

MODIFIKASI MODEL RASIO POISSON BERBASIS TEGANGAN PADA BATU GAMPING KALILINGSENG

MODIFICATION OF THE POISSON RATIO MODEL BASED ON STRESS IN KALILINGSENG LIMESTONE

D. A. Saputro^{1*}, S. Saptono²

^{1,2}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta

^{1,2}Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta

e-mail: *112220055@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

Rasio Poisson adalah parameter deformabilitas yang bersifat dinamis dan dapat berubah terhadap tegangan, akan tetapi sering kali dianggap memiliki nilai yang konstan dalam analisis geoteknik. Pengabaian terhadap sifat dinamis dan penggunaan model tanpa kalibrasi pada batuan berpori fatal terhadap akurasi prediksi deformasi dan keamanan lubang bukaan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menyesuaikan dan memodifikasi model empiris universal yang telah diusulkan oleh Narimani, et al. (2025) agar sesuai dengan karakteristik batu gamping (*limestone*) dari Formasi Sentolo, khususnya area bekas tambang bawah tanah Kalilingseng. Metode eksperimental kuantitatif mengacu pada standar *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 2007) untuk pengujian kuat tekan uniaksial (UCS) dengan pengukuran kontinu tegangan aksial dan regangan lateral untuk analisis deformasi yang presisi. Analisis data memperlihatkan bahwa model asli dengan rentang sudut tangen 160° terlalu sensitif dan menghasilkan prediksi yang terlalu tinggi (overestimasi) pada batuan di area penelitian. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan modifikasi fungsi tangen dengan mempersempit rentang sudut menjadi $140(\sigma/\sigma_c) - 70$. Hasil penyesuaian kurva menunjukkan bahwa model modifikasi ini, dengan konstanta terkalibrasi $A=0,26$ dan $B=20$ untuk metode secan, $A=0,27$ dan $B=20$, $A=0,31$ dan $B=10$ untuk Tangen, $A=0,27$ dan $B=20$ untuk rata-rata, dapat memprediksi perubahan Rasio Poisson dengan akurasi yang lebih baik dibandingkan model aslinya. Validasi statistik menunjukkan peningkatan akurasi yang signifikan dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) rata-rata sebesar 32% dibandingkan dengan model aslinya. Model modifikasi ini direkomendasikan untuk prediksi deformasi lateral yang lebih realistis dalam desain geoteknik pada batuan sedimen lunak.

Kata kunci: rasio poisson, model, uji kuat tekan uniaksial, batu gamping

ABSTRACT

The Poisson's ratio is a dynamic deformability parameter that can change with stress, but is often considered to have a constant value in geotechnical analysis. Ignoring dynamic properties and using uncalibrated models on porous rocks is fatal to the accuracy of deformation predictions and the safety of excavations. This study aims to adjust and modify the universal empirical model proposed by Narimani et al. (2025) to suit the characteristics of limestone from the Sentolo Formation, particularly the former Kalilingseng underground mine area. The quantitative experimental method refers to the International Society for Rock Mechanics (ISRM, 2007) standard for testing uniaxial compressive strength (UCS) with continuous measurement of axial stress and lateral strain for precise deformation analysis. Data analysis shows that the original model with a tangent angle range of 160° is too sensitive and produces overestimations in predictions for rocks in the study area. Therefore, this study proposes modifying the tangent function by narrowing the angle range to $140(\sigma/\sigma_c) - 70$. The curve adjustment results show that this modified model, with calibrated constants $A=0.26$ and $B=20$ for the secant method, $A=0.27$ and $B=20$, $A=0.31$ and $B=10$ for Tangent, $A=0.27$ and $B=20$ for the average, can predict changes in the Poisson Ratio with greater accuracy compared to the original model. Statistical validation shows a significant increase in accuracy with an average Root Mean Square Error (RMSE) value of 32% compared to the original model. This modified model is recommended for more realistic lateral deformation predictions in geotechnical design on soft sedimentary rocks.

Keywords: poisson's ratio, model, uniaxial compression test, limestone

PENDAHULUAN

Pemahaman yang akurat mengenai parameter elastisitas batuan, khususnya Rasio Poisson (ν), sangat krusial dalam desain rekayasa batuan. Dibandingkan dengan parameter mekanis batuan lainnya yang dianggap vital, rasio poisson sering kali menjadi konstanta elastis yang terabaikan, padahal memiliki relevansi yang signifikan [1]. Secara definisi, *Poisson's ratio* merupakan perbandingan antara regangan lateral (tegak lurus) terhadap regangan aksial (searah beban) yang dialami oleh suatu material [2]. Walaupun kerap diasumsikan memiliki nilai yang konstan, literatur terkini menunjukkan bahwa ν berevolusi secara non-linier seiring peningkatan tegangan aksial hingga mencapai kegagalan.

