

Analisis Fraktal Untuk Menentukan Kuat Geser Batuan Sedimen di Kabupaten Ende – Lianunu Provinsi Nusa Tenggara Timur - Indonesia

Tien Veny Vera 1, Sari B. Kusumayudha¹, Singgih Saptono¹, Kurniawan²*

- 1. Prodi Magister Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Indonesia*
 - 2. PT. Indra Karya, Survey and Investigation Division, Malang, Indonesia*
- *Email: globetien99@gmail.com*

SARI

Kekasaran permukaan batuan merupakan parameter penting yang digunakan dalam menghitung kuat geser batuan, yang keduanya sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Pada penelitian ini dilakukan pengujian kuat geser langsung pada 5 batuan sedimen untuk mendapatkan nilai kohesi dan sudut gesek dalam. Tujuan penelitian meliputi (1) Menghitung dimensi fraktal (D), koefisien kekasaran kekar (JRC), dan kekuatan geser batuan. (2) Analisis hasil perhitungan kuat geser batuan dari hasil uji geser langsung batuan. Untuk menentukan dimensi fraktal menggunakan metode box-counting pada software ImageJ & FracLac. Faktual D dan JRC merupakan dua parameter yang saling berkaitan, dimana semakin tinggi nilai D maka akan meningkatkan nilai JRC, hal ini dipengaruhi oleh ukuran butir. Pada sampel ukuran butir halus, nilai D berkisar antara 1,0034-1,0045, ukuran butir sedang 1,0057, dan ukuran butir kasar 1,0084-1,0085. Perhitungan dengan persamaan baru, nilai JRC pada sampel S1 (8-10), S2 (12-14), S3 (4-6), S4 (12-14), dan S5 (6-8). Perbandingan grafik menunjukkan pola yang hampir mirip dengan peneliti sebelumnya. Perbedaan nilai kuat geser dipengaruhi oleh tingkat kekasaran permukaan batuan yang menggunakan dimensi fraktal memberikan nilai detail yang lebih tinggi. Dengan menggunakan analisis statistik (RMSE dan MAD) menunjukkan nilai error yang kecil yaitu hasil penelitian yang memiliki nilai RMSE (0,14) dan MAD (0,11) terendah, artinya hasil perhitungan menggunakan dimensi fraktal berkorelasi dengan data terukur dari uji geser laboratorium.

Kata kunci: Kekasaran; fraktal; kuat geser

How to Cite: Vera, T.V., Kusumayudha, S.B., Saptono, S., Kurniawan, K. 2023. Analisis Fraktal untuk Menentukan Kuat Geser Batuan Sedimen di Kabupaten Ende-Lianunu Provinsi Nusa Tenggara Timur-Indonesia. Jurnal Geomine, 11 (1): 08-21.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submit 15 September 2022
Received in from 25 September 2022
Accepted 3 April 2023

Licensed By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ABSTRACT

Rock surface roughness is an important parameter used in calculating the shear strength of rocks, both of which greatly affect the stability of a slope. In this research, direct shear strength testing was carried out on 5 sedimentary rocks to obtain the value of cohesion and internal friction angle. The research objectives include (1) Calculating the fractal dimension (D), joint roughness coefficient (JRC), and rock shear strength. (2) Analysis of rock shear strength calculation results from rock direct shear test results. To determine the fractal dimension using the box-counting method in ImageJ & FracLac software. The factual D and JRC are two interrelated parameters, where the higher of D value, will increase the JRC value, this is influenced by the grain size. In the fine grain size sample, the D values ranged 1.0034-1.0045, medium grain size 1.0057, and coarse grain size 1.0084-1.0085. Calculations with the new equation, the JRC values in the samples S1 (8-10), S2 (12-14), S3 (4-6), S4 (12-14), and S5 (6-8). The comparison of graphs shows a pattern that is almost similar to previous researchers. The difference in the value of shear strength is influenced by the level of rock surface roughness using fractal dimensions provides a higher detail value. By using statistical analysis (RMSE and MAD), it shows a small error value, namely the results of the research which have the lowest RMSE (0.14) and MAD (0.11) values, meaning the results of calculations using fractal dimensions are correlated with the measured data from the laboratory shear test.

