

PENDEKATAN ESTIMASI KOHESI DAN SUDUT GESER DALAM MENGGUNAKAN NILAI KUAT TARIK DAN KUAT TEKAN UNIAKSIAL BATUAN

APPROACH FOR ESTIMATING COHESION AND ANGLE OF INTERNAL FRICTION USING UNIAXIAL COMPRESSIVE AND TENSILE STRENGTH VALUES OF ROCKS

Sari Melati^{1*}, Romla Noor Hakim², Eko Santoso³, Muhammad Zaini Arief⁴

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

² Laboratorium Teknologi Mineral dan Batubara, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

³ Studio Permodelan dan Perencanaan Tambang, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

⁴ Program Studi Rekayasa Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

Jl. Jend. Ach. Yani KM 36,5 Banjarbaru, Kalimantan Selatan, Indonesia, 70714

*Penulis korespondensi: sari@ulm.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29th June 2025

Received in revised from 22th August 2025

Accepted 28th August 2025

Available online November 2025

Keywords:

Cohesion

Tensile strength

Uniaxial compressive strength

Empirical equation

Friction angle

ABSTRACT

Rock characteristics, such as failure criteria, play a critical role in the assessment of stability in rock engineering, alongside design factors. Stability in rock engineering is cohesion (c) and friction angle (ϕ) are parameters of failure criteria obtained by performing direct shear test or triaxial test. However, the measurements require a certain number of intact rock samples. On the restricted condition or preliminary study, an approach involves for predicting both parameters. Using data statistical analysis of Uniaxial Compressive Strength (σ_c) and Brazilian Tensile Strength (σ_t) of limestone and gypsum, empirical equations to predict c dan ϕ were resulted in this research. Cohesion is strongly determined by σ_t with average constants in equations: $c = 1.81\sigma_t$ dan $c = 1.84\sigma_t$, for limestone and gypsum. Cohesion of limestone depends on σ_c with average constant in equation: $c = 0.22\sigma_c$. Friction angle and rock strength ratio (σ_t/σ_c) are related by exponential equations: $c/\sigma_t = 2.1624e^{0.0314\phi}$ dan $\sigma_t/\sigma_c = 3.6936e^{0.0183\phi}$, for limestone and gypsum, respectively. This approach using constructed empirical equations provides the prediction of c and ϕ that relevant with theoretical values, indicated by 2.8% and 8.22% relative deviations. These empirical equations are useful for predicting the values of c and ϕ .

ABSTRAK

Karakteristik batuan seperti kriteria runtuh, di samping faktor desain, sangat berperan pada penilaian kestabilan dalam rekayasa batuan. Kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) merupakan parameter kriteria runtuh yang umumnya diperoleh melalui uji kuat geser atau uji triaksial. Akan tetapi, pengujian-pengujian tersebut membutuhkan jumlah sampel yang cukup dan kondisi sampel yang utuh. Pada kondisi jumlah sampel terbatas atau studi awal (pendahuluan), pendekatan lain dibutuhkan untuk menduga kedua parameter tersebut. Melalui analisis statistik dan korelasi terhadap data hasil uji

Kata Kunci:

Kohesi

Kuat Tarik

Kuat Tekan Uniaksial

Persamaan Empiris

Sudut Geser Dalam

ABSTRAK

kuat tekan uniaksial (Uniaxial Compressive Strength atau σ_c) dan kuat tarik (Brazilian Tensile Strength atau σ_t) dari sampel batugamping dan gipsum, hubungan empiris untuk memprediksi kohesi dan sudut geser dalam diberikan sebagai hasil dari penelitian ini. Kohesi sangat ditentukan oleh kuat tarik, dengan konstanta rata-rata pada persamaan: $c = 1.81\sigma_t$ dan $c = 1.84\sigma_t$, untuk batugamping dan gipsum. Kohesi juga ditentukan oleh kuat tekan pada batugamping dengan konstanta rata-rata persamaan: $c = 0.22\sigma_c$. Sudut geser dengan rasio kekuatan batu (σ_c/σ_t) membentuk hubungan eksponensial, $\sigma_c/\sigma_t = 2.1624e^{0.0314\phi}$ dan $\sigma_c/\sigma_t = 3.6936e^{0.0183\phi}$, untuk batugamping dan gipsum, berturut-turut. Pendekatan dengan persamaan empiris yang dibangun memberikan prediksi c dan ϕ yang cukup relevan dengan hasil perhitungan teoritis, yang ditunjukkan dengan perbandingan relatif 2.8% dan 8.22%. Persamaan-persamaan empiris tersebut bermanfaat untuk prediksi nilai c dan ϕ .

How to Cite This Article: Melati, S., dkk (2025). Pendekatan Estimasi Kohesi dan Sudut Geser Dalam berdasarkan Kekuatan Batuan. *INTAN: Jurnal Penelitian Tambang*, 8(2), 42–51. <https://doi.org/10.56139/intan.v8i2.315>

PENDAHULUAN

Karakteristik batuan, seperti kriteria runtuh, berperan penting dalam penentuan kestabilan suatu proyek rekayasa batuan, selain faktor desain. Kohesi (c) dan sudut geser dalam atau sudut gesek dalam (ϕ) merupakan parameter pada kriteria runtuh model konstitutif Mohr-Coulomb. Pada konstitutif ini, material dimodelkan mengalami deformasi elastoplastis ketika dikenai tegangan prinsipal mayor dan minor [1,2]. Batas antara deformasi elastik dan plastis didefinisikan oleh parameter kriteria runtuh. Sampai saat ini, Mohr-Coulomb masih menjadi kriteria runtuh yang umum digunakan untuk simulasi numerik batuan dan tanah baik pada penggalian permukaan maupun bukaan bawah tanah [3,4,5].

