

## ANALISIS KESTABILAN LERENG TIGA DIMENSI PADA BATUAN METAMORF DI PERBUKITAN ASINUA, SULAWESI TENGGARA

RENDY DWI KARTIKO\*<sup>1</sup>, DEDE MOHAMMAD RIZMAN<sup>1</sup>

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

\*Korespondensi: [rendy.gl@itb.ac.id](mailto:rendy.gl@itb.ac.id)

**Sari** – Analisis kestabilan lereng pada batuan relatif jarang dilakukan pada daerah-daerah terpencil di Sulawesi. Sementara itu perkembangan yang semakin cepat menuntut infrastruktur untuk dapat dimitigasi dengan evaluasi longsoran bila nanti terjadi, baik akibat gempa bumi ataupun karena curah hujan yang tinggi. Penelitian ini mengevaluasi kestabilan lereng tiga dimensi pada batuan metamorf berupa sekis dengan metode kesetimbangan batas. Parameter keruntuhan massa batuan yang diukur dari tali pindai dan uji laboratorium menjadi dasar bagi pemodelan. Kondisi ketidakpastian dari massa batuan digambarkan dengan dua skenario berdasarkan variasi dari nilai kuat tekan batuan. Penurunan nilai faktor keamanan terlihat dari pemberian beban gempa bumi, dan kondisi airtanah yang jenuh. Nilai faktor keamanan kritis terlihat mulai terjadi pada skenario batuan yang lebih lemah dengan kondisi airtanah yang jenuh. Sementara itu pada batuan yang lebih keras maka gabungan kondisi airtanah yang jenuh dan beban gempa bumi baru dapat membuat nilai faktor keamanan menjadi kritis.

**Kata kunci:** Kestabilan lereng tiga dimensi, parameter keruntuhan massa batuan, kesetimbangan batas, infrastruktur, Sulawesi Tenggara.

**Abstract** – *Slope stability analyses are rarely performed in the rocky areas within remote Sulawesi Island. Meanwhile, infrastructure development has been accelerated and thus requires mitigation with slope stability analysis to focus on potentially unstable slopes due to earthquakes or high rainfall intensity. This research develops three-dimensional slope stability in metamorphic rock using limit equilibrium method. Outcrop scanline and laboratory tests were conducted to acquire rock mass parameters. Two scenarios based on rock compressive strength variation are used to describe uncertainty from rock mass. The slope stability safety factor downward trend is predicted with earthquake load and groundwater-saturated condition. Critical safety factor are initially seen in weaker lithology with the groundwater-saturated state scenario. Meanwhile, on harder lithology, only after a combination of water saturation and earthquake load, the critical safety factor reached.*

**Key words:** *Three-dimensional slope stability, rock mass failure envelope, limit equilibrium, infrastructure, Southeast Sulawesi.*

