan

dalam analisis. Untuk Melakukan delineasi perlapisan digunakan pula nilai N-SPT. N-SPT=30 (tanah konsistensi keras) digunakan sebagai batas lapisan 1 dan lapisan 2 pada kedalaman 10m. Batas lapisan 2 dan 3

adalah basal segar (I) sampai dengan lapuk ringan (II) pada kedalaman 26,8m. Analisis GSI bawah permukaan seperti pada Tabel 2. dan parameter analisis seperti

Tabel 1. Analisis GSI bawah permukaan pada STA, 16+350

Kedalaman	Interval (di)	Litologi (derajat pelapukan)	RQD		Kondisi diskontinuitas (Bieniawski 1989)		GSI 1,5Jcond + RQD/2	GSI per derajat pelapukan $\Sigma d_i / \Sigma (d_i/GSI_i)$
			Panjang inti (≥ 10 cm)	Kondisi	Rating			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0,00	1,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00
1,00	2,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
2,00	3,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
3,00	4,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
4,00	5,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
5,00	6,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
6,00	7,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	
7,00	7,58	0,58	basal (V)	0	4	10	15,00	
7,58	8,00	0,42	basal (IV)	0	4	10	15,00	
8,00	9,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00	27,60
9,00	10,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00	
10,00	11,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00	
11,00	12,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00	
12,00	12,40	0,40	basal (IV)	0	3	20	30,00	
12,40	13,00	0,60	basal (III)	12	2	25	43,50	47,33
13,00	14,00	1,00	basal (III)	14,5	1	30	52,25	
14,00	14,80	0,80	basal (III)	0	1	30	45,00	
14,80	15,00	0,20	basal (II)	0	1	30	45,00	52,10
15,00	16,00	1,00	basal (II)	10,5	1	30	50,25	
16,00	17,00	1,00	basal (II)	36	1	30	63,00	
17,00	18,00	1,00	basal (II)	24,5	1	30	57,25	
18,00	19,00	1,00	basal (II)	10,5	1	30	50,25	
19,00	20,00	1,00	basal (II)	0	1	30	45,00	

Sumber: hasil analisis (2020)

pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter analisis kestabilan lereng STA. 16+350

Lapisan	γ_b (g/cm ³)	σ_{ci} (Mpa)	σ_c (Mpa)	GSI	D	m_i	m	s	α	σ_{3max} (Mpa)	c (Mpa)	Φ (°)
Basal V	1,39	11,53	0,011	15	0,7	20	0,234	0,00000447	0,561	0,185	0,031	32,22
Basal IV	1,51	12,11	0,048	27,6	0,7	20	0,374	0,0000277	0,526	0,209	0,051	38,68
Basal III	1,49	13,76	0,287	47,3	0,7	9,35	0,518	0,0005	0,507	0,214	0,082	43,28
Basal II	2,74	15,99	0,48	52,1	0,7	50	3,597	0,001	0,505	0,413	0,204	55,42
STA. 24+125												
Lapisan1	1,138	0,237	-	-	-	-	-	-	-	-	0,144*	5,382*
Lapisan2	1,62	10,76	0,226	22,9	0,7	20	1,11	0,0005	0,507	0,333	0,058	31,09
Lapisan3	2,8	15,572	0,829	59,8	0,7	29,1	3,18	0,0029	0,503	0,644	0,284	50,88

Sumber: hasil analisis (2020), Yodya Karya KSO, PT (2020)

Keterangan: γ_b = berat jenis alami batuan; σ_{ci} = kuat tekan karakteristik batuan intak; σ_c = kekuatan tekan massa batuan; GSI = geological strength index; D = disturbance factor, untuk lereng dengan penggalian mekanis D = 0,7; m_i = konstanta Hoek-Brown batuan intak (diperoleh dari uji tekan triaksial); m = konstanta Hoek-Brown untuk massa batuan; s = parameter Hoek-Brown terkait kekuatan intrinsik massa batuan; α = parameter Hoek-Brown terkait dengan sifat non-linier kurva keruntuhan; σ_{3max} = level tegangan untuk ekuivalensi kriteria keruntuhan GHB ke M-C.; c dan ϕ = parameter kuat geser untuk kriteria keruntuhan M-C; * parameter kuat geser M-C original, tanpa ekuivalensi.