Keywords: *Roughness; fractal; shear strength*

PENDAHULUAN

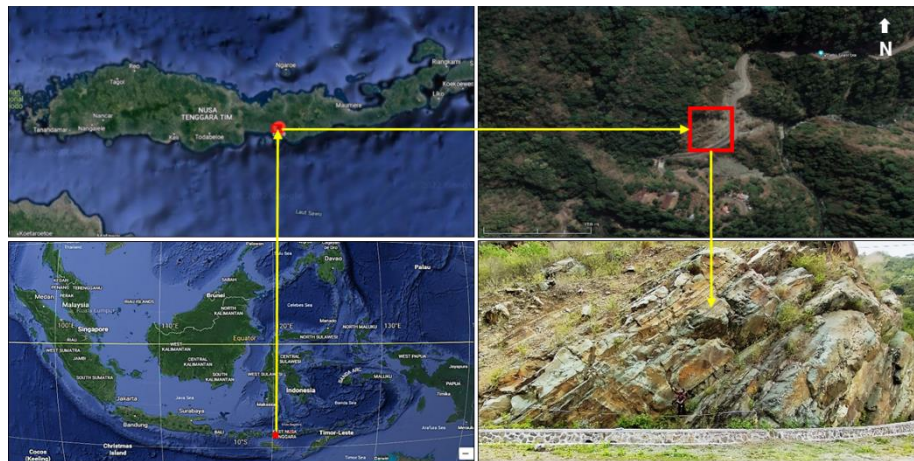
Kestabilan suatu lereng di pertambangan atau jalan raya dipengaruhi oleh adanya struktur batuan yang merupakan daerah lemah dalam massa batuan. Kekasaran permukaan bidang geser batuan dapat mempengaruhi kekuatan geser batuan. Dalam kegiatan penambangan, baik tambang terbuka maupun tambang bawah tanah, hal ini sangat penting untuk ditentukan karena perubahan kuat geser dapat menyebabkan penurunan faktor keamanan baik pada lereng maupun pit (Saptono et al., 2014). Diskontinuitas memainkan peran penting dalam perilaku deformasi batuan. Sifat diskontinuitas batuan meliputi persistensi, orientasi, kekasaran, pengisi, bukaan, dan pelapukan. Kekasaran, yang mengacu pada penyimpangan lokal dari kerataan, mempengaruhi sudut gesekan internal, dilatasi, dan kekuatan geser puncak (Li and Huang, 2015).

Kekasaran adalah ukuran ketidakrataan permukaan seperti amplitudo bidang diskontinuitas relatif terhadap bidang tersebut. Kekasaran bidang diskontinuitas berpotensi mempengaruhi kekuatan geser, terutama dalam kasus blok yang saling mengunci (Brady and Brown, 2006). Kekuatan yang diukur dengan metode geser langsung sepanjang kekar batuan sangat tergantung pada kekasaran batuan (Barton et al., 1973). Evaluasi kekasaran rekahan merupakan bagian penting dari praktik geoteknik dalam menilai kekuatan geser rekahan batuan, karena kekasaran permukaan rekahan yang lebih besar meningkatkan stabilitas struktur (Ficker, 2017).

Penelitian ini berfokus pada analisis koefisien kekasaran kekar (JRC) dan kekuatan geser batuan menggunakan analisis fraktal. Analisis fraktal telah banyak digunakan dalam menganalisis suatu pola distribusi objek yang memiliki geometri, salahsatunya adalah diskontinuitas berupa rekahan/joint yang berkembang dalam massa batuan. JRC merupakan salah satu parameter penting yang digunakan untuk menghitung kuat geser kekar pada suatu massa batuan. Kekuatan geser rekahan batuan sangat tergantung pada kekasaran permukaan rekahan, arah geser, dan tegangan normal yang diterapkan pada permukaan rekahan. (Kulatilake et al., 1997) memberikan kriteria kekuatan geser untuk kekar batuan anisotropi di mana kekasaran stasioner dan non-stasioner dikuantifikasi dan parameter fraktal dimasukkan sebagai ukuran kekasaran. Pada penelitian ini kekuatan geser kekar batuan dipelajari melalui pengukuran kekasaran permukaan dan uji geser langsung. Metode pengukuran kekasaran kekar dan metode analisis fraktal akan diterapkan dalam penelitian ini. Dari profil permukaan sendi yang diukur, JRC dapat diperoleh untuk menghitung kekuatan geser batuan.

Banyak peneliti telah sepakat bahwa profil rekahan batuan di alam dapat dianggap sebagai kurva fraktal. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah banyak melakukan penelitian terkait parameter kekasaran dengan pendekatan teori fraktal yang telah banyak digunakan dalam dunia kesehatan, matematika, ilmu alam, dan lain-lain. Perkembangan teori mekanika batuan selama beberapa tahun terakhir didasarkan pada geometri fraktal. Konsep fraktal telah terbukti menjadi cara yang sangat berguna untuk menggambarkan geometri yang terjadi secara statistik (Mandelbrot, 1983). Awan, ombak, garis pantai, aliran sungai, pegunungan, pola kekar, dan pertumbuhan kristal merupakan contoh benda dan fenomena alam yang bersifat fraktal (Kusumayudha et al., 2000). (Gao et al., 2020) pada tahap perambatan retak, dimensi fraktal meningkat pesat seiring dengan kemajuan pembebanan. Hasil analisis fraktal menunjukkan bahwa kemunculan emas pada sesar regional memiliki dimensi fraktal yang lebih tinggi (Maanijou et al., 2020). Proses diagenesa dan bentuk pori pada batuan sedimen dapat dijelaskan secara kuantitatif oleh fraktal, yang dapat ditransfer ke bidang mekanika batuan, geologi, mekanika penghancuran batuan, dan aplikasinya pada teknologi pertambangan (Xie, 1993). (Kulatilake et al., 2006) menyebutkan bahwa kriteria kuat geser pada kekar batuan anisotropik adalah parameter kekasaran dan parameter fraktal dimasukkan sebagai ukuran kekasaran. JRC dan dimensi fraktal adalah dua parameter penting yang digunakan untuk memperkirakan kekasaran permukaan gabungan batuan. Tujuan penelitian antara lain (1) Menghitung nilai dimensi fraktal, JRC, dan kuat geser batuan, dan (2) Menganalisis hasil perhitungan kuat geser batuan dengan hasil uji geser langsung. Batasan masalah dalam penelitian ini, penulis membatasi masalah dengan (1) Sampel penelitian adalah sampel uji kuat geser/uji geser langsung, (2) Pengaruh air tidak dibahas dalam penelitian ini, dan (3) Metode dalam menghitung dimensi fraktal menggunakan metode *box counting*.