Sedikitnya lima data dari pengujian di laboratorium berupa uji kuat geser dan triaksial biasanya digunakan untuk membangun satu kurva instrinsik kriteria Mohr-Coulomb [6,7]. Pengujian-pengujian tersebut membutuhkan sejumlah sampel dalam kondisi utuh, set apparatus spesifik, dan prosedur pengujian yang harus dilakukan dengan baik. Pada tahap prospeksi atau studi awal (preliminary study) dimana perolehan sampel masih terbatas, diperlukan pendekatan lain untuk menduga nilai c dan ϕ yang merupakan parameter persamaan kriteria runtuh Mohr-Coulomb.

Adapun uji kuat tekan uniaksial dan kuat tarik membutuhkan masing-masing satu sampel untuk mendapatkan satu pengujian [8,9]. Kuat tarik biasanya didapat dari uji kuat tarik tidak langsung (Brazilian Tensile Strength Test) yang menggunakan alat yang sama dengan alat untuk uji kuat tekan uniaksial, sehingga teknis dan prosedur pengujian lebih sederhana dibanding uji kuat geser dan uji

triaksial. Selain itu, parameter kuat tekan uniaksial dan kuat tarik (σ_c/σ_t) serta Modulus Young (E) dan Poisson Ratio (ν) merupakan parameter-parameter untuk model konstitutif elastik dan getas (brittle). Oleh karena itu, uji kuat tarik dan kuat tekan lebih mungkin untuk diprioritaskan pada kondisi jumlah sampel yang terbatas.

Estimasi parameter geoteknik menjadi salah satu topik menarik yang sering ditemui dalam kajian maupun penelitian sebelumnya dan banyak membantu dalam pendekatan praktis [8]. Estimasi parameter geoteknik, seperti kekuatan geser [9], modulus deformasi [10], maupun sifat hidro-mekanik batuan [11], terus mengalami kemajuan seiring berkembangnya teknologi pengujian laboratorium, metode in-situ, serta pendekatan numerik dan berbasis *machine learning* [12,13]. Namun, karakteristik batuan seringkali bersifat spesifik sehingga ekstensi data empiris perlu dioptimalkan pemanfaatannya untuk memberikan hasil prediksi yang lebih relevan dan representatif. Pada penelitian ini dibandingkan dua geomaterial dengan perbedaan karakter kekuatan ekstrim: batuan kuat yang diwakili batugamping dan geomaterial lemah yang diwakili gipsum.

Pada penelitian ini, suatu pendekatan untuk menduga kohesi dan sudut geser dalam, dua parameter yang mendefinisikan kekuatan geser batuan, diusulkan melalui pembuatan persamaan empiris dari data-data uji lab kuat tekan dan kuat tarik batuan. Mempertimbangkan ketersediaan data empiris kuat tekan, kuat tarik, kohesi, dan sudut geser dalam, serta kemungkinan korelasi yang kuat antarpemerparameter, tujuan dari studi ini adalah memberikan persamaan-persamaan empiris dan konstanta-konstanta yang

dapat dimanfaatkan untuk memprediksi c dan ϕ dari σ_c dan σ_t .

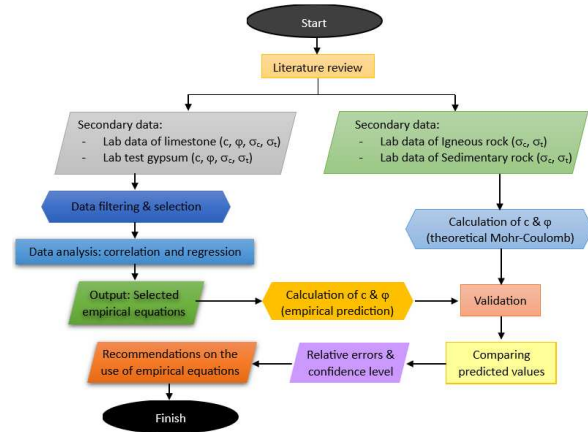
METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yang mengandalkan pengukuran objektif dan analisis matematis (statistik) terhadap sampel data. Data yang digunakan berupa data sekunder, yang terdiri atas 20 data kuat tarik dan kuat tekan batugamping serta 15 data kuat tarik dan kuat tekan gipsium. Data sekunder sampel batugamping diperoleh dari data uji laboratorium kuat tekan dan kuat tarik yang dilakukan oleh Nazir et al (2015). Sampel batugamping disebutkan didapat dari Malaysia. Tidak ada perlakuan khusus terhadap sampel, selain preparasi ukuran sampel sesuai standar uji kuat tekan dan kuat tarik [16]. Data sekunder gipsium diperoleh dari data uji laboratorium kuat tekan dan kuat tarik yang dilakukan oleh Heidari et al (2011). Sampel gipsium tersebut diambil dari Formasi Gachsaran (Miosen Awal) dari Cekungan Zagros, di bagian barat daya Iran. Kondisi sampel relatif segar, meskipun terdapat sedikit perubahan warna permukaan sampel sebagai indikasi pelapukan ringan [17]. Hipotesis (dugaan sementara) yang diajukan ialah ada hubungan antara σ_c dan σ_t dengan parameter c dan ϕ , dengan karakteristik berbeda pada batugamping dan gipsium, yang merepresentasikan batuan kuat dan lemah.

Alur penelitian ini digambarkan dengan *flow chart* pada Gambar 1. Sebaran data kuat tekan dan kuat tarik kedua sampel dianalisis untuk menentukan jenis distribusi data. Selanjutnya, bagaimana kuat tarik dan kuat tekan mengontrol nilai c dan ϕ dianalisis dengan memplot data dan menentukan sifat korelasinya. Jika antar parameter membentuk trend, persamaan dapat diberikan untuk memprediksi c dan ϕ . Jika belum ada kecenderungan yang jelas, maka dicoba analisis lanjutan berupa hubungan parameter dengan rasio kekuatan $\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t}\right)$. Rasio kuat tekan σ_c dan kuat tarik σ_t disebut juga dengan nisbah ketangguhan (toughness ratio) atau *indeks brittle* yang disebut juga BI atau *brittleness index* [18].

