

Analisis Energi Jatuhan Batuan (*Rock Fall*) dalam Penerapan Teknologi *Rock Fence*

Ihwan Fauzi, Hisyam Gusman Sugarda

Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur Direktorat Jenderal Bina Marga

ABSTRAK: Jatuhan batuan adalah pecahan batu yang terlepas dari lereng dan bergerak disepanjang lereng baik dengan cara meluncur, terguling, jatuh bebas, atau memantul. Sepanjang tanggal 1 Januari 2022 hingga 1 Agustus 2022 terdapat 400 kejadian tanah longsor di Provinsi Jawa Barat. Jatuhan batuan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan korban jiwa. Analisis dilakukan untuk mengetahui energi kinetik maksimum jatuhan batuan yang jatuh secara *sliding* sehingga dapat ditentukan jenis penanganan *rock fence* yang sesuai untuk digunakan pada kondisi tersebut. Hubungan antara besarnya energi kinetik maksimum jatuhan batuan pada ketinggian 20, 30, 40 dan 50 meter dengan sudut kemiringan lereng antara 30° – 80° diformulasikan menggunakan analisis regresi yang digunakan dalam penelitian ini adalah linear, logaritmik, dan polinomial derajat 2. Nilai R^2 terbesar 0,997 didapat melalui regresi polinomial derajat 2 menunjukkan kesesuaian hubungan antara energi kinetik maksimum jatuhan batuan dengan parameter tinggi lereng dan sudut kemiringannya. Nilai energi kinetik maksimum jatuhan batuan pada sampel lereng di Jawa Barat adalah sebesar 296,83 kJ sehingga penerapan *rock fence* perlu dilakukan.

Kata Kunci: energi kinetik, jatuhan batuan, rock fence

ABSTRACT: Rock falls are rock fragments that are released from the slope and move along the slope either by sliding, rolling, free falling, or bouncing. From January 1, 2022 to August 1, 2022, there were 400 landslides in West Java Province. Uncontrolled rock fall can cause fatalities. The analysis was carried out to determine the maximum kinetic energy of rock falling sliding so that it can be determined which type of rock fence treatment is suitable for use in these conditions. The relationship between the maximum kinetic energy of rock fall at an altitude of 20, 30, 40 and 50 meters with a slope angle between 30° - 80° formulated using regression analysis used in this study is linear, logarithmic, and polynomial degree 2. The largest R^2 value of 0.997 is obtained through polynomial regression of degree 2 shows the suitability of the relationship between the maximum kinetic energy of rock fall with the parameters of the height of the slope and the angle of the slope. The maximum kinetic energy value of rock fall on the slope sample in West Java is 296.83 kJ, so it is necessary to apply a rock fence.

Keywords: kinetic energy, rock fall, rock fence

1 PENDAHULUAN

Jatuhan batuan menurut Turner dan Schuster (2012) adalah pergerakan *bedrock* yang sangat cepat terlepas dari lereng yang terjal dan bergerak dengan cara terjatuh, memantul, menggelinding, atau menggelincir. Sedangkan menurut Varnes (1978) jatuhan batuan adalah pecahan batu yang terlepas dari lereng dan bergerak disepanjang lereng baik dengan cara

meluncur, terguling, jatuh bebas, atau memantul.

Pada kasus jatuhan batuan, AGS (2007) menyatakan bahwa terdapat beberapa metode mitigasi jatuhan batuan, yaitu (1) menghindari dampak jatuhan batuan, (2) mengurangi frekuensi jatuhan batuan, (3) mengurangi dampak dari jatuhan batuan, (4) mengontrol dampak jatuhan batuan, (5) menerima dampak

jatuhan batuan, dan (6) menunda keputusan mitigasi.