Berdasarkan Peta Geologi lembar Ende, Nusa Tenggara Timur (Suwarna et al., 1989), daerah penelitian berada pada Formasi Kiro (Tmk), yang tersusun atas tufa pasir dan batupasir tufaan berupa sisipan, berwarna kecoklatan, terkersikkan. Formasi ini berlapis baik dengan kemiringan antara 10-35°. Formasi ini berumur Miosen Awal-Miosen Tengah dengan lingkungan pengendapan darat. Daerah penelitian berada pada morfologi berupa pegunungan, perbukitan dan lembah. Berdasarkan aspek morfometri, lereng pada daerah penelitian memiliki kemiringan umum antara 40°-75° yang tergolong ke dalam lereng sangat curam (35-55°) hingga sangat curam sekali (>35°) (Van Zuidam, 1983).



Copyright © 2023, Jurnal Geomine, Page: 11

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif, yaitu penelitian yang berhubungan dengan data-data seperti data pengukuran dan pengujian laboratorium sehingga nilai menjadi parameter utama.

Uji geser langsung (*Direct Shear Test*)

Pengujian kuat geser langsung dilakukan untuk mendapatkan nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) batuan baik puncak maupun sisa. Pada spesimen inti dilakukan uji geser langsung menggunakan alat uji *Indotest Portable Shear Box* RN 140, di mana beban geser dan perpindahan geser diukur dengan pengukur tekanan dan pengukur dial, masing-masing. Secara umum, langsung uji geser dilakukan sesuai dengan (ISRM, 1978) metode yang disarankan untuk penentuan kekuatan geser. Uji geser langsung dilakukan pada 5 sampel batuan. Pada Gambar 3 dibawah ini menunjukkan peralatan uji geser langsung yang digunakan dalam penelitian dan kondisi permukaan batuan setelah uji geser. Tabel 1 juga menunjukkan sifat fisik dan mekanik dari sampel batuan.



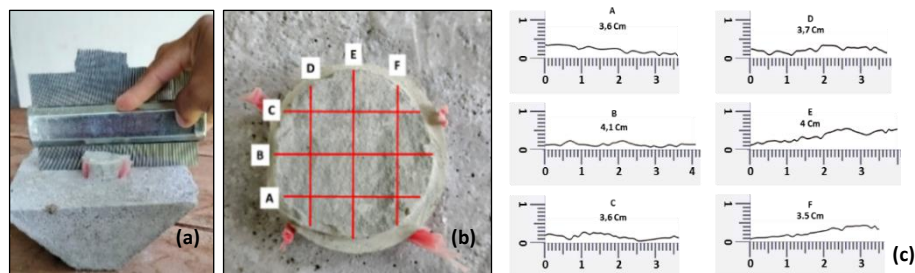
Gambar 3. (a) Alat uji geser langsung *Indotest Portable Shear Box* RN 140.
(b) Kondisi permukaan kekar setelah uji geser

Tabel 1. Hasil uji fisik dan mekanik pada sampel batuan

Uji fisik dan mekanik	Unit	Nilai
<i>Natural Water Content</i>	(%)	0,82 – 2,75
<i>Saturated density (γ_{sat})</i>	(g/cm ³)	2,470 – 1,714
<i>Uniaxial compressive strength</i>	MPa	32,23 - 70.83
Kohesi (c)	-	2,57 - 10.74
Sudut gesek dalam	°	26,57 – 41,99

Pengukuran kekasaran permukaan

Lebar permukaan sampel hasil uji bervariasi dari 3,2-4,5cm. Kekasaran permukaan batuan diukur dengan menggunakan Barton Comb, pengukuran dilakukan pada 5 sampel batuan, dengan 6 kali pengukuran permukaan (Gambar 4 a, b dan c).



