

Studi Eksperimental Sifat Fisik dan Mekanik Batu Gamping

*Bagas Aryaseta¹, Primasari Cahya Wardhani², Siti Zainab³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Indonesia

(korespondensi : *¹ bagas.aryaseta.ts@upnjatim.ac.id)

ABSTRAK

Telah dilakukan eksperimen pada spesimen Batu Gamping untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik. Pada percobaan ini digunakan metode non-destructive yaitu dengan menggunakan alat ultrasonik dan osiloskop. Hasilnya, alat ultrasonik dan osiloskop mampu dengan baik mengukur kecepatan gelombang P. Selain itu, penelitian ini juga meliputi pengukuran sifat fisik internal batuan seperti porositas dan densitas. Selanjutnya dilakukan perhitungan parameter-parameter mekanik Batu Gamping berdasarkan teori yang ada. Beberapa nilai parameter penting yang didapatkan antara lain *Compressional Wave Modulus (M)*, *Bulk Modulus (k)*, dan *Shear Modulus (μ)* adalah 58,72 GPa, 19,57 GPa, dan 29,36 GPa, berturut-turut.

Kata Kunci : batu gamping, gelombang P, gelombang S, modulus elastisitas

ABSTRACT

An experiment has been carried out on Limestone specimens to determine the physical and mechanical properties. In this experiment, a non-destructive method was used, namely by using an ultrasonic device and an oscilloscope. As a result, ultrasonic devices and oscilloscopes are able to measure the velocity of the P-wave very well. In addition, this research also includes measuring the internal physical properties of rocks such as porosity and density. Then, the mechanical parameters of Limestone are calculated based on the existing theory. Several important parameter values obtained such as *Compressional Wave Modulus (M)*, *Bulk Modulus (k)*, and *Shear Modulus (μ)* are 58.72 GPa, 19.57 GPa, and 29.36 GPa, respectively.

Keywords : limestone, P-wave, S-wave, modulus of elasticity

I. PENDAHULUAN

Batuan merupakan agregat keras alami yang terkumpul dan tersusun dari satu atau lebih mineral. Beberapa mineral yang membentuk suatu batuan disatukan oleh matriks mineral berupa semen. Proses fisik, kimiawi, dan biologis mampu merubah bentuk, struktur, maupun jenis batuan. Batuan juga mampu menyimpan fluida dalam bentuk cair ataupun gas ketika batuan tersebut rekah dan berporos. Berbagai kondisi tersebut akan mempengaruhi parameter sifat fisik batuan. Pemahaman tentang jenis-jenis batuan tentunya penting bagi pekerjaan rekayasa. Klasifikasi batuan dilakukan untuk mempermudah dalam memahami jenis-jenis batuan. Parameter sifat fisik maupun mekanik batuan dapat dideteksi secara praktis dengan menggunakan alat-alat pada laboratorium. Metode non destruktif dapat digunakan untuk memahami sifat fisik batuan dengan cara mengirimkan sinyal ke dalam batuan tanpa harus merusak batuan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat fisik batuan gamping melalui studi

eksperimen. Beberapa parameter yang dicari adalah berat jenis, porositas, sifat elastis dan sifat mekanik.

II. DASAR TEORI

2.1 Batu Gamping

Batu Gamping atau kapur yang dalam bahasa inggris disebut dengan Limestone adalah batuan sedimen yang terbentuk di lingkungan laut yang memiliki salinitas dan suhu tinggi. Serpihan cangkang hewan-hewan laut dan puing-puing lain yang terdiri dari ion kalsium dan bikarbonat diendapkan di dasar laut membentuk kalsit (CaCO_3) melalui reaksi kimia. Kalsit dan mineral lain tersebut mengeras menjadi Batu Gamping. Sisa-sisa hewan mungkin juga terkubur dalam lumpur karbonat dan akhirnya berubah menjadi fosil. Seiring waktu, kenaikan dan penurunan permukaan laut dapat mengekspos lapisan batu kapur di permukaan bumi. Batu Gamping yang mengandung lebih dari 95% kalsium karbonat dikenal sebagai Batu Gamping berkalsium tinggi. Batu Gamping

umumnya didominasi oleh butir-butir berbentuk bulat (oid) berdiameter 0.2-0.5 mm. Bagian dari molekul kalsium jika digantikan oleh magnesium, dikenal sebagai batu kapur magnesium $MgCO_3$ atau batugamping dolomit $CaMg(CO_3)_2$ [1][2][3].