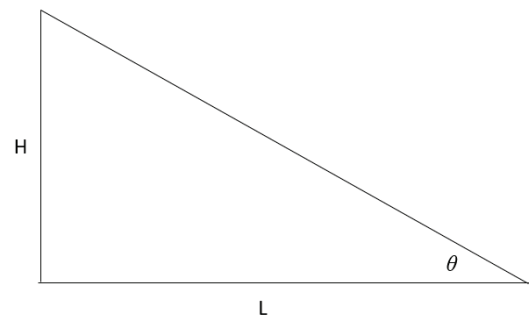
Rock fence yang tergolong sebagai *flexible barrier* menurut Green (2016) sesuai digunakan untuk penanganan jatuhnya batuan pada saat energi kinetik maksimum batuan berada pada rentang 100 hingga 10.000 kJ. Menurut EOTA (2018) *rock fence* dapat diklasifikasikan menjadi 8 kategori sebagai berikut: (1) Kategori 0 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 0 – 100 kJ, (2) kategori 1 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 250 – 500 kJ, (3) kategori 2 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 500 – 1000 kJ, (4) kategori 3 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 1000 – 1500 kJ, (5) kategori 4 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 1500 – 2000 kJ, (6) kategori 5 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 2000 – 3000 kJ, (7) kategori 6 dengan nilai energi kinetik maksimum diantara 3000 – 4500 kJ, (8) kategori 7 dengan nilai energi kientik maksimum 4500 kJ, dan (9) kategori 8 dengan nilai energi kinetik maksimum lebih besar dari 4500 kJ.

Jatuhan batuan yang tergolong sebagai salah satu jenis bencana tanah longsor sering terjadi di Indonesia. Menurut data yang diperoleh dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) pada laman <https://gis.bnpb.go.id/> yang diakses pada tanggal 30 Agustus 2022, sepanjang tahun 2022 dari tanggal 1 Januari 2022 hingga 1 Agustus 2022 di Provinsi Jawa Barat terdapat 400 kejadian tanah longsor. Jawa Barat menurut Van Bemmelen (1949) terbagi menjadi 4 zona, yaitu Zona Dataran Pantai Jakarta, Zona Bogor, Zona Bandung, dan Zona Pegunungan Selatan. Zona Pegunungan Selatan merupakan salah satu zona yang memiliki topografi berupa pegunungan dan lembah dengan material penyusun berupa batuan yang mudah lepas.

Berdasarkan frekuensi jatuhnya batuan dan kondisi topografi serta material penyusun berupa batuan yang mudah dilepas dilakukan studi untuk mendapatkan hubungan antara tinggi lereng, sudut kemiringan lereng, dan energi kinetik maksimum batuan.

2 METODOLOGI

Studi kasus dilakukan secara analisis untuk menentukan energi kinetik maksimum batuan. Adapun parameter yang berpengaruh terhadap energi kinetik maksimum batuan adalah kecepatan awal batuan arah x (V_{xo}), kecepatan awal batuan arah y (V_{yo}), tinggi lereng (H), panjang lereng (L), sudut kemiringan lereng (θ), dan sudut gesek internal (φ) material penyusun lereng. Adapun parameter-parameter tersebut digambarkan pada Gbr. 1.



Gbr. 1. Sketsa Parameter Lereng.

Tahapan awal dalam melaksanakan studi kasus ini adalah dengan menghitung kecepatan pada titik yang sudah ditentukan. Adapun kecepatan tersebut dihitung menggunakan Pers. (1)

$$V_1 = \sqrt{V_o^2 - 2sgk} \quad (1)$$

dimana,

$$V_o = \sqrt{V_{xo}^2 + V_{yo}^2} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (3)$$

$$k = \sin \theta - \cos \theta \tan \varphi \quad (4)$$

dimana v_1 adalah kecepatan akhir batuan (m/s), v_o adalah kecepatan awal batuan (m/s), s adalah jarak dari titik awal batuan ke titik akhir batuan (m), g adalah gravitasi (m/s^2) dan φ adalah sudut gesek internal ($^\circ$).

Tahapan selanjutnya adalah menghitung energi kinetik maksimum batuan. Adapun energi kinetik maksimum batuan dihitung menggunakan Pers. (5).

$$E_k = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (5)$$

Dimana E_k adalah kinetik maksimum batuan (J), m adalah batuan (kg), I adalah momen inersia batuan (kg m^2) dan ω adalah kecepatan sudut batuan (rad/s).