Model-model persamaan yang diuji terhadap diagram hubungan antarparameter kohesi dan sudut gesek dalam dengan kuat tarik dan kuat tekan, terdiri atas persamaan linier, logaritma, dan eksponensial. Sistem persamaan linier satu variabel adalah sistem persamaan dengan hanya terdapat sebuah variabel saja berpangkat 1. Bentuk umumnya: $ax + b = 0$, dengan a dan b adalah bilangan bulat bukan nol dan b konstanta. Persamaan logaritma adalah sebuah persamaan dalam bentuk logaritma yang memiliki variabel di bagian basis atau numerik atau keduanya. Secara umum, bentuk persamaan logaritma adalah sama dengan bentuk umum logaritma yaitu $^a\log b = ny = ax^b$. Bentuk fungsi exponential adalah $y = n \exp^{kx} + c$, dimana k dan c konstanta, $n \neq 0$. Dari ketiga persamaan ini, dipilih yang koefisien determinasinya

(R^2) paling tinggi sebagai persamaan empiris karena R^2 adalah ukuran statistik yang menunjukkan proporsi variabilitas dari variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam model regresi. Pada penelitian ini, variabel dependen adalah kohesi dan sudut gesek dalam, sedangkan kuat tarik dan kuat tekan sebagai variabel independen.



Gambar 1. Diagram prosedur penelitian

Terakhir, persamaan yang dipilih akan diuji untuk validasi menggunakan 35 data sekunder hasil perhitungan kohesi dan sudut gesek dalam batuan beku dan sedimen. Data sekunder diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Sivakugan et al, 2014. Sampel batuan terdiri atas: batuan beku asam butiran sedang, batuan karbobat teralterasi, batuan vulkanik asam butiran sedang, batuan sedimen butir halus, dan batuan breksi [19]. Data tersebut kemudian diseleksi untuk menghindari hasil yang bias. Pemilihan data dengan kriteria sudut gesek dalam harus lebih dari 10° . Kemudian terpilih sebanyak 29 data yang dapat diproses. Perbedaan nilai prediksi dan hasil pengujian dianalisis untuk menilai kualitas relevansi penerapan konstanta dan persamaan yang diperoleh dari studi ini.

Kriteria Runtuh Mohr-Coulomb

Kriteria runtuh Mohr-Coulomb menyatakan bahwa kuat geser (τ) dari suatu geomaterial isotropik berhubungan dengan tegangan normal σ_n yang bekerja pada bidang runtuh dengan normal n dengan persamaan:

$$\tau = c + \sigma_n f \quad (1)$$

yang mana c adalah kohesi; faktor gesekan adalah $f = \tan \phi$, dan ϕ merupakan sudut geser [20].

Ketika runtuh, (τ , σ_n) dan tegangan-tegangan utama (σ_1 , σ_2 , σ_3) dihubungkan oleh:

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi \quad (2)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos \phi \quad (3)$$

dimana σ_1 adalah tegangan prinsipal maksimum dan σ_3 adalah tegangan prinsipal minimum ketika runtuh. Parameter c dan ϕ ditentukan melalui persamaan-persamaan:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k \sigma_3 + d \quad (5)$$

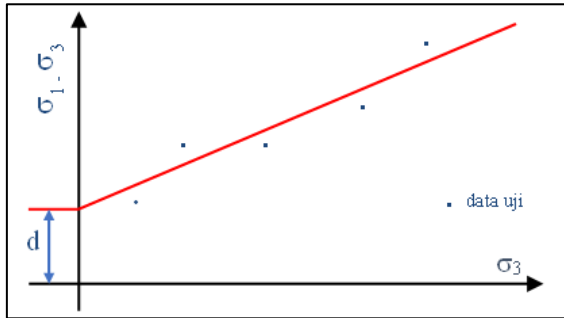
Dimana

$$k = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

dan

$$d = 2c \cos \phi \quad (7)$$

Selubung atau kurva Mohr-Coulomb dibentuk dari data-data uji lab. Sebagai contohh, pada Gambar 2, dari 5 data tegangan prinsipal mayor dan tegangan minor hasil uji triaksial, diperoleh kurva linier Mohr-Coulomb. Konstanta $d = 2 c \cos \phi$ menunjukkan *intercept* dimana garis selubung memotong sumbu tegangan deviatorik $\sigma_1 - \sigma_3$.



Gambar 2. Selubung Mohr-Coulomb

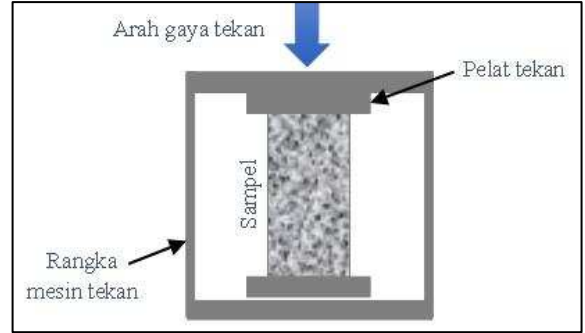
Kuat tekan uniaksial

Kuat tekan uniaksial didefinisikan sebagai nilai tekanan pada saat contoh batuan hancur dengan kondisi tekanan pemampatan sama dengan nol. Kuat tekan uniaksial dinyatakan dengan persamaan (8), dimana σ_c adalah kuat tekan uniaksial contoh batuan, F merupakan gaya yang bekerja saat contoh batuan runtuh, dan A merupakan luas penampang awal contoh batuan yang tegak lurus arah gaya [21]. Pada Gambar 3, diberikan ilustrasi penempatan sampel pada uji kuat tekan uniaksial batuan.