Merespons kebutuhan akan prediksi yang lebih akurat tersebut, baru-baru ini dikembangkan model empiris non-linier universal yang menghubungkan ν dengan rasio tegangan ternormalisasi (σ/σ_c) [3]. Model ini menggunakan fungsi tangen dengan rentang sudut 160° (dari -80° hingga $+80^\circ$) untuk menangkap transisi dari fase elastis ke fase kerusakan retak (*crack damage*). Meskipun model ini terbukti akurat untuk batuan kristalin seperti granit dan batuan duktil seperti marl, penerapannya pada batu gamping (*limestone*) dengan karakteristik porositas tertentu menghadapi tantangan.

Penerapan langsung model ini pada beberapa jenis batuan sedimen berpori seperti batu gamping di area bekas tambang mangan bawah tanah Kalilingseng seringkali menghasilkan prediksi yang terlalu responsif atau curam pada batas-batas tegangan ekstrem. Batu gamping merupakan batuan yang tersusun dari sebagian besar kalsium karbonat yang berasal dari sisa organisme di lautan [4]. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik mikrostruktur dan mekanisme keruntuhan pori (*pore collapse*) yang berbeda dari batuan kristalin (granit) yang menjadi basis model awal. Karakteristik batuan sedimen akan menurun ketika terjadi peningkatan porositas, karena rongga yang diciptakan oleh porositas berfungsi sebagai bidang lemah dalam struktur batuan dan menyebabkan peningkatan regangan [4]-[6]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodifikasi persamaan konstitutif tersebut dengan menyesuaikan rentang argumen sudut tangen menjadi lebih konservatif ($140(\sigma/\sigma_c) - 70$). Tujuannya adalah untuk mendapatkan kurva prediksi yang lebih halus dan sesuai dengan data eksperimental batu gamping lokal, serta menentukan parameter kalibrasi A dan B yang sesuai.

Batu Gamping sering didominasi oleh mekanisme keruntuhan pori sebelum disusul oleh retakan mikroskopis. Pada formasi batu gamping lokal, penggunaan rentang sudut asli yang diusulkan yaitu (160°) akan menyebabkan nilai prediksi Rasio poisson akan meningkat secara drastis pada tegangan yang hampir mendekati puncak, yang mana tidak sesuai dengan data observasi dan karakteristik batu gamping itu sendiri.

Dimana kondisi porositas yang relatif besar seperti yang biasa ditemukan pada batu gamping akan menurunkan kekuatan batuan [5].

Maka dari itu, penelitian ini mengajukan modifikasi pada persamaan tersebut. Fokus utama dalam penelitian ini adalah menyesuaikan argumen fungsi tangen menjadi $140(\sigma/\sigma_c) - 70$ yang bertujuan untuk mempersempit rentang asimtotik, sehingga akan menghasilkan kurva prediksi yang lebih representatif bagi batu gamping khususnya pada area sekitar bekas tambang bawah tanah Kalilingseng. Akurasi prediksi nilai rasio poisson sangat penting apabila akan dilakukan desain penyanggaan pada lubang bukaan bekas tambangan mangan ini mengingat sering digunakan sebagai situs edukasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan konstanta kalibrasi yang disesuaikan untuk batuan pada area tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan yaitu persiapan sampel dan pengujian, perhitungan rasio poisson, evaluasi akurasi model.

Persiapan Sampel dan Pengujian

Pengujian yang dilakukan meliputi uji mekanik dan fisik batuan. Uji sifat fisik batuan bertujuan untuk memvalidasi karakteristik material sebelum diberikan beban mekanis melalui identifikasi parameter dasar, khususnya porositas. Sebagai indikator volume rongga dalam matriks batuan yang akan menjadi bidang lemah, nilai porositas yang terukur akan memberikan gambaran komprehensif mengenai tingkat kepadatan batuan yang mana berbanding terbalik dengan kekuatannya dalam menahan beban dan berpengaruh ke nilai rasio poissonnya. Persamaan untuk mencari nilai porositas adalah sebagai berikut:

$$n = \frac{(V_v)}{(V)} \times 100 \quad (1)$$

Dimana V_v merupakan volume pori dan V merupakan volume total batuan yang diperoleh dari berat sampel batuan kering dibagi densitas matriks batuan.