Batu Gamping memiliki nilai densitas pada rentang 2.5-2.7 kg/cm^3 . Porositas pada Batu Gamping cenderung bernilai rendah yaitu pada rentang nilai 4-25%. Semakin tua Batu Gamping maka nilai densitas akan semakin tinggi dan nilai porositas akan semakin rendah. Hal ini disebabkan semakin bertambahnya usia maka waktu yang dibutuhkan untuk proses sementasi dan konsolidasi akan semakin banyak juga. Oleh karena itu, semakin tua Batu Gamping maka semakin kuat Batu Gamping tersebut. Nilai kuat tekan bebas berkisar dari 10-170 Mn/m^2 . Nilai Modulus Young tidak konstan pada Batu Gamping tetapi berhubungan erat dengan kekuatan Batu Gamping. Nilai Modulus Young Batu Gamping bervariasi dari 8×10^3 - 75×10^3 Mn/m^2 . Semakin tua Batu Gamping maka nilai Modulus young akan semakin besar [4].

Tabel 1. Sifat Fisik Batu Gamping

Hardness	3 to 4 on Moh's Scale
Density	2.5 to 2.7 Kg/cm^3
Compressive Strength	60-170 N/mm^2
Water Absorption	Less than 1%
Porosity	Quite low
Weather Impact	Resistant

Studi tentang sifat fisik dan mekanik Batu Gamping sudah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti. Assefa et al. (2003) meneliti tentang kecepatan gelombang P dan S ketika pada Batu Gamping menggunakan alat ultrasonik. Kecepatan Gelombang P dan S menurun secara signifikan seiring dengan bertambahnya porositas pada Batu Gamping. Adanya air pada pori Batu Gamping juga menyebabkan turunnya nilai *Shear Modulus* sebesar 2 GPa [5]. Meng et al. (2019) meneliti tentang efek suhu tinggi yang diberikan pada Batu Gamping terhadap perubahan sifat fisik dan karakter mikro-struktur Batu Gamping. Hasilnya menunjukkan massa dan kecepatan gelombang P Batu Gamping menurun seiring kenaikan temperatur. Peningkatan suhu tinggi antara 200-500 derajat Celcius menyebabkan dekomposisi mineral dan peningkatan porositas Batu Gamping secara bertahap [6]. Penelitian yang hampir sama dilakukan oleh González-Gómez et al (2015) yang mempelajari pengaruh efek termal pada sifat fisik Batu Gamping dari Yucatan Peninsula [7]. Beberapa batuan gamping yang diteliti mengalami penurunan kekuatan, modulus young, dan sifat mekaniknya seiring

kenaikan temperatur. Hal ini disebabkan karena perubahan komposisi mineral dari Batu Gamping. Seperti yang teramati, mineral batuan berubah dari geotit ke hematit [7]. Penelitian lain oleh Yang et al. (2019) menunjukkan efek perubahan termal pada Batu Gamping secara signifikan mempengaruhi sifat mekanik dan dapat menyebabkan kerusakan pada Batu Gamping. Ini ditunjukkan dengan meningkatnya parameter thermal damage factor secara bertahap dengan meningkatnya suhu [8]. Selain itu, studi tentang korelasi nilai gelombang P dengan sifat fisik dan mekanik dari Batu Gamping dilakukan oleh Arman (2021). Hasilnya menunjukkan bahwa gelombang P dapat dengan efektif memprediksi sifat fisik dan mekanik seperti kuat tekan bebas, *point load index*, *durability index*, berat jenis, massa jenis, *water absorption* dan *n-values* [9].



Gambar 1. Spesimen Batu Gamping

Batu Gamping yang tersementasi dengan keras dapat digunakan sebagai bahan bangunan dan merupakan bahan yang sangat baik untuk campuran pembuatan semen. Batu kapur yang direkristalisasi membutuhkan pemrosesan yang baik dan biasanya digunakan sebagai batu hias dan bangunan. Batu Gamping yang berpori dan memiliki permeabilitas tinggi juga berfungsi sebagai lapisan akifer air tanah maupun sebagai reservoir minyak bumi [2].