Kecepatan awal batuan arah x, kecepatan awal batuan arah y, dan kecepatan sudut batuan secara berturut-turut menurut Green (2016) adalah 2,0 m/s; 0,8 m/s; dan 0 rad/s jika jatuhnya batuan terjadi bukan disebabkan oleh faktor gempa. Adapun sudut gesek internal yang digunakan dalam studi kasus ini adalah 30° .

Dalam studi kasus ini dilakukan analisis untuk ketinggian lereng 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m yang memiliki variasi sudut kemiringan lereng dari 30° - 80° . Sudut kemiringan lereng yang dianalisis memiliki interval 5° . Pemilihan ketinggian lereng dan sudut kemiringan lereng yang digunakan dilakukan untuk mengakomodir berbagai kemungkinan variasi lereng dengan kemiringan beragam di Provinsi Jawa Barat.

3 HASIL ANALISIS

Pemilihan nilai kecepatan sudut batuan 0 disebabkan karena pemicu pergerakan batuan hanya menyebabkan batuan bergerak ke arah sumbu x dan sumbu y secara translasi tanpa berputar. Nilai sudut gesek internal material penyusun lereng 30° menyebabkan batuan yang jatuh dengan kemiringan lereng kurang dari 30° akan berhenti pada jarak tertentu tanpa perlu adanya *rock fence*.

Tabel 1. Energi Kinetik Maksimum Batuan pada Tinggi Lereng 20 m.

Tinggi Lereng (m)	Sudut ($^\circ$)	Energi Kinetik Maksimum Batuan (kJ)
20	30	1,56
	35	24,63
	40	42,57
	45	57,13
	50	69,35
	55	79,89
	60	89,22
	65	97,65
	70	105,42
	75	112,71
	80	119,66

Tabel 2. Energi Kinetik Maksimum Batuan pada Tinggi Lereng 30 m.

Tinggi Lereng (m)	Sudut ($^\circ$)	Energi Kinetik Maksimum Batuan (kJ)
30	30	1,56
	35	36,17
	40	63,08
	45	84,92
	50	103,24
	55	119,06
	60	133,05
	65	145,69
	70	157,35
	75	168,28
	80	178,72

Tabel 3. Energi Kinetik Maksimum Batuan pada Tinggi Lereng 40 m.

Tinggi Lereng (m)	Sudut ($^\circ$)	Energi Kinetik Maksimum Batuan (kJ)
40	30	1,56
	35	47,70
	40	83,59
	45	112,71
	50	137,14
	55	158,23
	60	176,88
	65	193,74
	70	209,28
	75	223,86
	80	237,77

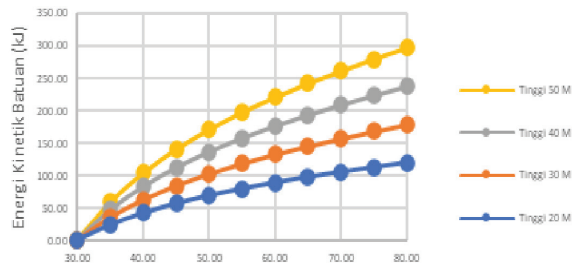
Tabel 4. Energi Kinetik Maksimum Batuan pada Tinggi Lereng 50 m.

Tinggi Lereng (m)	Sudut ($^\circ$)	Energi Kinetik Maksimum Batuan (kJ)
50	30	1,56
	35	59,24
	40	104,10
	45	140,50
	50	171,03
	55	197,39
	60	220,71
	65	241,79
	70	261,21
	75	279,44
	80	296,83

Ukuran batuan yang digunakan pada analisis ini adalah batuan berbentuk bola dengan diameter 80 cm dan berat jenis batuan $2,5 \text{ gr/cm}^3$. Analisis dilakukan pada kondisi jatuhnya batuan dengan tipe *sliding*. Berdasarkan hasil analisis didapatkan energi kinetik maksimum pada masing-masing kombinasi yang

ditampilkan pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Berdasarkan hasil analisis tersebut dilakukan *plotting data* dengan sudut kemiringan lereng sebagai sumbu x dan energi kinetik maksimum batuan sebagai sumbu y. Hasil *plotting data* ditampilkan pada Gbr. 2.