Sampel batu gamping diambil dari area bekas tambang mangan bawah tanah Kalilingseng dan dipersiapkan menjadi spesimen silinder dengan rasio panjang terhadap diameter (L/D) sebesar 2-2,5:1, sesuai standar *International Society for Rock Mechanics (ISRM)* [7] dengan total sampel sebanyak tujuh sampel. Jumlah tujuh sampel ini telah memenuhi ambang batas minimum yang direkomendasikan oleh ISRM yang mensyaratkan sekurang-kurangnya lima spesimen untuk mendapatkan nilai rata rata sifat mekanik yang representatif. Dengan demikian, data yang diperoleh dari ketujuh sampel ini dapat dianggap valid secara statistik untuk mewakili karakteristik mekanik batuan di lokasi penelitian.

Kuat Tekan Uniaksial (UCS) merupakan indikator fundamental yang memegang peranan krusial dalam analisis dan desain rekayasa mekanika batuan dan *reliable* dalam menentukan kekuatan batuan [4], [8], [9], [10]. Uji kompresi uniaksial (UCS) dilakukan menggunakan mesin uji servo-hidrolik dengan kontrol laju pembebanan konstan. Regangan aksial (ϵ_a) dan lateral (ϵ_l) direkam secara kontinu menggunakan *strain gauge* hingga sampel mengalami kegagalan.

Perhitungan Rasio Poisson

Rasio Poisson dihitung pada setiap interval tegangan. Sesuai rekomendasi literatur untuk stabilitas data, metode perhitungan yang digunakan yaitu secan, Tangen, dan rata-rata pada σ/σ_c 0,1 ; 0,6 ; 0,8. Pemilihan rasio tersebut dengan asumsi $\sigma/\sigma_c=0,1$ mewakili tahap penutupan retakan, $\sigma/\sigma_c=0,6$ mewakili tahap inisiasi retak, dan $\sigma/\sigma_c=0,8$ mewakili kerusakan retak [3]. Model asli yang diusulkan [4] didefinisikan sebagai berikut.

$$v = A + \frac{\tan\left(160\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)-80\right)}{B} \quad (2)$$

Dimana σ/σ_c merupakan tegangan ternormalisasi (0-1). Rentang sudut $[-80^\circ, 80^\circ]$ dipilih untuk mendekati asimtot fungsi tangen (90°) tanpa menyentuh nilai tak hingga. Variabel A adalah konstanta material yang merepresentasikan nilai dasar (*baseline*) atau nilai rata-rata dari rasio poisson batuan, sedangkan variable B adalah konstanta material yang mengontrol amplitudo atau tingkat sensitivits perubahan rasio poisson terhadap kenaikan tegangan dengan nilai rentang untuk batu kapur seperti yang tersaji pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rentang yang direkomendasikan untuk konstanta A dan B dalam model empiris yang diusulkan untuk berbagai jenis batuan [3]

Jenis Batuan	Skenario	Konstanta A	Konstanta B
Batu	Secan	0,26-0,32	12-20
Kapur	Tangen	0,27-0,36	5-10
	Rata-rata	0,27-0,32	10-20

Akan tetapi, guna menyesuaikan dengan data eksperimen batu gamping lokal yang memperlihatkan transisi deformasi yang lebih landai dibandingkan model awal, persamaan tersebut dimodifikasi menjadi:

$$v = A + \frac{\tan\left(140\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right)-70\right)}{B} \quad (3)$$

Dengan pengubahan skalar dari 160 menjadi 140 dan konstanta penggeser menjadi 70, rentang sudut berubah menjadi $[-70^\circ, 70^\circ]$. Perubahan ini akan mengurangi

kecuraman kurva pada titik awal dan titik akhir, sehingga akan memberikan fleksibilitas dan model lebih sesuai untuk batuan yang tidak bersifat sangat rapuh (*highly brittle*).