Gambar 4. (a) Pengukuran menggunakan Barton Comb. (b) Permukaan batuan setelah uji geser (c) Profil permukaan batuan

Kemudian, permukaan kekasaran masing-masing sampel digambar di foto dan di digitasi pada perangkat lunak Coreldraw dengan skala yang disesuaikan dengan masing-masing panjang permukaan, hasil disimpan dalam format BMP, JPG, dan GIF. Gambar akan digunakan sebagai data input ke perangkat lunak ImageJ & FracLac untuk analisa dimensi fraktal.

Konsep Dimensi Fraktal

(Mandelbrot, 1983) memperkenalkan konsep dimensi fraktal, yaitu untuk menggambarkan objek yang skalanya tidak berubah. Dalam fraktal, bentuk sederhana tumbuh lebih kompleks karena bentuknya berulang dalam bentuk mini di sekitar tepi bentuk pertama. Versi bentuk yang lebih kecil menumbuhkan bentuk yang lebih kecil ini, dan seterusnya hingga skala yang sangat kecil. Hasil akhirnya tak terbatas, berputar-putar, dan kompleks. Karakteristik fraktal penting lainnya adalah *self-similarity*, *self-affinity*, *self-inverse* dan *self-squaring* (Peitgen et al., 1992). Dimensi fraktal digunakan untuk mengukur fluktuasi permukaan dan sudut arah digunakan untuk mengukur anisotropi dari nilai JRC (Wang et al., 2017). Dimensi fraktal adalah topik penelitian yang paling berguna di bidang fraktal geometri untuk mengevaluasi kekasaran permukaan citra digital dengan menggunakan konsep kesamaan diri (Nayak et al., 2018). Ada beberapa metode untuk menentukan dimensi fraktal, misalnya metode kesamaan (*similarity*), metode debu cantor (*cantor-dust*), metode penutup bola (*ball covering*), metode kotak pasir (*sandbox*), dan metode penghitungan kotak (*box counting*).

Penerapan Metode Pembagi (*Box Counting*) Dalam Penentuan Dimensi Fraktal

Dimensi *box-counting* adalah salah satu dimensi yang paling banyak digunakan (Falconer, 1990). Metode penghitungan kotak menggunakan persegi panjang kecil kotak sebagai referensi penghitungan. Mengukur profil dan kontur yang dihasilkan dari irisan horizontal permukaan. Ukuran kotak (r) dipilih dan jumlah kotak (N) yang diperlukan untuk

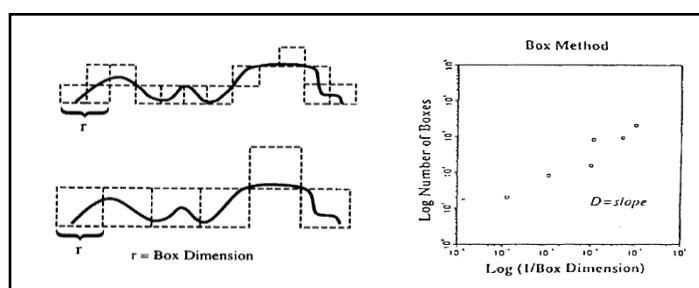
menutupi seluruh profil atau kontur dihitung. Ini diulang untuk serangkaian kotak berukuran berbeda (Kulatilake et al., 1995; Wang et al., 1993).

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log Nr(F)}{-\log r} \quad (1)$$

Keterangan :

$Nr(F)$ = jumlah kotak yang menutupi himpunan fraktal (F), r = panjang sisi kotak

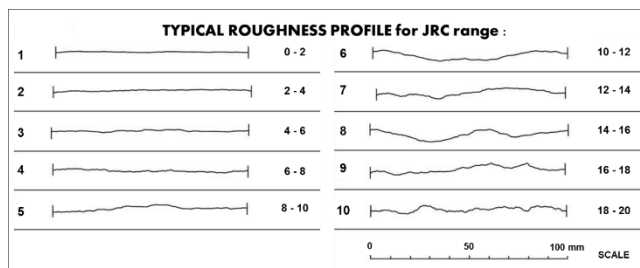
Hubungan antara banyaknya kotak versus $1/r$ (ukuran kotak) diplot pada plot log-log. Dimensi fraktal D sama dengan kemiringan plot (Gambar 6).



Gambar 6. Metode *Box Counting*, Ukuran kotak (r) dipilih dan jumlah kotak (N) yang menutupi seluruh profil atau kontur dihitung

Koefisien Kekasaran Kekar (JRC)

Kekasaran permukaan kekar batuan merupakan parameter penting mempengaruhi perilaku mekanik batuan massa. Perilaku geser dari kekar batuan sangat rumit dan dipengaruhi oleh banyak parameter, setiap model dan kriteria hanya untuk jumlah parameter yang terbatas. Model konstitutif Barton–Bandis menyediakan representasi paling realistis dari berbagai perilaku aspek kekar batuan yang diamati dalam eksperimen laboratorium, terutama non-linier perilaku normal dan geser, perilaku dinamis di bawah siklus normal dan beban geser, degradasi asperitas selama perpindahan geser, dan efek skala (Jing and Stephansson, 2007). Beberapa peneliti telah mencoba untuk menetapkan metode yang cocok untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan kekar batuan. JRC diperkenalkan oleh Barton untuk mengkarakterisasi kekasaran permukaan kekar batuan. (Barton and Choubey, 1977) mengembangkan 10 profil kekasaran dan koefisien yang ditetapkan mulai dari sekitar 0 - 20, masing-masing dari permukaan yang paling halus hingga yang paling kasar, sebagai ditunjukkan pada Gambar 7 dibawah ini.