Luas penampang awal dihitung menggunakan rumus luas lingkaran sebagaimana persamaan (9), dimana r adalah radius penampang melintang contoh yang dikenai tekanan, dan bilangan π bernilai $\frac{22}{7}$.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (8)$$

$$A = \pi r^2 \quad (9)$$

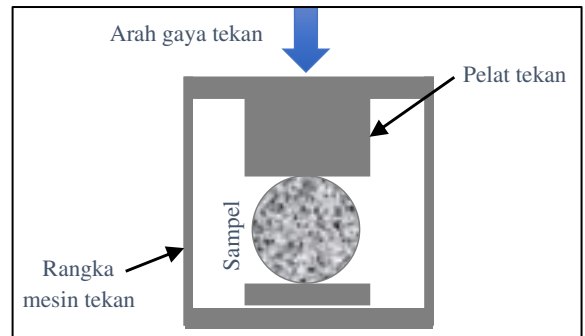


Gambar 3. Penempatan sampel pada uji kuat tekan uniaksial

Kuat tarik

Kuat tarik tidak langsung atau yang disebut dengan kuat tarik Brazilian diperoleh melalui pengujian dengan menempatkan sampel pada mesin tekan seperti terlihat di Gambar 4. Kuat tarik contoh batuan (σ_t) dapat dihitung menggunakan persamaan (10) dengan diketahui beban runtuh (F), diameter (D) dan tebal (t) dari contohh batuan [12].

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi Dt} \quad (10)$$



Gambar 4. Penempatan sampel pada uji kuat tarik tidak langsung

Hubungan teotiritis c dan ϕ dengan kekuatan

Lingkaran Mohr untuk uji UCS, seperti terlihat pada Gambar 5, memberikan hubungan teoritis antara c dan ϕ dengan kekuatan batuan, yaitu:

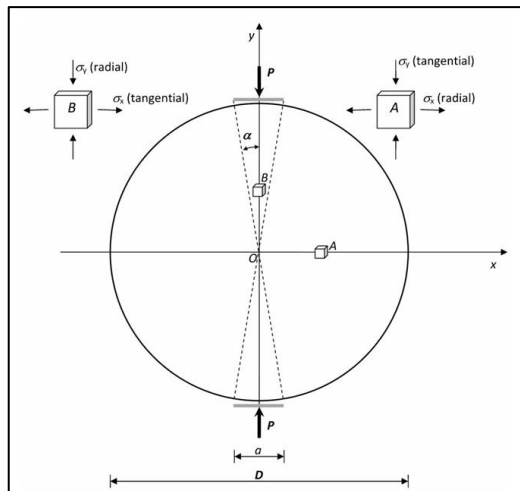
$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \quad (11)$$

$$C = \frac{0.5 \sigma_c \sigma_t}{\sqrt{\sigma_t (\sigma_c - 3\sigma_t)}} \quad (12)$$

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (13)$$

$$\sigma_t = \frac{c \cos \phi}{2 - \sin \phi} \quad (14)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{2(2 - \sin \phi)}{1 - \sin \phi} \quad (15)$$



Gambar 5. Ilustrasi tegangan pada uji kuat tarik tidak langsung [13]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi data kekuatan

Distribusi data kuat tarik batugamping menceng kanan (positive skew) dan terdapat *outlier* 14.2 MPa. Nilai tengah 6.72 MPa < rata-rata 7.15 MPa. Kuat tarik gipsum lebih rendah dari batugamping dengan distribusi data normal (boxplot simetris). Nilai tengah 3.85 MPa $\approx$ rata-rata 3.852 MPa. Kuat tekan batugamping paling tersebar datanya dengan rentang antara 21.18 – 100.7 MPa dan deviasi 19.04 MPa. Distribusi data menceng kanan (positive skew). Nilai tengah 56.55 MPa < rata-rata 59.64 MPa. Distribusi data kuat tekan gipsum mendekati normal (boxplot simetris) dimana nilai tengah 21.46 MPa $\approx$ rata-rata 21.98 MPa. Jadi, dari distribusi data hasil uji kuat tekan dan kuat tarik ini, diketahui bahwa data batugamping lebih tersebar dan memiliki distribusi *positive skew*, sedangkan data batugamping rentang datanya lebih kecil dan distribusi data normal.

Prediksi kohesi dan sudut gesek dalam

Kohesi dan sudut gesek dalam teoritis hasil prediksi menggunakan persamaan 11 dan 12 disajikan pada Tabel 1. Kohesi batugamping dan gipsum diperoleh ada pada rentang 5.29 – 24.89 MPa dan 4.46 – 9.70 MPa. Sudut gesek dalam batugamping dan gipsum diperoleh ada ada rentang 36.95° - 49.84°. dan 1.34° - 49.41°.

Perbandingan relatif antara dua jenis sampel memberikan kohesi yang lebih tinggi pada batugamping di samping gipsum, yang mana ini selaras dengan nilai kuat tekan dan kuat tariknya. Adapun untuk sudut gesek dalam, rata-rata nilai prediksi untuk batugamping relatif lebih tinggi dua kali dari nilai prediksi untuk gipsum. Ini juga dapat menjadi indikasi bahwa karakteristik nilai ϕ sesuai dengan karakteristik kekuatannya.