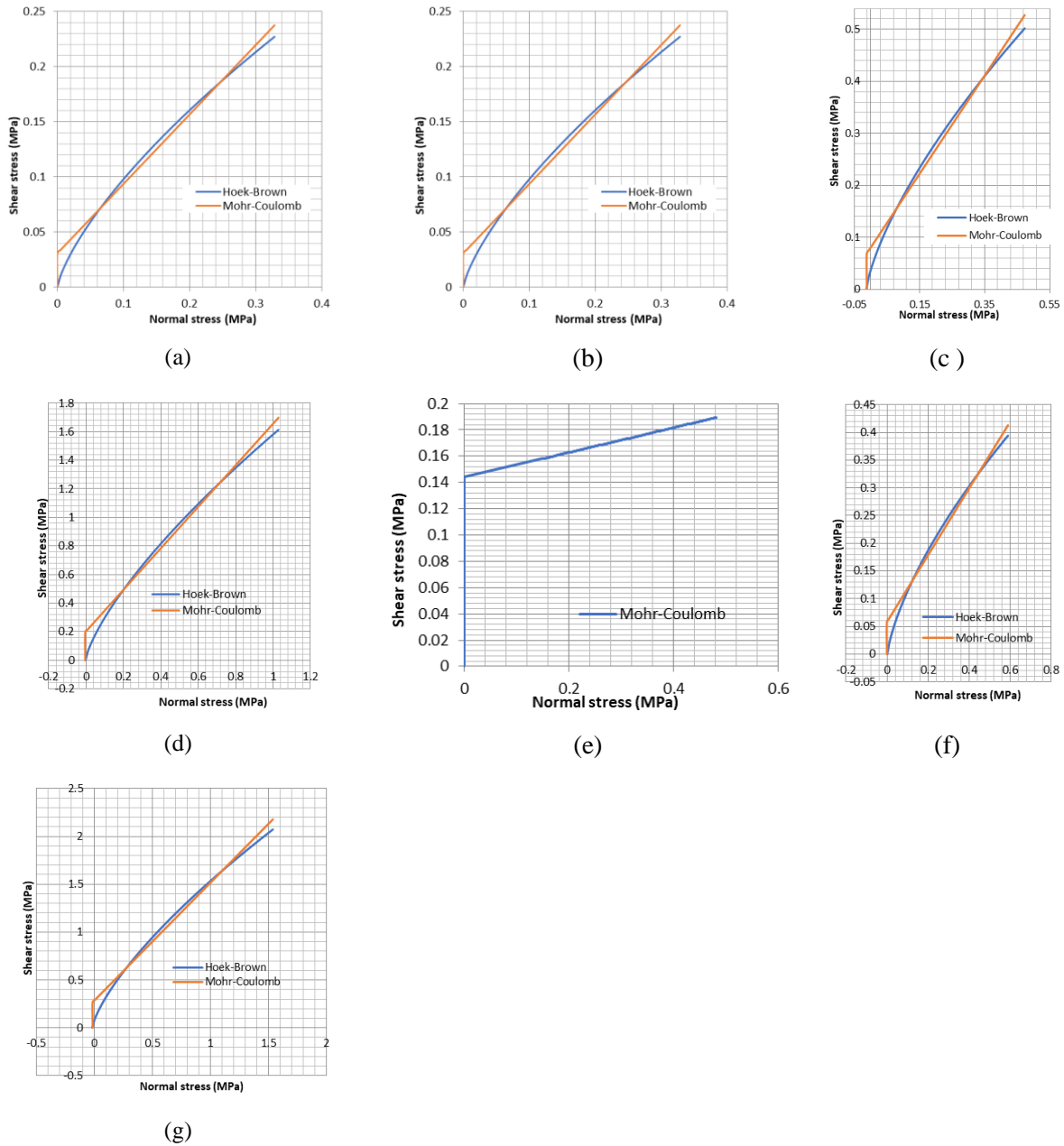
Tabel 2. Analisis GSI bawah permukaan pada STA. 24+125