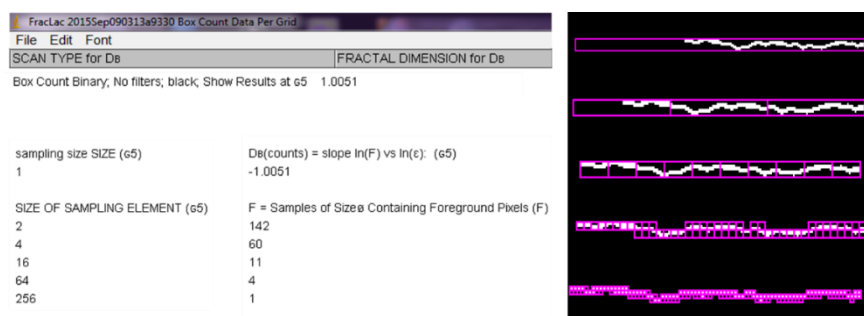


Gambar 7. Profil kekasaran dan nilai JRC yang sesuai (Barton and Choubey, 1977)

HASIL PENELITIAN

Perhitungan Dimensi Fraktal

Dalam perhitungan dimensi fraktal menggunakan perangkat lunak *ImageJ FracLac*, yaitu perangkat lunak untuk analisis gambar yang tersedia secara gratis yang ditulis dalam Java oleh *Wayne Rasband* dari US National Institut Kesehatan di *Bethesda, Maryland* (Karperien, 2004).

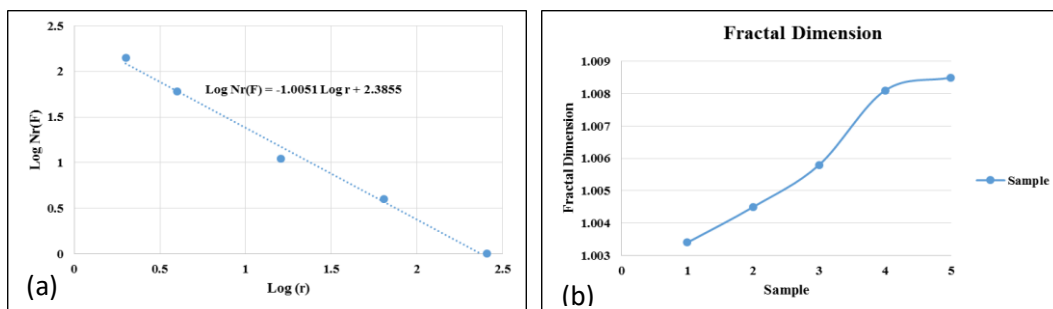


Gambar 8. Dimensi fraktal menggunakan perangkat lunak *ImageJ FracLac*

ImageJ FracLac digunakan untuk menganalisis kompleksitas secara objektif dan heterogenitas, serta beberapa ukuran biner dari gambar digital. Pola dapat dengan mudah diekstraksi dari berbagai jenis gambar dan dikonversi ke gambar digital biner yang dapat dianalisis dengan *FracLac*. Data masukan yang digunakan berupa gambar permukaan batuan yang telah di digitasi dengan format BMP, JPG, atau GIF. Pada gambar 8 menunjukkan hasil olahan pada perangkat lunak *ImageJ FracLac* dan plot *box counting* dimensi fraktal (Gambar 9a). Berikut nilai dimensi fraktal yang diperoleh untuk masing-masing sampel yang tertera pada tabel 2 dibawah ini:

Tabel 2. Tabel nilai dimensi fraktal untuk masing-masing sampel

Sampel	Litologi	Dimensi Fraktal						Rata-rata
		A	B	C	D	E	F	
S1	Batupasir sedang	1,0064	1,0079	1,0051	1,0039	1,0071	1,0039	1,0057
S2	Tuff Pasiran	1,0029	1,0073	1,0090	1,0067	1,0167	1,0080	1,0084
S3	Batupasir halus	1,0034	1,0024	1,0042	1,0055	1,0026	1,0022	1,0034
S4	Batupasir kasar	1,0069	1,0098	1,0108	1,0045	1,0106	1,0086	1,0085
S5	Batupasir halus	1,0019	1,0040	1,0037	1,0048	1,0065	1,0042	1,0045



Gambar 9. (a)Plot log hasil *Box Counting*, (b) Grafik Dimensi Fraktal dari sampel