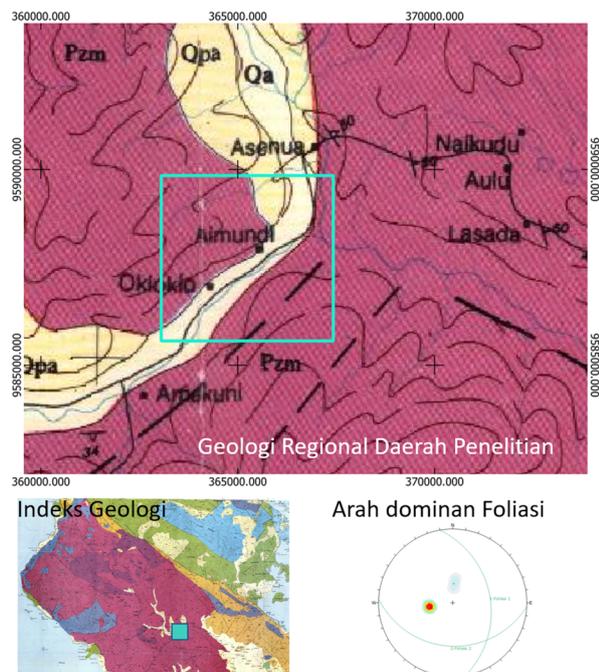
### 1. PENDAHULUAN

Longsoran pada batuan di daerah pegunungan, sering terabaikan. Terlebih lagi di wilayah-wilayah terpencil di Sulawesi. Hal tersebut terutama disebabkan oleh akses yang susah dan terpencil serta jauh dari infrastruktur jalan utama. Akan tetapi, pembangunan infrastruktur di Indonesia berlangsung cukup cepat selama dua dekade terakhir memaksa pemerintah dan masyarakat menjadi lebih sadar terhadap kondisi-kondisi yang dapat mengakibatkan longsoran. Salah satu wilayah yang perlu mendapatkan perhatian lebih dalam hal longsoran adalah daerah penghasil nikel seperti di Sulawesi Tenggara. Daerah-daerah dengan batuan dasar metamorf ini umumnya banyak menjadi lokasi tambang nikel bila memiliki

potensi sumberdayan cukup ekonomis. Seiring dengan itu, perkembangan pemukiman juga berlangsung sejalan dan membutuhkan analisis kestabilan lereng. Termasuk juga pada lereng batuan, yang dapat menjadi masalah bila terjadi longsoran yang menutup jalur akses jalan.

Kondisi massa batuan, gempa bumi, dan muka air tanah di saat musim hujan dapat menjadi faktor yang menentukan kerawanan longsoran di lereng-lereng batuan dengan kondisi tektonik yang aktif seperti di Sulawesi. Salah satu lokasi yang berpotensi sumberdaya nikel yang cukup tinggi dan memiliki tingkat perkembangan daerah yang cukup pesat adalah

Kecamatan Asinua, Kabupaten Konawe, Provinsi Sulawesi Tenggara. Daerah ini berjarak sekitar 100 km di sebelah barat laut kota Kendari. Batuan yang ditemukan di wilayah ini termasuk dalam Formasi Batuan Malihan (Rusmana, 1993), yang terdiri dari batuan metamorf berumur Paleozoikum yang tertutupi tipis oleh lapisan aluvial, seperti terlihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Lokasi penelitian (kotak hijau) dalam kerangka geologi regional daerah penelitian pada peta geologi Lembar Lasusua-Kendari (Rusmana, 1993). Batuan metamorf ditunjukkan dengan warna ungu dengan kode Pzm (*Palaeozoic metamorphic*/batuan malihan Paleozoikum). Endapan aluvial yang tipis (Qa) di atas metamorf berwarna putih kekuningan.

Berdasarkan pengamatan lapangan, litologi yang terdapat di wilayah ini didominasi oleh sekis. Foliasi dominan yang terukur selama pengamatan lapangan berarah relatif ke timur dengan kemiringan  $54^{\circ}$  dan ke selatan dengan kemiringan  $61^{\circ}$ .

## 2. DATA DAN METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan parameter massa

batuan untuk mendapatkan kriteria keruntuhan pada batuan. Nilai kriteria tersebut dalam bentuk kohesi dan sudut geser dalam, yang kemudian diterapkan pada analisis kestabilan lereng dengan metode kesetimbangan batas secara tiga dimensi menggunakan Scoop3D (Reid dkk., 2015). Variasi kondisi lereng dengan tambahan beban gempa bumi, dan muka airtanah yang jenuh akan memberikan gambaran perkembangan lereng menjadi semakin tidak stabil pada model tiga dimensi.

Pendekatan massa batuan untuk kestabilan lereng telah dilakukan secara semi kuantitatif dengan sistem rating (Romana, 1993; Zheng dkk., 2016) yang berfokus pada kinematika batuan. Selain itu digunakan pendekatan nilai kriteria keruntuhan (Hoek dkk., 2002; Li dkk., 2011; Yang dan Yin, 2010) yang didasarkan pada nilai *Geological Strength Index* (GSI). Nilai GSI yang didapatkan kemudian digunakan untuk mendapatkan parameter keruntuhan yang dapat disetarakan dengan kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb*.