Evaluasi Akurasi Model

Evaluasi akurasi model dilakukan menggunakan tiga parameter statistik yaitu, *Root Mean Square Error* (RMSE) diterapkan sebagai indikator untuk mengevaluasi performa model regresi [11] dengan formula sebagai berikut.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

Lalu *Mean Absolute Error* (MAE) merupakan indikator yang digunakan untuk mengukur besaran rata-rata penyimpangan atau galat dalam suatu model [12]. Dengan formula sebagai berikut.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (5)$$

Kemudian *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) didefinisikan sebagai nilai rata-rata dari selisih persentase absolut antara data aktual dan data hasil prediksi [13]. Adapun formulasi untuk menghitung nilai MAPE adalah sebagai berikut.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

Dimana y_i dan \hat{y}_i pada ketiga rumus tersebut merupakan nilai yang diketahui dan nilai prediksi dari variabel yang digunakan.

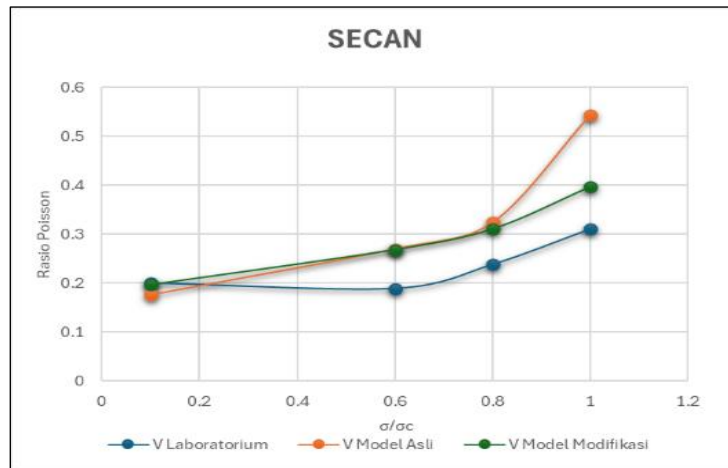
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku Fisik dan Mekanis Batu Gamping

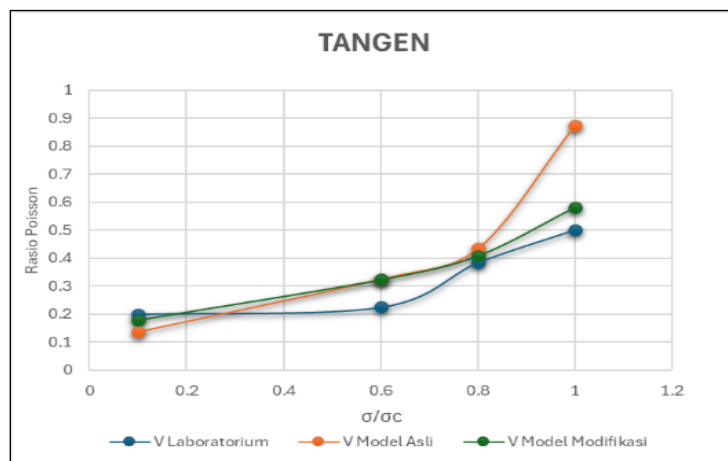
Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, batu gamping area bekas tambang bawah tanah Kalilingseng teridentifikasi memiliki porositas yang berada pada nilai rata-rata 16,54%, dimana pola hubungan antara tegangan dan regangan akan menunjukkan fase penutupan retakan yang berlangsung relatif cukup lama sebelum berlanjut ke fase elastis linear. Pada tabel 2 ditampilkan nilai porositas batu gamping yang diuji.

Tabel 2. Nilai porositas batuan

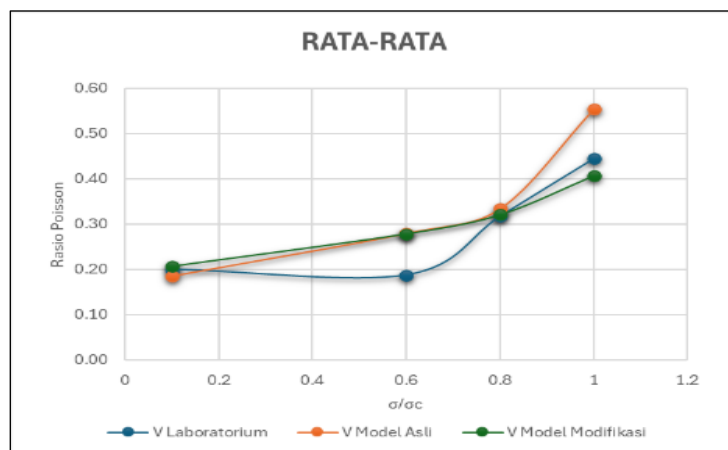
Nomor Sampel	Porositas (%)
1	17,42
2	16,01
3	14,31
4	17,36
5	18,42
6	15,06
7	17,20