Perhitungan Koefisien Kekasaran Kekar (JRC)

Ada dua cara untuk menentukan JRC dari profil permukaan. Dengan membandingkan profil kekasaran terukur dengan standar ISRM dan hubungan statistik empiris sebagai fungsi dari dimensi oleh beberapa peneliti terdahulu. Prosedur pembuatan persamaan baru (2) berdasarkan data penelitian menggunakan analisis regresi nonlinier antara nilai dimensi fraktal D dan JRC. Persamaan menunjukkan bahwa polinomial orde kedua optimal. Koefisien korelasi dan kesalahan standar yang dihitung untuk persamaan ini adalah 0,99 dan 0,98.

$$\text{JRC} = 2823,68D^2 - 4214,49D + 1391,15 \quad (2)$$

Persamaan dari peneliti sebelumnya antara lain :

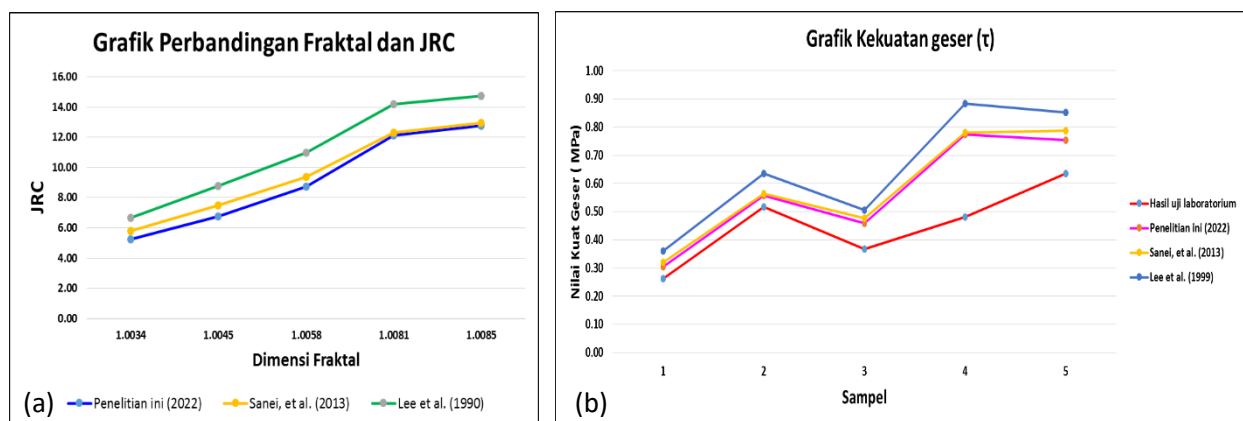
$$\text{(Sanei et al., 2013)} \quad \text{JRC} = -37580D^2 + 77018D - 39438 \quad (3)$$

$$\text{(Lee et al., 1990)} \quad \text{JRC} = -0,87804 + 37.7844 \left(\frac{D-1}{0,015} \right) - 16,9304 \left(\frac{D-1}{0,015} \right)^2 \quad (4)$$

Perbandingan hasil menunjukkan bahwa nilai yang diperoleh memiliki pola yang hampir sama dengan nilai sebelumnya. Tabel 3 dan Gambar 10 menunjukkan perbandingan dimensi fraktal dari peneliti sebelumnya dengan nilai yang diperoleh dalam penelitian ini.

Table 3. Hasil Perhitungan JRC

Sampel	Dimensi Fraktal	JRC / Kriteria N . Barton & Choubey, 1977		
		Penelitian ini (2022)	Sanei, et al. (2013)	Lee et al. (1990)
S1	1,0058	8,72/8-10	9,39/8-10	10,98/10-12
S2	1,0081	12,10/12-14	12,29/12-14	14,19/14-16
S3	1,0034	5,22/4-6	5,81/4-6	6,68/6-8
S4	1,0085	12,79/12-14	12,93/12-14	14,76/14-16
S5	1,0045	6,78/6-8	7,49/6-8	8,77/8-10



Gambar 10. (a) Grafik nilai JRC dan Dimensi Fraktal, (b)Grafik nilai kuat geser batuan

Perhitungan kuat geser menggunakan nilai JRC

Kekuatan geser dari kekar batuan umumnya dianggap sebagai yang paling kritis faktor kekuatan massa batuan, karena berhubungan erat dengan kestabilan massa batuan (Zhang et al., 2016). Perilaku deformasi kekar secara langsung uji geser tidak hanya bergantung pada morfologi kekar, kekuatan dan kualitas elastis dan keadaan di sekitar batu juga harus diperhitungkan saat menentukan geser deformasi kekuatan pada permukaan kekar. Kekuatan geser puncak kekar menunjukkan sifat anisotropik karena variasi kekasaran dengan perbedaan arah geser (Huang, T. H. & Doong, 1990; Jing et al., 1992). Menurut (Patton, 1966) kekasaran batuan meningkatkan kekuatan geser puncak(τ) dan sudut gesek dalam ϕ_b .