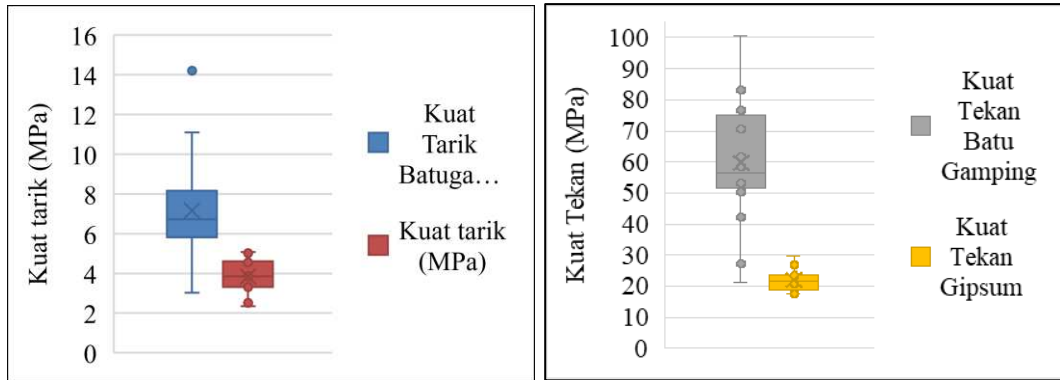
Hubungan kohesi dan sudut gesek dalam dengan kekuatan batuan

Plotting data kohesi terhadap kuat tekan dan kuat tarik menunjukkan adanya korelasi linier positif (Gambar 7 dan Gambar 8). Kohesi batugamping dan gipsum sangat ditentukan oleh kuat tarik gipsum, kuat tarik batugamping, dan kuat tekan batugamping. Kuat tekan gipsum terlihat memberikan trend kohesi yang acak dan cenderung menurun. Artinya, pada material yang sangat lunak seperti gipsum, kohesi tidak didefinisikan oleh kuat tekannya. *Plotting* data sudut gesek dalam terhadap kuat tekan dan kuat tarik tampak acak dan tidak memberikan trend yang jelas, selain bahwa terdapat perbedaan karakter area sebaran data antara batugamping dan gipsum (Gambar 9). Analisis lanjutan berupa hubungan antara sudut gesek dalam dengan rasio kekuatan atau brittleness indeks (BI) memberikan pola yang sangat baik, khususnya pada batugamping. BI memiliki hubungan eksponensial positif dengan sudut gesek dalam (Gambar 10). Persamaan-persamaan dari analisis korelasi data hasil prediksi berdasarkan perhitungan teoritis kohesi dan sudut gesek dalam, dirangkum pada Tabel 2. Sebagai tambahan, diberikan pula konstanta sebagai pendekatan praktis untuk menduga kisaran nilai kohesi dari kekuatan batuan.

Validasi hasil

Persamaan empiris dari studi ini ($c = 1.74\sigma_t + 0.47$ dan $\sigma_c/\sigma_t = 2.1624e^{0.0314\phi}$) digunakan untuk memprediksi nilai c dan ϕ dan membandingkannya dengan data hasil perhitungan teoritis pada sampel-sampel batuan kuat dari jenis batuan beku dan sedimen. Hasil perhitungan teoritis, prediksi dari persamaan empiris, dan perbandingan relatifnya diberikan pada Tabel 3.

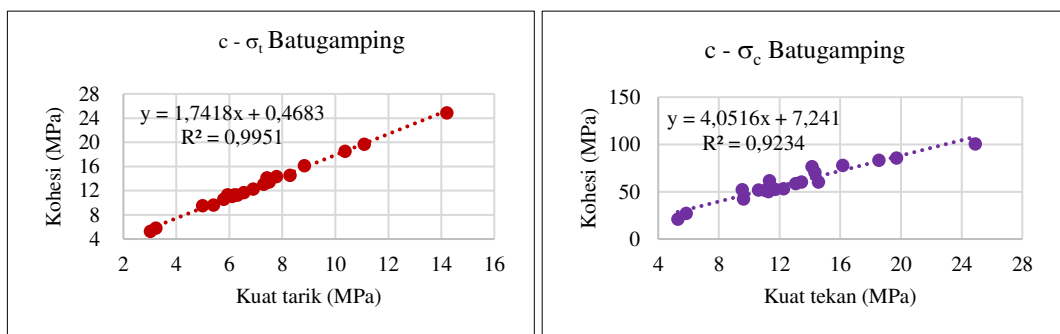
Kohesi batuan beku dan sedimen dapat diduga dengan baik menggunakan persamaan empiris dari data batugamping yang diberikan sebagai hasil studi ini. Ini ditunjukkan dengan perbedaan relatif rata-rata 3.41%. Sudut gesek dalam juga dapat diprediksi menggunakan persamaan empiris batugamping dengan perbandingan relatifnya yang lebih signifikan yaitu 8.22%. Hasil prediksi dari penelitian ini dapat dikatakan telah memberikan tingkat keyakinan 96.59% dan 91.88%, dan koefisien determinasi 0.92 – 0.99. Ini dapat dikatakan cukup layak apabila disandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh peneliti-peneliti lain, yang telah memprediksi parameter kohesi dan sudut gesek dalam menggunakan regresi berganda dan metode penanganan data grup, algoritma *machine learning*, regresi dan analisis *soft computing*, serta fusi elemen hingga dan *machine learning*. Koefisien determinasi hasil prediksi [22]; [23]; [24]; dan [25]; berturut-turut disebutkan: R^2 0.92; 0.6 – 0.97; 0.51 – 0.98; dan $R^2 > 0.9$ [22 – 25].



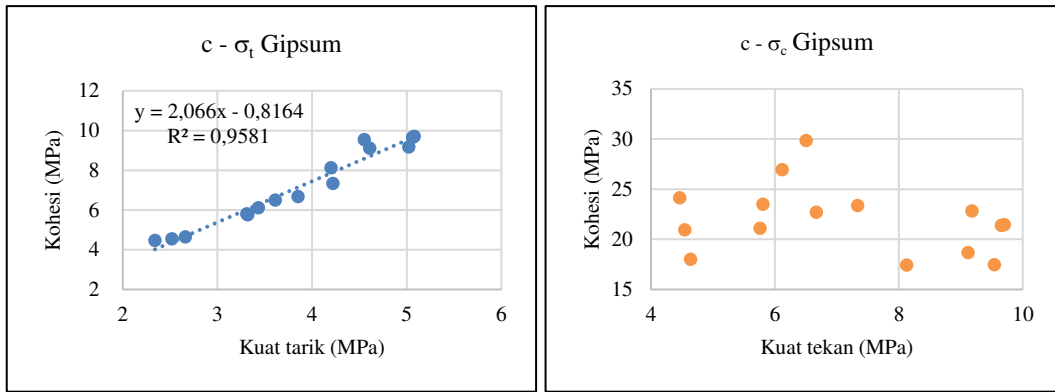
Gambar 6. Boxplot data kuat tekan dan kuat tarik sampel yang dianalisis