Pengukuran tali pindah (*scanline*) dilakukan pada daerah penelitian untuk mendapatkan parameter diskontinuitas pada massa batuan. Kuat tekan batuan utuh (*intact rock*) diukur pada sampel-sampel batuan dengan mendapatkan nilai UCS (*Unconfined Compressive Strength*). Kombinasi dari parameter massa batuan tersebut dihitung untuk mendapatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam dari massa batuan, seperti terlihat pada

Tabel 1. Observasi tali pindai dilakukan di dua lokasi yaitu pada daerah timur laut (KNW13-01, koordinat UTM WGS 84 Zona 50 Selatan:  $366690E, 9589357S$ ) dan barat daya (KNW06-1, koordinat UTM WGS 84 Zona 50 Selatan:  $363392E, 9585991S$ ) yang menghasilkan kurang lebih bobot kelas massa batuan yang sama.

**Tabel 1** Klasifikasi Massa Batuan berdasarkan hasil observasi tali pindai (*scanline*)

Stasiun	UCS ( <i>weighted average</i> ) dalam Mpa	Bobot UCS	RQD	Bobot RQD	Spasi Diskontinuitas (cm)	Bobot spasi diskontinuitas	Bobot Kondisi Diskontinuitas	Bobot Kondisi Air Tanah	Bobot RMR	Kelas RMR	Deskripsi
KNW06-01	23.89	2	71.95	13	19	8	15	10	48	III	Sedang
KNW13-01		2	62.4	13	12	8	15	10	48	III	Sedang

Batuan di daerah ini diasumsikan terdiri dari satu macam jenis batuan, yaitu sekis. Sifat keteknikan dari sekis tersebut divariasikan dalam dua jenis yaitu dengan nilai rata-rata UCS, dan dengan UCS rata-rata dikurangi 1 standar deviasi. Nilai GSI sendiri didapatkan dengan formula RMR dikurangi 5 angka (Hoek dkk., 1995; Hoek dan Brown, 1997).

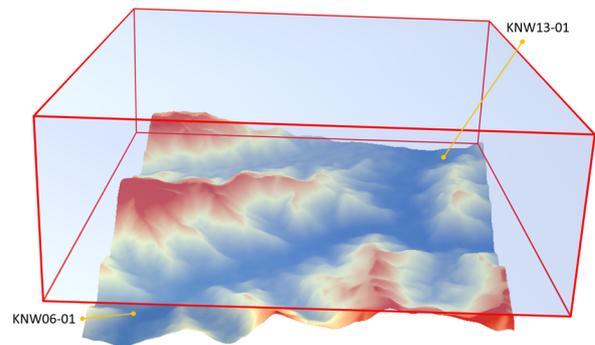
Dari perhitungan berdasarkan kriteria Hoek dan Brown, didapatkan parameter yang nilai kohesinya bervariasi antara 148 kPa hingga 217 kPa (**Tabel 2**) pada skenario nilai UCS yang berbeda. Variasi nilai UCS ini nantinya akan diturunkan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan yang berbeda. Nilai keamanan pada UCS yang lebih kecil mengindikasikan nilai faktor keamanan yang lebih kecil pula, dan sebaliknya.

**Tabel 2.** Kriteria keruntuhan pada massa batuan (Hoek dkk., 2002) dan parameter batuan untuk pemodelan kestabilan lereng.