Gbr. 2. Hubungan Energi Kinetik Maksimum Batuan dengan Sudut Lereng pada Ketinggian Lereng 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m.

Hasil interpretasi energi kinetik maksimum batuan pada lereng dengan ketinggian 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m dengan jatuhnya batuan bertipe *sliding* menghasilkan nilai energi kinetik maksimum batuan terbesar adalah 296,83 kJ sehingga penerapan *rock fence* dapat diterapkan pada kondisi tersebut. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa lereng dengan ketinggian 20 – 50 m dengan variabel ukuran dan kecepatan yang disebutkan diatas dapat dimitigasi menggunakan *rock fence* kategori 1 jika jatuhnya batuan terjadi bukan dikarenakan gempa.

Berdasarkan hasil yang didapatkan dilakukan analisis regresi pada kondisi linear, logaritmik, dan polinomial derajat 2. Hasil analisis regresi ditampilkan pada Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8.

Tabel 5. Analisis Regresi pada Tinggi Lereng 20 m.

Jenis Regresi	Persamaan	R ²
Linear	$y = 2,2405x - 50,523$	0,962
Logaritmik	$y = 117,79\ln(x) - 394,02$	0,996
Polinomial Derajat 2	$y = -0,0308x^2 + 5,6271x - 135,96$	0,997

Tabel 6. Analisis Regresi pada Tinggi Lereng 30 m.

Jenis Regresi	Persamaan	R ²
Linear	$y = 3,3607x - 76,555$	0,962
Logaritmik	$y = 176,67\ln(x) - 591,79$	0,996
Polinomial Derajat 2	$y = -0,0462x^2 + 8,4399x - 204,69$	0,997

Tabel 7. Analisis Regresi pada Tinggi Lereng 40 m.

Jenis Regresi	Persamaan	R ²
Linear	$y = 4,4811x - 102,6$	0,962
Logaritmik	$y = 235,57\ln(x) - 789,6$	0,996

Jenis Regresi	Persamaan	R ²
Polinomial Derajat 2	$y = -0,0616x^2 + 11,254x - 273,47$	0,997

Tabel 8. Analisis Regresi pada Tinggi Lereng 50 m.

Jenis Regresi	Persamaan	R ²
Linear	$y = 5,6013x - 128,64$	0,962
Logaritmik	$y = 294,46\ln(x) - 987,38$	0,996
Polinomial Derajat 2	$y = -0,077x^2 + 14,067x - 342,21$	0,997

Berdasarkan hasil analisis regresi didapatkan nilai R² yang mendekati satu adalah regresi polinomial derajat 2 dengan masing-masing persamaan yang dapat dilihat pada tabel diatas.

4 KESIMPULAN

Analisis regresi dapat dilakukan untuk menentukan hubungan antara sudut lereng dan energi kinetik pada ketinggian lereng tertentu. Regresi polynomial derajat 2 memberikan nilai kepercayaan tertinggi sebesar 99.7% pada klasifikasi tinggi lereng 20-50 meter. Energi kinetik akan semakin besar pada kenaikan tinggi lereng dan besarnya sudut lereng pada jenis batuan yang sama. Pada kasus lereng di Jawa Barat dihasilkan energi kinetik maksimum batuan terbesar 296,83 kJ menunjukkan perlunya penerapan teknologi *rock fence*.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. *Geoportal Data Bencana Indonesia*. Diakses pada 30 Agustus 2022 dari <https://gis.bnpb.go.id>.
- Green R, dkk. 2016. *Design Considerations for Passive Protection Structures*. New Zealand Geotechnical Society.
- Schuster, Turner dan. 2012. *Rockfall Characterisation and Control*. Transportation Research Board. National Academy of Sciences.
- Australian Geomechanics Society. 2007. Landslide Risk Management. *Australian Geomechanics* Vol. 42.
- Varnes, David J. 1978. *Slope Movement Types and Processes* 11-33.
- European Organisation for Technical Approvals. 2018. *Falling Rock Protection Kits*. European Organisation for Technical Approvals.
- Bemmelen, Van. 1949. *The Geology of Indonesia*.