Tabel 1. Prediksi kohesi dan sudut gesek dalam dari kekuatan batuan

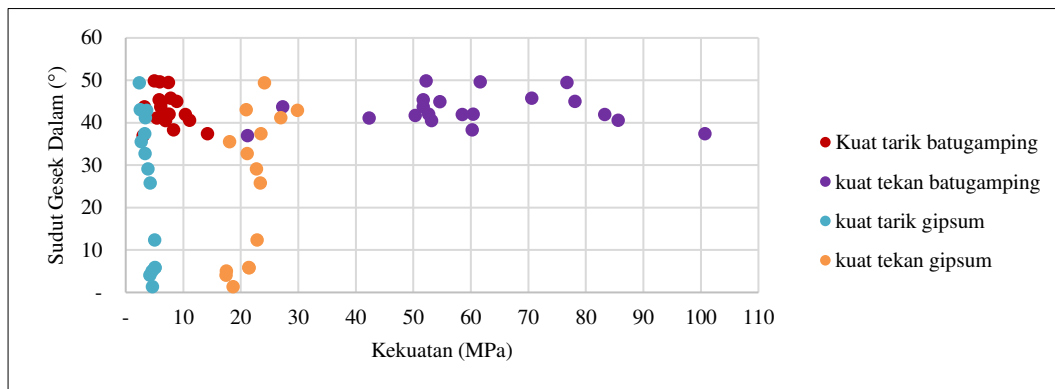
No Data	Batugamping				Gypsum			
	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)
1	3.02	21.18	36.95	5.29	3.31	23.48	37.40	5.80
2	3.22	27.29	43.72	5.83	4.61	18.66	1.34	9.12
3	4.98	52.20	49.84	9.54	4.20	17.44	4.06	8.12
4	5.40	42.30	41.08	9.62	3.43	26.95	41.19	6.11
5	5.78	51.73	45.42	10.60	2.66	18.02	35.53	4.64
6	5.93	61.61	49.61	11.33	4.55	17.46	5.08	9.54
7	6.10	51.70	43.72	11.05	3.61	29.84	42.91	6.50
8	6.20	54.60	44.92	11.33	3.85	22.69	29.10	6.67
9	6.30	50.30	41.74	11.27	4.22	23.37	25.77	7.33
10	6.54	52.67	42.04	11.71	5.08	21.46	5.79	9.70
11	6.90	53.14	40.48	12.25	5.02	22.82	12.38	9.18
12	7.29	58.50	41.92	13.05	2.34	24.13	49.41	4.46
13	7.41	76.67	49.50	14.14	5.06	21.40	5.90	9.65
14	7.50	60.4	42.04	13.43	2.52	20.93	43.06	4.54
15	7.78	70.56	45.81	14.32	3.32	21.11	32.76	5.76
16	8.28	60.20	38.35	14.57				
17	8.83	78.09	45.05	16.15				
18	10.36	83.26	41.97	18.55				
19	11.09	85.62	40.57	19.70				
20	14.20	100.7	37.39	24.89				
Min	3.02	21.18	36.95	5.29	2.34	17.44	1.34	4.46
Maks	14.20	100.70	49.84	24.89	5.08	29.84	49.41	9.70
Rerata	7.16	59.64	43.11	12.93	3.85	21.98	24.78	7.14



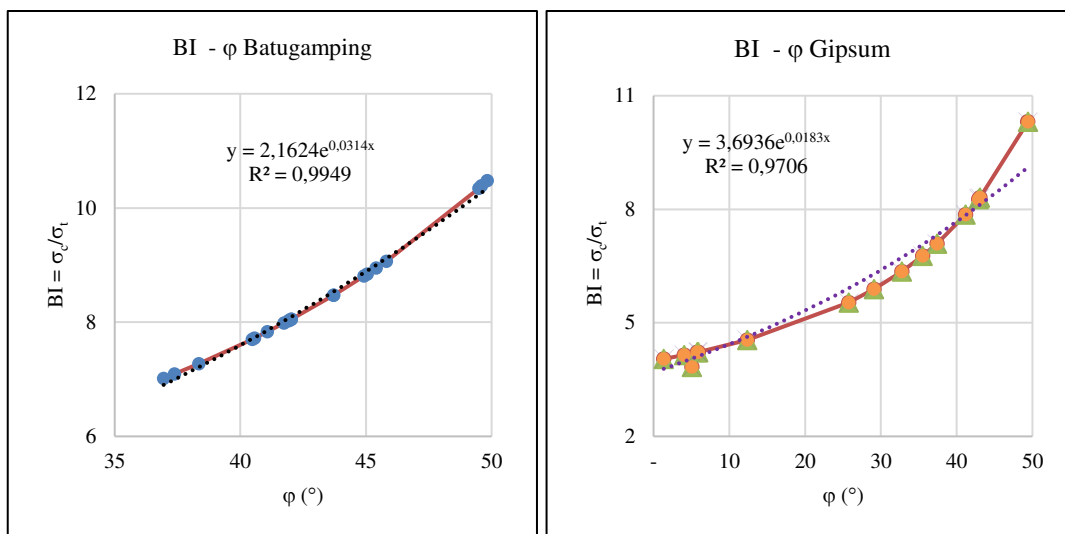
Gambar 7. Analisis Korelasi Kohesi Dengan Kuat Tarik Dan Kuat Tekan Batugamping



Gambar 8. Analisis Korelasi Kohesi Dengan Kuat Tarik Dan Kuat Tekan Gypsum



Gambar 9. Sebaran Data Sudut Gesek Dalam Dan Kekuatan Batuan



Gambar 10. Hubungan $BI = \sigma_c/\sigma_t$ dan ϕ

Dari hasil validasi ini dan perbandingan dengan hasil prediksi dari metode lainnya, sangat disarankan untuk mempertimbangkan karakteristik kekuatan batuan dalam memprediksi parameter kuat geser batuan (kohesi dan sudut gesek dalam) menggunakan persamaan empiris. Dengan demikian, ekstensi database (penambahan data) dari berbagai formasi batuan di seluruh dunia akan sangat membantu dalam meningkatkan pemahaman bersama terhadap karakteristik data dan model hubungan antarparameter propertis gemekanika batuan.