Parameter	UCS <i>weighted average</i>	UCS <i>weighted average</i> dikurangi 1 standar deviasi
Nilai UCS	23.89	11.02
GSI	43	43
mi untuk sekis	10	10
Penerapan pada lereng		
Nilai kohesi (kPa)	217	148
Nilai sudut geser dalam (°)	49.4	43.96
Berat isi alami (kN/m <sup>3</sup> )	20.28	
Berat isi jenuh (kN/m <sup>3</sup> )	23.7	

Sifat keteknikan massa batuan ini menjadi parameter dasar dari pemodelan tiga dimensi kestabilan lereng. Metode kesetimbangan batas tiga dimensi yang digunakan adalah modifikasi dari metode Bishop (Reid dkk., 2015) dengan pencarian bidang gelincir menggunakan kotak

pencarian yang berada di atas permukaan DEM (**Gambar 2**). Elevasi permukaan pada lokasi berkisar dari 57 hingga 525 m di atas permukaan laut, sedangkan kotak grid pencarian berada pada elevasi 135 hingga 1900 m. Kotak grid memiliki sebaran elevasi kurang lebih tiga kali dari sebaran elevasi permukaan.



**Gambar 2.** Ilustrasi kotak grid pencarian bidang gelincir berada di atas dari model permukaan tanah di lokasi penelitian. Lokasi observasi *scanline* pada KNW13-01 dan KNW06-01. Resolusi DEM adalah 20x20 m per piksel analisis.

### 3. HASIL

Skenario pemodelan dibuat dengan variasi nilai kriteria keruntuhan massa batuan, beban gempa bumi (kala ulang 500 tahun atau setara 0,2 g), dan kejenuhan airtanah. **Tabel 3** memperlihatkan variasi RMR dengan UCS, Kegempabumian dan kejenuhan airtanah yang berbeda-beda, sehingga didapatkan 8 variasi model untuk ditelusuri.

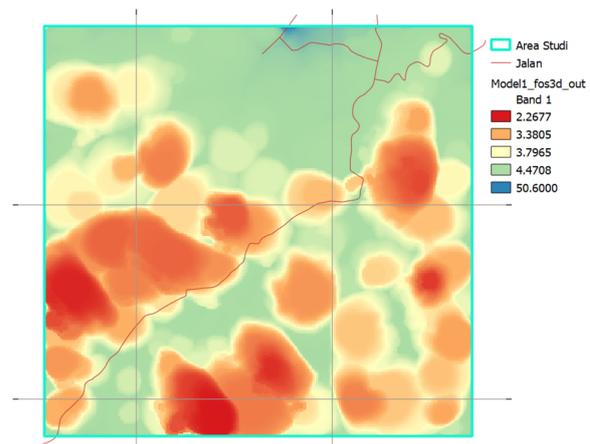
**Tabel 3** Variasi pemodelan kestabilan lereng di daerah penelitian.

Variasi	RMR dengan UCS	Kegempabumian	Kejenuhan airtanah
Model 1	Rata-rata	Tidak ada	Tidak ada
Model 2	Rata-rata - 1SD	tidak ada	Tidak ada

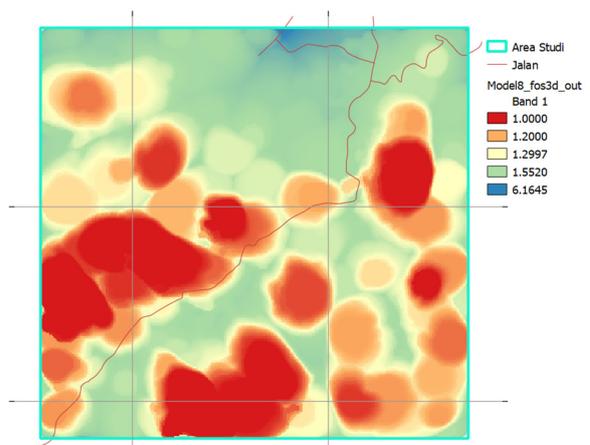
Variasi	RMR dengan UCS	Kegempabumian	Kejenuhan airtanah
Model 3	Rata-rata	0.2 g (kala ulang 500 tahun)	Tidak ada
Model 4	Rata-rata - 1SD	0.2 g (kala ulang 500 tahun)	Tidak ada
Model 5	Rata-rata	Tidak ada	Jenuh
Model 6	Rata-rata - 1SD	Tidak ada	Jenuh
Model 7	Rata-rata	0.2 g (kala ulang 500 tahun)	Jenuh
Model 8	Rata-rata - 1SD	0.2 g (kala ulang 500 tahun)	Jenuh