Kedalaman	Interval (d _i)	Litologi (derajat pelapukan)	RQD		Kondisi diskontinuitas (Bieniawski 1989)		GSI 1,5Jcond + RQD/2	GSI per derajat pelapukan $\Sigma d_i / \Sigma (d_i/GSI_i)$	GSI tiap model perlapisan $\Sigma d_i / \Sigma (d_i/GSI_i)$	N SPT
			Panjang inti (≥10 cm)	Kondisi	Rating					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
0,00	0,75	0,75	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00	UCS < 1 Mpa (Diskontinuitas tidak diperhitungkan sehingga langsung menggunakan kriteria keruntuhan tanah)	
0,75	1,00	0,25	basal (IV)	0	4	10	15,00			22
1,00	2,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00			
2,00	3,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00	15,00		
3,00	4,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00			27
4,00	5,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00			
5,00	6,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		31
6,00	6,96	0,96	basal (V)	0	4	10	15,00			
6,96	7,00	0,04	basal (IV)	0	4	10	15,00	15,00		25
7,00	8,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00			
8,00	9,00	1,00	basal (IV)	0	4	10	15,00			
9,00	9,50	0,50	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		
9,50	10,00	0,50	basal (V)	0	4	10	15,00			
10,00	11,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00			
11,00	11,60	0,60	basal (IV)	0	3	20	30,00	30,00		
11,60	12,00	0,40	basal (III)	0	3	20	30,00			
12,00	12,50	0,50	basal (III)	0	3	20	30,00	30,00		
12,50	13,00	0,50	basal (I)	0	2	25	37,50		>60	
13,00	14,00	1,00	basal (I)	0	2	25	37,50			
14,00	15,00	1,00	basal (I)	16	2	25	45,50	41,57		
15,00	16,00	1,00	basal (I)	0	1	30	45,00		>60	
16,00	17,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00			
17,00	17,60	0,60	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		
17,60	18,00	0,40	basal (V)	0	4	10	15,00			
18,00	19,00	1,00	basal (IV)	0	3	20	30,00			
19,00	19,60	0,60	basal (IV)	0	3	20	30,00			
19,60	20,00	0,40	basal (IV)	0	3	20	30,00	30,00	42	
20,00	20,16	0,16	basal (IV)	0	3	20	30,00		22,97	
20,16	21,00	0,84	basal (V)	0	4	10	15,00			
21,00	21,45	0,45	basal (V)	0	4	10	15,00			
21,45	22,00	0,55	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		
22,00	22,30	0,30	basal (V)	0	4	10	15,00			
22,30	22,70	0,40	basal (I)	23,5	2	25	49,25	49,25		
22,70	23,00	0,30	basal (V)	0	4	10	15,00			
23,00	23,46	0,46	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00	>60	
23,46	23,85	0,39	basal (I)	0	2	25	37,50	37,50		
23,85	24,00	0,15	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		
24,00	25,00	1,00	basal (I)	44,5	2	25	59,75	59,75		
25,00	26,00	1,00	basal (V)	0	4	10	15,00		41	
26,00	26,80	0,80	basal (V)	0	4	10	15,00	15,00		
26,80	27,00	0,20	basal (I)	44,5	2	25	59,75		>60	
27,00	28,00	1,00	basal (I)	44,5	2	25	59,75			
28,00	29,00	1,00	basal (I)	44,5	2	25	59,75	59,75	59,75	
29,00	30,00	1,00	basal (I)	44,5	2	25	59,75		>60	

Sumber: hasil analisis (2020)

Kriteria Keruntuhan Massa Batuan

Kurva keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen dianalisis pada tiap model lapisan massa batuan seperti pada Gambar 5. Kurva keruntuhan ini ditampilkan dalam hubungan tegangan normal-tegangan geser menggunakan persamaan (10), (11), (12) dan (13) agar lebih mudah mengidentifikasi tegangan yang terjadi pada bidang gelincir. Tegangan maksimum dan tegangan pada titik perpotongan kurva GHB dan M-C ekuivalen seperti pada Tabel 4.