Tabel 2. Persamaan Empiris Untuk Prediksi c dan ϕ dari σ_c dan σ_t

Sampel	Persamaan	R ²
Batugamping	$c = 1.74\sigma_t + 0.47$	0.99
	$c = 4.05\sigma_c + 7.24$	0.92
	$\sigma_c/\sigma_t = 2.1624e^{0.0314\phi}$	0.99
	$c = 1.81\sigma_t$	
Gypsum	$c = 0.22\sigma_c$	
	$c = 2.066\sigma_t - 0.8164$	0.96
	$\sigma_c/\sigma_t = 3.6936e^{0.0183\phi}$	0.96
	$c = 1.84\sigma_t$	

Tabel 3. Persamaan Empiris Untuk Prediksi c dan ϕ dari σ_c dan σ_t

Nomor Data	Perhitungan teoritis		Persamaan empiris		Perbandingan relatif (%)	
	C (MPa)	ϕ (°)	C (MPa)	ϕ (°)	C	ϕ
1	36.20	43.70	35.24	43.46	2.70	0.55
2	38.00	32.70	38.56	34.34	1.46	4.88
3	27.10	40.70	26.95	40.62	0.54	0.19
4	24.50	41.40	24.36	41.25	0.57	0.35
5	28.20	30.08	28.78	33.05	2.04	9.40
6	27.30	30.03	27.91	32.68	2.21	8.44
7	35.30	44.70	34.16	44.48	3.29	0.49
8	40.40	21.00	40.40	27.41	0.01	26.49
9	28.70	50.80	26.22	51.44	9.02	1.26
10	33.90	33.30	34.49	34.75	1.72	4.27
11	12.20	54.50	10.84	56.53	11.80	3.65
12	35.50	35.00	35.97	35.99	1.30	2.79
13	35.50	14.40	34.64	24.47	2.44	51.82
14	38.00	20.60	38.02	27.22	0.05	27.69
15	44.10	29.20	44.74	31.98	1.43	9.08
16	29.70	27.50	30.62	30.61	3.06	10.72
17	29.40	34.60	29.91	35.70	1.72	3.14
18	23.10	45.20	22.39	45.06	3.10	0.31
19	40.90	39.90	40.66	39.98	0.58	0.19
20	42.50	33.60	43.08	34.93	1.36	3.88
21	32.20	51.40	29.11	52.27	10.08	1.69
22	29.70	47.60	28.10	47.66	5.53	0.12
23	39.70	34.60	40.16	35.65	1.15	2.98
24	49.30	38.40	49.19	38.68	0.22	0.73
25	50.70	50.20	46.30	50.69	9.07	0.96
26	21.40	41.70	21.25	41.60	0.72	0.24
27	34.80	28.30	35.37	31.43	1.64	10.47
28	18.40	44.80	18.01	35.44	2.15	23.33
29	28.30	20.40	28.40	27.14	0.34	28.34
Rata-rata	32.93	36.56	32.55	38.16	2.80	8.22

KESIMPULAN

Melalui penelitian ini diusulkan pendekatan baru untuk memprediksi kohesi dan sudut geser dalam, yaitu menggunakan persamaan empiris yang dibangun dari hasil uji lab kuat tarik dan kuat tekan batuan. Parameter model konstitutif Mohr-Coulomb berupa c dan ϕ telah dihitung menurut data sekunder hasil uji kuat tekan dan kuat tarik batugamping dan gipsum.

Persamaan empiris yang menghubungkan antara kekuatan sampel dengan parameter c dan ϕ juga telah berhasil didapatkan. Persamaan empiris dari batugamping yaitu $c = 1.74\sigma_t + 0.47$ dan $\sigma_c/\sigma_t = 2.1624e^{0.0314\phi}$ memiliki koefisien determinasi (R^2) 0.99. Persamaan-persamaan yang dibangun telah

divalidasi menggunakan data sekunder propertis hasil uji lab sampel-sampel batuan beku dan batuan sedimen, yang memberikan perbandingan relatif baik, yaitu 2.8% dan 8.22%. Dengan demikian, persamaan teoritis dan empiris hubungan c , ϕ , σ_c , σ_t , keduanya dapat berguna untuk memprediksi parameter yang belum diketahui, khususnya pada batuan kuat seperti batugamping. Adapun pada geomaterial yang lunak seperti gipsum, pendekatan menggunakan persamaan empiris masih terdapat kelemahan, yaitu kohesi sulit ditentukan dari kuat tekannya.

Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan memperluas cakupan jenis batuan sampel-sampel yang diuji untuk menambah pemahaman tentang pengaruh karakteristik batuan terhadap hubungan

antarpropertis, menambah jumlah data dengan data pengujian batu yang sama dari formasi berbeda, dan peluang pemanfaatan *machine learning* untuk pengolahan data dalam jumlah besar.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Penulis 1, 2, 3, dan 4 melakukan *literature review*, mengumpulkan data sekunder dari penelitian terdahulu, mengolah dan menganalisis data. Kemudian, penulis mendapatkan persamaan dan tingkat kepercayaan hasil secara terukur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada tim editorial (editor dan mitra bestari) dari Jurnal Intan yang membantu dalam proses pengulasan artikel ini. Terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan dosen Program Studi Teknik Pertambangan; teknisi, instruktur, asisten, dan mahasiswa yang tergabung dalam tim riset di Laboratorium Teknologi Pertambangan: Erwin Ramadhan, Rizky Hidayat, Halimatus Sa'diah, Pipit Helda Juliani, dan semua personel yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Schartzkopffa A, Sainokib A, Bruningd T, Karakuse M, Schartzkopffa A. A conceptual three-dimensional frictional model to predict the effect of the intermediate principal stress based on the Mohr-Coulomb and Hoek-Brown. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023;172.
- [2] Tian, D. and Zheng, H. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion. *Applied Sciences*, 13(9), p.5405. 2023.
- [3] Shi J, Yu Z, Jiang W, Zhan Z, Xia P. Sensitivity analysis and parameter selection of the modified Mohr-Coulomb model in foundation pit excavation in granite residual soil areas. *Discover Applied Sciences*. 2024; 6:653.
- [4] Li, Y., Gao, X., Yang, J. and Bai, E. Quantitative 3-D investigation of faulting in deep mining using Mohr-Coulomb criterion and slip weakening law. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1), p.10. 2025.
- [5] Abbas, N., Li, K., Wang, L., Fissaha, Y., Shah, K.S. and Saidani, T.. Evaluating Mohr-Coulomb and Hoek-Brown Strength Criteria for Rock Masses Using Probabilistic Assessment. *Geofluids*, 2025(1), p.3682700. 2025
- [6] Li, H., Pel, L., You, Z., & Smeulders, D. Stress-dependent Mohr-Coulomb shear strength parameters for intact rock. *Scientific Reports*. 2024; 1-16.
- [7] MacDonald, N., Day, J., & Diederichs, M. A critical review of laboratory multi-stage direct shear testing for rock fractures. *Proceedings of the Geo Niagara*, 2021.
- [8] Mahdi, D.S. and A Alrazzaq, A.A.A. Rock mechanical properties: A review of experimental tests and prediction approaches. *Iraqi Journal of Oil and Gas Research (IJOGR)*, 3(1), pp.106-115. 2023.
- [9] Zou, L. and Cvetkovic, V. A new approach for predicting direct shear tests on rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 168, p.105408. 2023.
- [10] Hussain, S., Muhammad Khan, N., Emad, M.Z., Naji, A.M., Cao, K., Gao, Q., Ur Rehman, Z., Raza, S., Cui, R., Salman, M. and Alarifi, S.S. An appropriate model for the prediction of rock mass deformation modulus among various artificial intelligence models. *Sustainability*, 14(22), p.15225. 2022.
- [11] Asem, P. and Gardoni, P. Rock hydromechanical parameters for rock foundation design: A database approach. In *Databases for Data-Centric Geotechnics* (pp. 50-101). CRC Press. 2024.
- [12] Mahmoodzadeh, A., Mohammadi, M., Ghafoor Salim, S., Farid Hama Ali, H., Hashim Ibrahim, H., Nariman Abdulhamid, S., Nejati, H.R. and Rashidi, S. Machine learning techniques to predict rock strength parameters. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(3), pp.1721-1741. 2022.
- [13] Suleymanov, V., El-Husseiny, A., Glatz, G. and Dvorkin, J. Rock physics and machine learning comparison: elastic properties prediction and scale dependency. *Frontiers in Earth Science*, 11, p.1095252. 2023.
- [14] Ulusay, R., & Hudson, J. SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials – 1979. In R. Ulusay, & J. Hudson, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. International Society of Rock Mechanics. 2007a.
- [15] Ulusay, R., & Hudson, J. SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials – 1979. In R. Ulusay, & J. Hudson, *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. International Society of Rock Mechanics. 2007b.
- [16] Nazir, R., Momeni, E., JahedArmaghani, D., & Amin, M. Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples. *Electron J Geotech Eng*. 2013; 18(1):1737-46.
- [17] Heidari, M., Khanlari, G., & Kaveh, M. Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths Predicting the Uniaxial Compressive and Tensile Strengths. *Rock Mech Rock Eng*. 2011.

- [18] Kramadibrata, S., Simangunsong, G., & Wicaksana, Y. *Teknik dan Analisis Penggalian Batuan*. Bandung: ITB Press. 2023.
- [19] Sivakugan, N., Das, B., Lovisa, C., & Patra, C. Determination of c and w of rocks from indirect tensile strength and uniaxial compression tests. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 59-65. 2014.
- [20] Dongshuai, T., & Zheng, H. The generalized Mohr-Coulomb failure criterion. *Applied Sciences*. 13(9):5405.2023
- [21] Melati, S. Studi Karakteristik Relasi Parameter Sifat Fisik dan Kuat Tekan Uniaksial Pada Contohh Batulempung, Andesit, Dan Beton. *Jurnal Geosapta. Jurnal Geosapta*. 5(2):133. 2019.
- [22] Chen, W., Khandelwal, M., Murlidhar, B.R., Bui, D.T., Tahir, M.M. and Katebi, J. Assessing cohesion of the rocks proposing a new intelligent technique namely group method of data handling. *Engineering with Computers*, 36(2), pp.783-793. 2020.
- [23] Shahani, N.M., Ullah, B., Shah, K.S., Hassan, F.U., Ali, R., Elkoth, M.A., Ghoneim, M.E. and Tag-Eldin, E.M. Predicting angle of internal friction and cohesion of rocks based on machine learning algorithms. *Mathematics*, 10(20), p.3875. 2022.
- [24] Köken, E., Strzałkowski, P. and Kaźmierczak, U. Estimation of cohesion for intact rock materials using regression and soft computing analyses. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1295, No. 1, p. 012001). IOP Publishing. 2024.
- [25] Zhu, D., Yu, B., Wang, D. and Zhang, Y. Fusion of finite element and machine learning methods to predict rock shear strength parameters. *Journal of Geophysics and Engineering*, 21(4), pp.1183-1193. 2024.