Secara umum model memiliki nilai faktor keamanan yang mengecil dari model 1 hingga model 8. Hal ini dikarenakan pada model 8 kondisi massa batuan adalah yang paling lemah (dengan UCS sekitar 11 MPa), terdapat beban gempa bumi, dan kondisi airtanah yang jenuh di permukaan.

Kondisi Model 1 (**Gambar 3**) memiliki sebaran nilai faktor keamanan di atas 2,26 yang berarti seluruh lereng ada dalam keadaan aman saat tidak ada gempa bumi dan kondisi kering (musim kemarau). Sementara itu pada kondisi Model 8 di **Gambar 4** tampak faktor keamanan pada warna merah memiliki nilai di bawah 1 sehingga lereng-lereng tersebut mengalami ketidakstabilan. Terdapat penurunan nilai faktor keamanan yang cukup besar dengan variasi kondisi massa batuan, gempa bumi, dan kejenuhan air dari 2,26 menjadi di bawah 1.



**Gambar 3.** Faktor keamanan pada model 1.



**Gambar 4.** Faktor keamanan pada Model 8.

Faktor keamanan minimum menunjukkan penurunan dengan adanya penambahan air dan penambahan beban gempa bumi seperti terlihat pada model-model di **Tabel 4**. Ketidakstabilan mulai terlihat dari model 6 (UCS rata-rata dikurangi 1SD, tanpa gempa bumi, kondisi jenuh) dan terus nampak pada model 7 dan model 8.

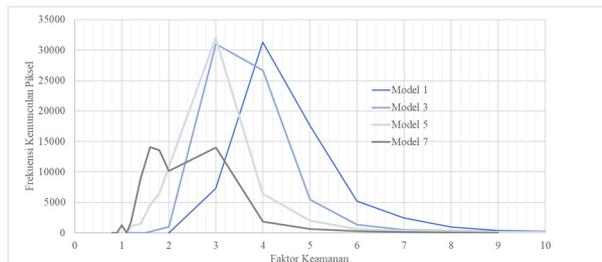
**Tabel 4.** Resume nilai FK (faktor keamanan) pada masing-masing model skenario.

Resume	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8
FK minimum	2.27	1.77	1.12	1.12	1.11	0.84	0.92	0.69
FK maksimum	50.60	40.08	12.85	9.99	31.05	24.41	7.95	6.89
FK median	3.80	3.00	3.14	2.44	2.16	1.67	1.68	1.36
Piksel dengan FK < 1	0	0	0	0	0	2020	1317	8239
Piksel dengan FK < 1.2	0	0	9	7	1123	6444	3111	17144

#### 4. DISKUSI

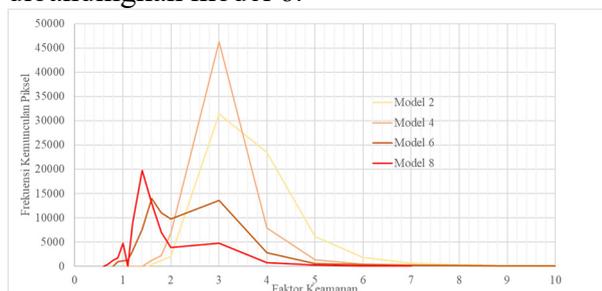
Penurunan nilai faktor keamanan dari model 1 ke model 3 terlihat dari nilai faktor keamanan terkecil dan juga faktor keamanan median yang bergeser ke arah kiri, yang dapat dilihat pada

**Gambar 5.** Sementara itu perubahan yang drastis dari bentuk kurva histogram terlihat pada model 7 yang memiliki sebaran nilai dengan faktor keamanan yang merata sehingga frekuensi menjadi lebih kecil (**Gambar 5**). Pengaruh gempa bumi dan curah hujan yang terpisah memberikan sebaran pola yang masih relatif sama frekuensinya dengan kondisi tanpa gempa bumi dan tanpa hujan.