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + 1) \quad (4)$$

Keterangan:

τ = Kuat geser, σ_n = Tegangan normal, ϕ_b = Sudut gesek dalam

Perhitungan kuat geser menggunakan persamaan empiris (Barton et al., 1973; Barton and Bandis, 1990) sebagai berikut :

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\text{JRC} \log_{10} \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (5)$$

Keterangan :

τ = Kuat geser, σ_n = Normal stress, ϕ_r = Sudut gesek dalam residu, JCS = *Joint Compressive Strength*, JRC = *Joint Roughness Coefficient*. Sehingga diperoleh nilai kuat geser yang dapat dilihat pada tabel 4 dan grafik (Gambar 10.b) dibawah ini:

Table 4. Nilai Kekuatan Geser

Sampel	Hasil Laboratorium	Kekuatan Geser (τ) MPa		
		Penelitian ini	Sanei, et al. (2013)	Lee et al. (1990)
S1	0,26	0,30	0,32	0,36
S2	0,52	0,56	0,56	0,63
S3	0,37	0,46	0,48	0,51
S4	0,48	0,77	0,78	0,88
S5	0,63	0,75	0,79	0,85

Ukuran kebenaran model adalah *root mean squared error* (RMSE). RMSE adalah alat pemilihan model berdasarkan hasil estimasi kesalahan. Setiap kesalahan yang ada menunjukkan perbedaan antara hasil estimasi dan nilai estimasi. Nilai-nilai ini digunakan untuk menentukan model terbaik. Nilai RMSE yang rendah menunjukkan bahwa variabilitas nilai yang dihasilkan oleh model peramalan mendekati variabilitas nilai yang diamati. RMSE menghitung berapa banyak serangkaian nilai yang berbeda. Semakin kecil nilai RMSE, semakin dekat nilai prediksi dan nilai yang diamati. Perhitungan *Mean Absolute Deviation* (MAD) digunakan untuk mengukur keakuratan prediksi dengan merata-ratakan ukuran kesalahan prediksi, dan setiap prediksi memiliki nilai absolut dari setiap kesalahan. Berikut adalah rumus RMSE dan MAD yang digunakan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{m1} - T'_{m1})^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Keterangan :

n = Jumlah data i , T_{mi} dan T'_{mi} yang diukur nilai kuat geser dan nilai estimasi kuat geser masing-masing dengan persamaan empiris, Y_i = Nilai aktual, $\hat{Y}_i$ = Nilai prediksi.

Berikut hasil perhitungan RMSE dan MAD berdasarkan rumus empiris diatas:

Table 5. Hasil perhitungan RMSE and MAD

Peneliti	Perhitungan kuat geser (MPa)	RMSE	MAD
Penelitian ini	0,30 – 0,75	0,14	0,11
Sanei, et al. (2013)	0,32 – 0,79	0,16	0,13
Lee et al. (1999)	0,36 – 0,85	0,22	0,20

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian, kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter dimensi fraktal (D) dan JRC adalah dua parameter yang terkait. Semakin tinggi nilai D, akan meningkatkan nilai JRC. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran butir sampel. Untuk sampel ukuran butiran halus, nilai D berkisar antara 1,0034 hingga 1,0045, ukuran butir sedang 1,0057, dan ukuran butir kasar 1,0084 hingga 1,0085. Berdasarkan kriteria kekasaran Barton & Choubey (1977), nilai JRC dihitung menggunakan persamaan baru ini, pada sampel S1(8-10), S2(12-14), S3(4-6), S4(12-14), dan S5(6-8). Perbandingan nilai pada grafik menunjukkan pola yang hampir mirip dengan peneliti sebelumnya.
2. Terdapat perbedaan nilai kuat geser antara 0,04 – 0,29 MPa antara hasil perhitungan dengan hasil analisis laboratorium. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh tingkat kekasaran permukaan batuan menggunakan dimensi fraktal, yang memberikan nilai detail yang lebih tinggi. Dengan analisis statistik (RMSE dan MAD) menunjukkan nilai error yang kecil (mendekati nilai 0), yaitu hasil penelitian yang memiliki nilai RMSE (0,14) dan MAD (0,11) terendah. Artinya, hasil perhitungan menggunakan dimensi fraktal berkorelasi dengan data terukur dari uji geser laboratorium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada dosen Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, kawan-kawan geomekanika dan rekan-rekan di DSI Malang serta semua pihak yang telah mendukung sehingga jurnal ini dapat terselesaikan.

PUSTAKA

- Barton, N., Bandis, S., 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice, Rock Joint. ed. Balkema, Rotterdam.
- Barton, N., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech. Felsmechanik Mécanique des Roches 10, 1–54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1973. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support- Rock Mechanics, 6th ed. Norwegian.
- Brady, B.H.G., Brown, E.T., 2006. Rock Mechanics for underground mining: Third edition, Rock Mechanics for underground mining: Third edition. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9>
- Falconer, K., 1990. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. John Wiley & Sons, Chichester, England.