Sumber: hasil analisis menggunakan Rocscience RocData (2020)

Gambar 5. Kurva keruntuhan massa batuan (a) STA. 16+350 lapisan basal (V); (b) STA. 16+350 lapisan basal (IV); (c) STA. 16+350 lapisan basal (III); (d) STA. 16+350 lapisan basal (II); (e) STA. 24+125 lapisan 1; (f) STA. 24+125 lapisan 2; (g) STA. 24+125 lapisan 3

Tabel 4. Batas maksimum dan titik perpotongan kriteria keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen tiap lapisan massa batuan

LAPISAN	GHB		MC-ekuivalen		Perpotongan kurva			
	σ_{nmax} (MPa)	τ_{max} (MPa)	σ_{nmax} (MPa)	τ_{max} (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)
STA.16+350(V)	0.328	0.227	0.328	0.238	0.060	0.068	0.249	0.187
STA.16+350(IV)	0.416	0.366	0.416	0.384	0.099	0.133	0.300	0.292
STA.16+350(III)	0.474	0.502	0.474	0.528	0.080	0.157	0.282	0.355
STA.16+350(II)	1.030	1.615	1.030	1.699	0.024	0.139	0.977	1.505
STA.24+125(1)	-	-	0.481	0.189	-	-	-	-
STA.24+125(2)	0.589	0.394	0.589	0.4139	0.123	0.134	0.437	0.323
STA.24+125(3)	1.54	2.07	1.54	2.18	0.290	0.642	1.113	1.649

Sumber: hasil analisis (2020)

Keterangan: σ_{nmax} = tegangan normal maksimum batas ekuivalensi; τ_{max} = tegangan geser maksimum batas ekuivalensi

Hasil Analisis Kestabilan Lereng

Kemiringan lereng dirancang menggunakan kemiringan paling kritis dari kriteria keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen seperti pada Gambar 6. Lereng dirancang menggunakan *bench* dengan ketinggian 5 meter. Kemiringan *bench* optimum yang didapatkan pada STA. 16+350 adalah 75° untuk lapisan basal lapuk sedang (III) dan lapuk kuat (IV), dan 60° untuk lapisan basal lapuk sempurna (V). Kemiringan *bench* optimum yang didapatkan pada STA. 24+125 adalah 60° untuk seluruh model lapisan.

Faktor keamanan hasil analisis kestabilan lereng seperti pada Tabel 5. Perbandingan posisi bidang gelincir lereng pada kedua kriteria keruntuhan seperti pada Gambar 6.

Tabel 5. Faktor keamanan lereng hasil analisis

Lokasi	Simplified Bishop			Persyaratan F_s pembebanan tetap (SNI 8460-2017)
	F_s GHB	F_s MC	% selisih	
STA.16+350	1,664	2,505	50,5%	1,5
STA.24+125	1,84	2,135	16,03%	

Sumber: hasil analisis (2020)

PEMBAHASAN

Model perlapisan massa batuan pada lereng STA.16+350 memiliki pola pelapukan yang ideal dimana pelapukan semakin melemah ke bawah permukaan sampai dengan rencana dasar penggalian (17,3 meter) sedangkan pelapukan pada STA. 24+125, memiliki pola pelapukan kuat (IV) hingga lapuk sempurna (V) berselang-seling sampai dengan rencana dasar penggalian (27,3 meter). *Boulder-boulder* pada kondisi segar (I) sampai dengan lapuk sedang (III) yang tersebar di perlapisan tidak dimodelkan karena keruntuhan akan dikontrol

oleh bagian massa batuan lapuk kuat (IV) dan lapuk sempurna (V) Marinos 2018.

Berdasarkan nilai GSI menggunakan klasifikasi Sivakugan (2013), seperti pada Gambar 3(b) massa batuan bawah permukaan pada kedua lereng berada pada rentang kualitas massa batuan bagus hingga sangat buruk. Nilai UCS tiap lapisan berada pada rentang 0,237-15,99 MPa. Model lapisan massa batuan dengan nilai UCS < 1 Mpa langsung dianalisis dengan kriteria keruntuhan tanah dimana diskontinuitas tidak diperhitungkan lagi seperti pada lapisan-1 STA. 24+125. Berdasarkan nilai UCS dan tingkat pelapukan, massa batuan bawah permukaan pada kedua lereng ini secara umum dapat mewakili karakteristik lereng pada batuan lunak.