Gambar 1. Perbandingan kurva prediksi model asli dan model modifikasi terhadap data eksperimen batu gamping dengan pendekatan secan



Gambar 2. Perbandingan kurva prediksi model asli dan model modifikasi terhadap data eksperimen batu gamping dengan pendekatan tangen



Gambar 3. Perbandingan kurva prediksi model asli dan model modifikasi terhadap data eksperimen batu gamping dengan pendekatan rata-rata

Analisis Kinerja Model Asli dan Modifikasi

Penerapan model asli (persamaan 2) dengan konstanta dari literatur untuk batu gamping adalah $A=0,26$ dan $B=20$ untuk metode secan, $A=0,31$ dan $B=10$ untuk metode tangen, kemudian $A=0,27$ dan $B=20$ untuk metode rata-rata. Nilai konstanta tersebut didapatkan dengan bantuan software Microsoft Excel Solver untuk mendapatkan konstanta paling optimal untuk dimasukkan ke model perhitungan asli dan modifikasi. Perbandingan hasil model perhitungan asli dan modifikasi terhadap data hasil uji untuk setiap pendekatan disajikan pada Gambar 1, 2, dan 3.

Pada Gambar 1, 2, dan 3 memperlihatkan perbedaan fundamental antara prediksi model asli dengan model yang telah dimodifikasi yang diusulkan pada penelitian ini. Model asli yang menggunakan rentang sudut tangen $\pm 80^\circ$ terlihat cenderung menghasilkan kurva yang sangat responsif dengan kelengkungan yang curam terutama pada fase pra-puncak. Pada sampel batu gamping area bekas tambang bawah tanah Kalilingseng, sensitivitas yang tinggi ini menyebabkan nilai prediksi dan rasio poisson meningkat terlalu cepat dan naik signifikan secara asimtotik sebelum kegagalan pada sampel terjadi. Fenomena ini menunjukkan bahwa model asli yang diusulkan, yang mana model asli ini dikalibrasi dengan batuan granit yang lebih kaku, akan melebihi-lebihkan laju dilatansi lateral pada batuan gamping yang cenderung lebih berpori dan lunak.

Sebaliknya penerapan model modifikasi (persamaan 3) yang telah dimodifikasi dengan mempersempit rentang sudut menjadi $140 \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right) - 70$ menghasilkan profil kurva yang lebih landai dan stabil. Pada Gambar 1, 2, 3 menunjukkan bahwa model modifikasi mampu menyesuaikan dengan data rasio poisson hasil pengujian dengan presisi yang lebih tinggi, khususnya pada transisi kritis dari fase elastis linier menuju fase inisiasi retakan mikro. Hal ini semakin memperjelas bahwa pengurangan rentang sudut pada persamaan model asli efektif dalam meredam fluktuasi yang signifikan, memberikan representasi yang lebih realistis terhadap perilaku deformasi batu gamping yang didominasi oleh kompaksi bertahap.

Evaluasi Akurasi Model

Untuk memvalidasi keandalan model yang diusulkan secara kuantitatif, evaluasi kinerja prediksi dilakukan dengan komprehensif menggunakan serangkaian parameter statistik, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang berfungsi untuk mengukur tingkat penyimpangan antara nilai rasio poisson hasil prediksi model asli dan model modifikasi terhadap data aktual hasil pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan hasil evaluasi keandalan model asli dan model modifikasi

	Model Asli			Model Modifikasi		
	RMS E	MAP E	MAE	RMSE	MAP E	RMS E
Secan	0,11	0,58	0,12	0,07	0,39	0,08
Tangen	0,14	0,56	0,16	0,06	0,32	0,07
Rata-rata	0,08	0,36	0,09	0,06	0,26	0,06