- Ficker, T., 2017. Fractal properties of joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 94, 27–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.02.014>
- Gao, M. zhong, Zhang, J. guo, Li, S. wei, Wang, M., Wang, Y. wei, Cui, P. fei, 2020. Calculating changes in fractal dimension of surface cracks to quantify how the dynamic loading rate affects rock failure in deep mining. *J. Cent. South Univ.* 27, 3013–3024. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4525-5>
- Huang, T. H. & Doong, Y.S., 1990. Anisotropic shear strength of rock joints, Barton & S. ed. Balkema, Loen, Norway.
- ISRM, 1978. Suggested Methods For The Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *J. Rock Mech. Min* 319-368.
- Jing, L., Nordlund, E., Stephansson, O., 1992. An experimental study on the anisotropy and stressdependency of the strength and deformability of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech* 29, 565–542.
- Jing, L., Stephansson, O., 2007. Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications. Elsevier.
- Karperien, A., 2004. FracLac for ImageJ. Charles Sturt University Australia.
- Kulatilake, P.H.S.W., Balasingam, P., Park, J., Morgan, R., 2006. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques. *Geotech. Geol. Eng.* 24, 1181–1202. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1219-6>
- Kulatilake, P.H.S.W., Shou, G., Huang, T.H., Morgan, R., 1995. New Peak Shear Strength Criteria for Anisotropic Rock Joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci Geomech* 32, 673-697.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J., Pan, G., 1997. Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method. *Rock Mech. Rock Eng.* 30, 181–206. <https://doi.org/10.1007/BF01045716>
- Kusumayudha, S.B., Zen, M.T., Notosiswoyo, S., Gautama, R.S., 2000. Fractal analysis of the Oyo River, cave systems, and topography of the Gunungsewu karst area, central Java, Indonesia. *Hydrogeol. J.* 8, 0271–0278. <https://doi.org/10.1007/s100400000072>
- Lee, Y.H., Carr, J.R., Barr, D.J., Haas, C.J., 1990. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 27, 453–464. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)90998-H](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)90998-H)
- Li, Y., Huang, R., 2015. Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 75, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.007>
- Maanijou, M., Daneshvar, N., Alipoor, R., Azizi, H., 2020. Spatial Analysis on Gold Mineralization in Southwest Saqqez Using Point Pattern, Fry and Fractal Analyses. *Geotectonics* 54, 589–604. <https://doi.org/10.1134/S001685212004007X>

- Mandelbrot, B.B., 1983. The Fractal Geometry of Nature, American Journal of Physics. <https://doi.org/10.1119/1.13295>
- Nayak, S.R., Mishra, J., Padhy, R., 2018. A new extended differential box-counting method by adopting unequal partitioning of grid for estimation of fractal dimension of grayscale images, Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8354-9_5
- Patton, F.D., 1966. Multiple modes of shear failure in rock. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech 509–513.
- Peitgen, H., Jurgens, H., Saupe, D., 1992. Fractal for The Class Room: Part One. Introduction to Fractals and Chaos 450.
- Sanei, M., Faramarzi, L., Goli, S., Fahimifar, A., 2013. Development of a new equation for joint roughness coefficient (JRC) with fractal dimension : a case study of Bakhtiary Dam site in Iran. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1147-3>
- Saptono, S., Sudarsono, Hartono, Fiorettha, K., 2014. Studi Kekuatan Geser Terhadap Pengaruh Kekasaran Permukaan Diaklas Batu Gamping 30–31.
- Suwarna, N., Santosa, S., Koesoemadinata, S., 1989. Peta Geologi Lembar Ende, Nusa Tenggara Timur. Pusat penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Van Zuidam, R.A., 1983. Guide to Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation & Mapping, Section of Geology and Geomorphology. ITC, Enschede, Netherlands.
- Wang, B., Lea, C., Y., J.S., 1993. Fractal Surfaces: Measurement and Applications in The Earth Sciences. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Ca 94706.
- Wang, M., Cao, P., Chen, Y., 2017. Anisotropy of Rock Profile JRC Values and Its Empirical Formula: A Case Study on Yellow Rust Granite. Geotech. Geol. Eng. 35, 1645–1655. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0199-7>
- Wilibardus, D., 2021. Longsor di Ende NTT, Akses Jalan Trans Flores Sempat Terputus. Liputan6.com.
- Xie, H., 1993. Fractal in Rock Mechanics. Geomechanics Research Series 1, China University of Mining and Technology, Xuzhou and International Centre for Material Physics, Academia Sinica, Shenyang.
- Zhang, X., Jiang, Q., Chen, N., Wei, W., Feng, X., 2016. Laboratory Investigation on Shear Behavior of Rock Joints and a New Peak Shear Strength Criterion. Rock Mech. Rock Eng. 49, 3495–3512. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1012-2>.