Pembahasan Analisis Kestabilan lereng STA. 16+350

Tegangan normal maksimum bidang gelincir sebesar 0,078 MPa terletak pada bidang gelincir-2, lapisan basal (IV) yang dihasilkan oleh MC-ekuivalen seperti pada Tabel 6. Tegangan normal maksimum untuk ekuivalensi(σ_{nmax}) lapisan basal (IV) sebesar 0,416 MPa seperti pada Tabel 4, sehingga tegangan normal maksimum masih masuk dalam rentang ekuivalensi.

F_s GHB = 1,664 dan F_s M-C ekuivalen = 2,505 seperti pada Tabel 5. Bidang gelincir GHB berada pada lokasi yang dangkal, *bench* ke-2 sedangkan bidang gelincir M-C ekuivalen terletak lebih dalam, memotong lereng dari puncak sampai dengan kaki lereng seperti pada Gambar 6. F_s hasil analisis GHB selalu lebih kecil dari F_s analisis MC-ekuivalen baik itu pada bidang gelincir-1 ataupun bidang gelincir-2. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui plot kurva keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen seperti

pada Gambar 5 (a), (b), (c). Tegangan normal maksimum tiap lapisan pada bidang gelincir-1 ataupun bidang gelincir-2 (Tabel 6) selalu lebih kecil dari tegangan normal pada perpotongan awal kurva GHB dan M-C ekuivalen (Tabel 6). Ini berarti tegangan geser terjadi pada zona dimana tegangan geser GHB

selalu lebih kecil dari tegangan geser M-C ekuivalen seperti pada Gambar 5 (a), (b), (c). Tegangan geser adalah tegangan penahan gelincir yang berbanding lurus dengan nilai F_s maka nilai F_s GHB juga selalu lebih kecil dari F_s M-C ekuivalen.

Tabel 6. Tegangan normal dan tegangan geser maksimum tiap lapisan

LAPISAN	Bidang gelincir-1				Bidang gelincir-2			
	GHB		MC-ekuivalen		GHB		MC-ekuivalen	
	σ_{nmax} (MPa)	s_{max} (MPa)	σ_{nmax} (MPa)	s_{max} (MPa)	σ_{nmax} (MPa)	s_{max} (MPa)	σ_{nmax} (MPa)	s_{max} (MPa)
STA.16+350(V)	0,007	0,014	0,01	0,037	0,074	0,079	0,078	0,08
STA.16+350(IV)	-	-	-	-	0,075	0,109	0,078	0,114
STA.16+350(III)	-	-	-	-	0,055	0,124	0,057	0,136
STA.16+350(II)	-	-	-	-	-	-	-	-
STA.24+125(1)	-	-	-	-	0,072	0,151	0,055	0,149
STA.24+125(2)	0,044	0,064	0,06	0,094	0,214	0,198	0,216	0,189
STA.24+125(3)	-	-	-	-	-	-	-	-

Sumber: hasil analisis (2020)