**Gambar 5.** Perbandingan histogram nilai faktor keamanan pada skenario dengan UCS rata-rata.

Pada model dengan skenario UCS sebesar 1SD di bawah rata-rata, maka terdapat perbedaan respon kurva dengan adanya gempa bumi dan curah hujan dibandingkan dengan kondisi UCS yang lebih besar. Model 6 (kondisi curah hujan tanpa gempa bumi) menunjukkan pengaruh yang cukup besar sehingga frekuensi secara umum menurun namun lebih tersebar (**Gambar 6**). Kondisi dengan curah hujan dan gempa bumi (model 8) tentunya akan memberikan pengaruh yang terbesar terhadap faktor keamanan sehingga kurva lebih terkonsentrasi ke kiri dan runcing dibandingkan model 6.



**Gambar 6** Perbandingan histogram nilai faktor keamanan pada skenario dengan UCS sebesar 1 standar deviasi di bawah rata-rata.

## 5. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan penurunan nilai faktor keamanan dengan beban gempa bumi dan kondisi batuan yang jenuh air (curah hujan

tinggi). Pada skenario batuan yang lebih lemah ( $\pm 11$  MPa), curah hujan memiliki faktor penentu yang lebih besar dibandingkan gempa bumi. Sedangkan pada skenario batuan yang lebih keras ( $\pm 23$  MPa), curah hujan harus dikombinasikan dengan gempa bumi sehingga terjadi ketidakstabilan pada lereng. Pola lokasi ketidakstabilan secara umum berada pada lokasi yang sejak awal memiliki nilai faktor keamanan minimum pada kondisi tanpa gempa bumi dan tanpa jenuhnya batuan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terimakasih atas dukungan yang diberikan oleh PT. Tata Guna Patria sehingga survei dan observasi lapangan dapat dilakukan dengan lancar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hoek, E., dan Brown, E. T. (1997): Practical estimates of rock mass strength, *International journal of rock mechanics and mining sciences*, **34**(8), 1165–1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., dan Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, *Proceedings of NARMS-Tac*, **1**(1), 267–273.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., dan Bawden, W. F. (1995): Support of Underground Excavations in Hard Rock AA BALKEMA, *Rotterdam/Brookfield: Rotterdam, The Netherlands*.
- Li, A. J., Merifield, R. S., dan Lyamin, A. V. (2011): Effect of rock mass disturbance on the stability of rock slopes using the Hoek–Brown failure criterion, *Computers and Geotechnics*, **38**(4), 546–558.
- Reid, M., Christian, S., Brien, D., dan Henderson, S. T. (2015): Scoops 3D–software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape, *US Geological Survey*, diperoleh melalui situs internet: <https://pubs.usgs.gov/tm/14/a01/>, (Query date: 2023-03-29 16:05:37).
- Romana, M. R. (1993): A geomechanical classification for slopes: slope mass rating, 575–600 dalam *Rock testing and site characterization*, Elsevier.

- Rusmana, E. (1993): *Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Yang, X.-L., dan Yin, J.-H. (2010): Slope equivalent Mohr–Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the Hoek–Brown criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**, 505–511.
- Zheng, J., Zhao, Y., Lü, Q., Deng, J., Pan, X., dan Li, Y. (2016): A discussion on the adjustment parameters of the Slope Mass Rating (SMR) system for rock slopes, *Engineering Geology*, **206**, 42–49.