Besarnya penurunan Nilai RMSE yang mencapai rata-rata 32% untuk semua pendekatan perhitungan poisson rasio yaitu, secan, tangen, dan rata-rata menjadi indikator yang nyata untuk membuktikan bahwa hipotesis awal yaitu penyesuaian parameter sudut tangen sangat diperlukan untuk menyelaraskan sensitivitas model dengan respon kekakuan batuan, yang akhirnya memungkinkan permodelan perilaku batu gamping di area bekas tambang mangan bawah tanah Kalilingseng dengan tingkat presisi dan akurasi yang optimal.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa rasio poisson batu gamping lokal bersifat dinamis dan sangat bergantung pada tegangan sehingga asumsi bahwa rasio poisson bernilai konstan tidak lagi valid. Selain itu penelitian ini berhasil mengembangkan adaptasi model empiris untuk memprediksi nilai rasio poisson pada batu gamping khususnya pada area bekas tambang mangan bawah tanah Kalilingseng dari model asli yang diusulkan [3] yang terlalu sensitif saat diterapkan pada batuan sedimen yang lebih lemah khususnya pada uji ini. Modifikasi persamaan menjadi:

$$v = A + \frac{\tan\left(140\left(\frac{\sigma}{\sigma_c}\right) - 70\right)}{B}$$

terbukti memberikan prediksi yang lebih stabil dan akurat dengan meredam lonjakan nilai prediksi poisson rasio. Dengan parameter terkalibrasi $A=0,26$ dan $B=20$ untuk metode secan, $A=0,31$ dan $B=10$ untuk metode tangen, kemudian $A=0,27$ dan $B=20$ direkomendasikan untuk digunakan dalam analisis desain geoteknik di wilayah studi ini untuk meningkatkan keandalan faktor keamanan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Narimani, S., Davarpanah, S. M., & Vászrhelyi, B. (2024). Estimation of the Poisson's Ratio of the Rock Mass. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(1), 274-288
- [2] Raflesia, F., Haerudin, N., & Rustadi. (2017). Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro dan Poisson's Ratio di Lapangan Panasbumi Desert Peak Sebelum dan Sesudah Stimulasi



- Enhanced Geothermal System (EGS). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(2), 52-64.
- [3] Narimani, S., & Vászrhelyi, B. (2025). New Insights Into Poisson's Ratio Variability in Rocks Under Load. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 0, 1-16.
- [4] Latekay, P. P., Seran, L. G. R., Sa'ban, O. T., Hamdani, R. N., Edrian, Fikri, M. H., ... Betaubun, A. A. (2022). Analisis Karakteristik Massa Batuan Pada Batu Gamping Terhadap Kestabilan Lereng Di Kabupaten Madura. *Jurnal Sumberdaya Bumi Berkelanjutan (SEMATAN)*, 1(1), 451-458.
- [5] Ariyanto, K. D., Rabin, S., Saleky, D. B., Titirloloby, A., & Cahyono, Y. D. G. (2020). Analisis Pengaruh Porositas Terhadap Uji Kuat Tekan Uniaksial Pada Batu Gamping. *PROSIDING, Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMATAN II)*, 2(1), 467-471.
- [6] Heidari, M., Khanlari, G. R., Torabi-Kaveh, M., Kargarian, S., & Saneie, S. (2013). Effect of Porosity on Rock Brittleness. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(2), 1-6.
- [7] ISRM. (2007). Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials (1979). In R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006* (pp. 143-156). ISRM Turkish National Group.
- [8] Dharmansyah, R. G., Hidayatulloh, C. K., Samal, R. C., Saputra, D. W. T., Enggiarta, A. C. A., & Cahyono, Y. D. G. (2021). Prediksi Modulus Deformasi Batuan Menggunakan Modulus Elastisitas Batuan Pada Batu Gamping. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*, 9(1), 168-176.
- [9] Irwan, A. G., Rezky, D. M., & Winonazada, R. (2020). Pengaruh Porositas Terhadap Kuat Tekan Uniaksial Pada Batuan Sedimen. *PROMINE*, 8(2), 61-64.
- [10] Liang, M., Mohamad, E. T., Khun, M. C., & Alel, M. N. A. (2015). Estimating Uniaxial Compressive Strength of Tropically Weathered Sedimentary Rock Using Indirect Tests. *Jurnal Teknologi*, 72(3), 49-58.
- [11] Minaeian, B., & Ahangari, K. (2017). Prediction of the uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength of weak conglomerate. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1).
- [12] De Coning, E. (2013). Optimizing satellite-based precipitation estimation for nowcasting of rainfall and flash flood events over the South African domain. *Remote Sensing*, 5(11), 5702-5724.
- [13] Tsaur, R. C. (2012). A fuzzy time series-Markov chain model with an application to forecast the exchange rate between the Taiwan and US Dollar. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(7B), 4931-4942.