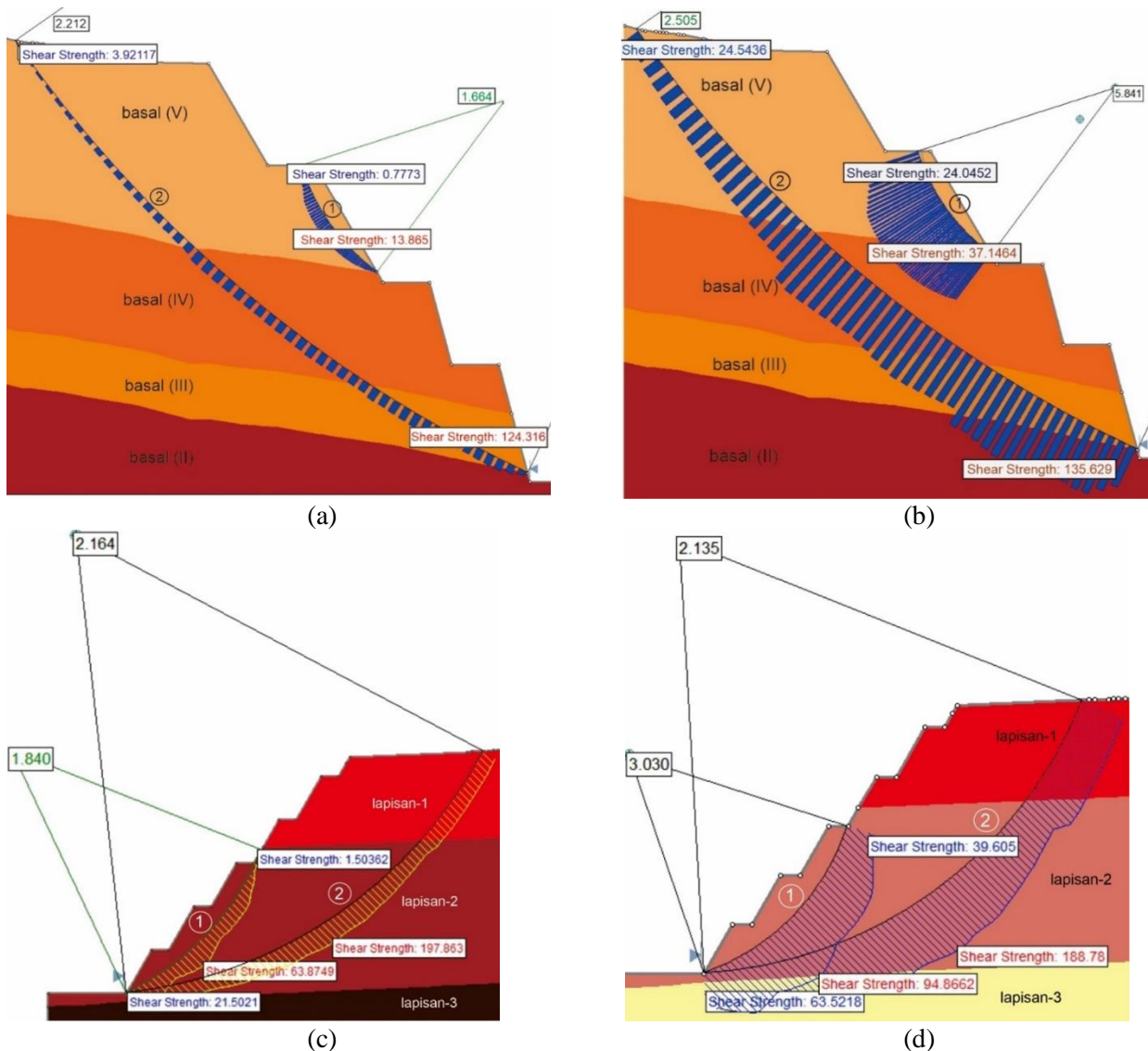
Keterangan: σ_{nmax} = tegangan normal maksimum tiap lapisan; s_{max} = kuat geser maksimum tiap lapisan

Pembahasan Analisis Kestabilan Lereng STA. 24+125

Tegangan normal maksimum bidang gelincir sebesar 0,216 MPa terletak pada bidang gelincir-2, lapisan-2 dengan kriteria MC-ekuivalen seperti pada Tabel 6. Tegangan normal maksimum untuk ekuivalensi (σ_{nmax}) lapisan-2 sebesar 0,589 MPa seperti pada Tabel 4, sehingga tegangan normal maksimum masih masuk dalam rentang ekuivalensi.

F_s GHB = 1,84 dan F_s M-C ekuivalen = 2,135 seperti pada Tabel 5. Bidang gelincir GHB berada pada lokasi yang dangkal, lapisan ke-2 sedangkan bidang gelincir M-C ekuivalen terletak lebih dalam, memotong lereng dari permukaan sampai dengan kaki lereng seperti pada Gambar 6. F_s GHB lebih kecil dari F_s M-C-ekuivalen namun dalam tinjauan bidang gelincir-2 F_s M-C ekuivalen lebih kecil dari F_s

GHB, berbeda dengan bidang gelincir di STA. 16+350 dimana F_s GHB selalu lebih kecil baik pada bidang gelincir-1 ataupun bidang gelincir-2. Kondisi dimana F_s GHB lebih besar dari F_s M-C ekuivalen pada bidang gelincir-2 dapat dijelaskan sebagai berikut. Tegangan normal maksimum bidang gelincir-2 (0,216 Mpa) berada diantara titik perpotongan pertama dan kedua kurva seperti pada Gambar 5(f). Pada level tegangan normal 0,216 Mpa terlihat kurva GHB berada diatas kurva M-C ekuivalen yang berarti tegangan geser GHB lebih besar dari tegangan geser M-C ekuivalen. Tegangan geser adalah tegangan penahan gelincir yang berbanding lurus dengan nilai F_s maka nilai F_s GHB pada bidang gelincir-2 juga lebih besar dari F_s M-C ekuivalen.



Sumber: hasil analisis menggunakan Rocscience Slide (2020)

Gambar 6. Perbandingan bidang gelincir hasil analisis kestabilan lereng (a) STA. 16+350, kriteria keruntuhan GHB; (b) STA. 16+350, kriteria keruntuhan M-C ekuivalen; (c) STA. 24+125, kriteria keruntuhan GHB; (d) STA. 24+125, kriteria keruntuhan M-C ekuivalen

Perbandingan Hasil Analisis Metode GHB dan M-C Ekuivalen

Pada lereng dengan bidang gelincir dangkal seperti lereng dengan *bench*, kriteria keruntuhan GHB akan lebih sensitif jika dibandingkan dengan kriteria keruntuhan M-C ekuivalen terutama pada massa batuan dengan nilai kohesi yang relatif tinggi. Hal ini disebabkan pada kriteria GHB kohesi merupakan fungsi dari tegangan normal. Pada bidang gelincir yang dangkal tegangan normal relatif kecil sehingga kohesi juga relatif kecil dan kuat geser pun relatif kecil. Pada kriteria M-C ekuivalen, kohesi bersifat konstan sehingga pada

bidang gelincir dangkal dengan tegangan normal kecil pun kuat geser tetap relatif besar. Kondisi ini menjadikan over estimasi kekuatan pada kriteria M-C ekuivalen.

Perbandingan tegangan geser pada bidang gelincir dangkal tersebut dapat dengan mudah diamati pada kurva keruntuhan pada Gambar 5. Level tegangan normal pada seluruh bidang gelincir dangkal pada STA. 16+350 dan 24+125 berada pada area sebelum perpotongan awal kurva dimana tegangan geser GHB akan terlampaui lebih dahulu dibandingkan tegangan geser M-C ekuivalen.

Penggunaan kriteria keruntuhan M-C akan lebih sensitif terhadap bidang gelincir yang dalam. Tegangan normal yang dihasilkan pada bidang gelincir dalam relatif besar, berada di antara titik perpotongan kurva. Pada kondisi ini tegangan geser kriteria keruntuhan M-C ekuivalen akan terlampaui terlebih dahulu jika dibandingkan kriteria keruntuhan GHB.

Hasil perbandingan Fs analisis kestabilan lereng dengan kriteria keruntuhan GHB dan M-C ekuivalen berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hammah et al (2004) dimana dalam penelitian tersebut didapatkan hasil yang tidak jauh berbeda (0,4%) antara Fs GHB dan Fs M-C. Berbeda dengan penelitian dalam makalah ini dimana $F_s \text{ GHB} < F_s \text{ M-C}$ ekuivalen dengan selisih sebesar 50,5% pada STA 16+350 dan 16,03% pada STA. 24+125. Perbedaan ini disebabkan karena (a) perbedaan model lereng dimana Hammah et al. (2004) menggunakan model lereng homogen sedangkan penelitian ini menggunakan model lereng berlapis. Lereng massa batuan berlapis memiliki rentang $\sigma_{3\max}$ yang berbeda tiap lapisan.; (b) Model lereng Hammah et al (2004) tanpa *bench* sedangkan model lereng dalam penelitian ini menggunakan *bench*. Keruntuhan GHB pada penelitian ini terjadi pada lokasi dangkal (area *bench*) dimana kriteria GHB lebih sensitif terhadap keruntuhan di area ini.

Analisis kestabilan lereng menggunakan kriteria keruntuhan GHB sebaiknya digunakan pada massa batuan lapuk / batuan lunak untuk mengantisipasi terjadinya over estimasi nilai Fs, namun demikian analisis menggunakan kriteria keruntuhan M-C ekuivalen dapat digunakan untuk mengecek posisi bidang gelincir kritis untuk pemasangan perkuatan lereng seperti baut batuan / *soil nailing* karena analisis ini menghasilkan bidang gelincir yang lebih konservatif yang terletak lebih dalam.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kondisi massa batuan bawah permukaan lereng pada STA. 16+350 dan 24+125 dalam kondisi lapuk ringan sampai dengan lapuk sempurna dengan rentang UCS 0,237-15,99 Mpa. Sebagian besar nilai UCS tersebut massa batuan masuk ke dalam rentang kategori batuan lunak.

F_s kriteria keruntuhan GHB $<$ F_s kriteria keruntuhan M-C ekuivalen dengan selisih sebesar 50,5% pada STA 16+350 dan 16,03% pada STA. 24+125. Kriteria keruntuhan M-C ekuivalen menghasilkan over estimasi nilai Fs. Hal ini disebabkan level tegangan normal bidang gelincir lereng pada umumnya relatif kecil. Kriteria keruntuhan GHB lebih sensitif terhadap bidang gelincir kritis yang dangkal. Bidang gelincir kritis yang dalam dapat diperoleh pada kriteria keruntuhan GHB ataupun MC tergantung pada level tegangan normal yang terjadi.

Saran

Kriteria keruntuhan pada batuan lunak terutama *like-soil rock* diharapkan dapat dikembangkan agar didapatkan model keruntuhan material yang lebih sesuai. Kriteria keruntuhan *generalized* Hoek-Brown sebaiknya digunakan pada lereng batuan lapuk / batuan lunak terutama lereng dengan *bench* untuk memverifikasi hasil analisis metode empiris. Kriteria keruntuhan M-C ekuivalen dapat digunakan untuk mengecek penempatan posisi perkuatan lereng seperti baut batuan / *soil nailing* karena analisis dengan M-C ekuivalen ini menghasilkan bidang gelincir yang lebih konservatif, berada pada posisi yang lebih dalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pembangunan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas izin penggunaan data untuk makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2017. *SNI-8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: BSN.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. New York: Wiley Interscience
- Castro, L.M., Carvalho, J and Sá, G. 2013. Discussion On How to Classify And Estimate Strength Of Weak Rock Masses. In *PM Dight (ed.), Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. 205-217. Perth: Australian Centre for Geomechanics.

- Hammah, R.E., J.H. Curran, T.E. Yacoub, and B. Corkum. 2004. Stability Analysis of Rock Slopes Using The Finite Element Method. *In Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 and the 53rd*. Essen: VGE.
- Hammah, R.E., Yacoub, T.E., Corkum, B.C., and Curran, J.H. 2005. The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. In *40th US Symposium on US Rock Mechanics (USRMS): Rock Mechanics and Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*. 25-26. Alaska: ARMA.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., and Corkum, B. 2002. Hoek-Brown Failure Criterion. *Proc. NARMS-TAC Conference 1*. 267- 273: Toronto: NARMS-TAC.
- Hoek, E., Carter, T.G and Diederichs, M.S. 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. In *The 47th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*. 23-26. San Fransisco: ARMA
- Hoek, E and Brown, E.T. 2018. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 Edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(3): 445-463.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). 1981. *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses* UK: Pergamon Press
- Marinos, V., and Carter, T.G. 2018. Maintaining Geological Reality in Application of GSI for Design of Engineering Structures in Rock. *Engineering Geology Journal* 239: 282-297.
- Nickmann, M., Spaun, G. and Thuro, K. 2006. Engineering Geological Classification of Weak Rocks. *IAEG 492*.
- Sjarifudin, M.Z. dan Hamidi S. 1992. *Peta Geologi Lembar Blitar*, skala 1:100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Yodya Karya KSO. PT. 2020, Laporan Geologi Kabupaten Blitar PPC-4. Jakarta: [sn].