2.2 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat fisik batuan meliputi massa jenis (densitas), berat jenis, kadar air, derajat kejenuhan, porositas dan angka pori. Sedangkan sifat mekanik batuan merupakan sifat batuan ketika diberikan uji gaya eksternal yang merusak (destructive) meliputi uji kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, dan poisson's ratio [10], [11]. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi sifat fisik dan mekanik dari Batu Gamping. Sifat fisik Batu Gamping diuji dengan melakukan pengukuran langsung pada Batu Gamping. Sedangkan pengujian sifat mekanik dilakukan dengan cara non-destructive yaitu dengan menggunakan gelombang yang dialirkan melalui alat ultrasonik [9], [12]. Beberapa sifat mekanik batuan yang didapat dari penelitian ini antara lain adalah *Compressional Wave Modulus* (M), *Shear Modulus* (k), *Bulk Modulus* (μ), dan *Poisson's Ratio* (ν).

Densitas atau massa jenis adalah sifat khas dari suatu zat. Massa jenis didefinisikan sebagai massa (m) per satuan volume (V). Massa atom, ukurannya dan cara penyusunannya menentukan massa jenis suatu zat. Densitas berkaitan erat dengan porositas dan sifat seismik dari suatu benda. Satuan SI untuk densitas adalah kg/m³ [13]. Densitas rata-rata (bulk density) Batu Gamping berkisar antara 1.5-2.7 g/cm³ [14], [15].

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Porositas adalah sifat dasar yang menggambarkan potensi batuan untuk menyimpan fluida (air, gas, dan minyak). Fluida yang mengisi pori-pori batuan tersebut akan mempengaruhi sebagian besar sifat fisis batuan seperti densitas, kecepatan gelombang elastis, resistivitas elektrik, dll. Porositas adalah perbandingan antara volume pori dengan volume total batuan. Oleh karena itu, besar nilai porositas ditentukan oleh jenis batuan, distribusi pori, sementasi, sejarah diagenesis dan komposisi material dari suatu batuan. Porositas merupakan parameter fraksi volume yang tidak memiliki dimensi. Biasanya porositas dinyatakan dalam presentase.

$$\phi = \frac{\text{Volume of pores}}{\text{bulk volume}} = \frac{\text{bulk volume} - \text{volume of solid minerals}}{\text{bulk volume}}$$

Studi sifat elastisitas pada suatu benda berarti menguji perilaku elastisitas benda ketika diberi daya tegangan maupun regangan. Elastisitas diartikan sebagai kemampuan suatu benda untuk Kembali ke keadaan awal segera setelah gaya luar yang diberikan pada benda hilang. Hukum Hooke menggambarkan perilaku bahan elastis dan menyatakan bahwa untuk deformasi kecil maka regangan yang dihasilkan sebanding dengan tegangan yang diberikan. Modulus elastisitas adalah rasio tegangan terhadap regangan. Terdapat tiga jenis modulus elastisitas berdasarkan jenis gaya regangannya. Tiga jenis modulus elastisitas tersebut adalah Young's Modulus, Bulk Modulus dan Shear Modulus. Ketiga jenis modulus ini dapat diturunkan melalui persamaan gelombang bodi (gelombang P dan S) [9], [16], [17].

Persamaan Kecepatan Gelombang P (*Compressional or Longitudinal Wave*):

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho \rho(1+v)(1-2v)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + (4/3)\mu}{\rho}}$$

Persamaan Kecepatan Gelombang S (*Shear or Transversal Wave*):

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+v)}}$$

Dengan:

M = *Compressional Wave Modulus*

E = *Young's Modulus*

ρ = *Bulk Density*

Young's Modulus (E) adalah rasio tegangan tekan (tarik) uniaksial terhadap regangan yang dihasilkan. Maka, hubungan E dengan V_p:

$$E = \rho \cdot V_p^2 \frac{(1+v)(1-2v)}{1-v} = \rho \cdot V_p^2 \frac{3 \cdot V_p^2 - 4 \cdot V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$$

Compressional Wave Modulus (M) didefinisikan sebagai rasio tegangan terhadap regangan dalam keadaan regangan uniaksial. Berikut ini adalah hubungan antara modulus gelombang kompresi dengan V_p:

$$M = \rho \cdot V_p^2$$

Bulk Modulus (k) adalah perubahan volume di bawah tekanan hidrostatis (yaitu rasio tegangan terhadap regangan) (k adalah kebalikan dari kompresibilitas):

$$k = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)$$

Shear Modulus (μ) adalah rasio tegangan geser (torsional) terhadap regangan geser:

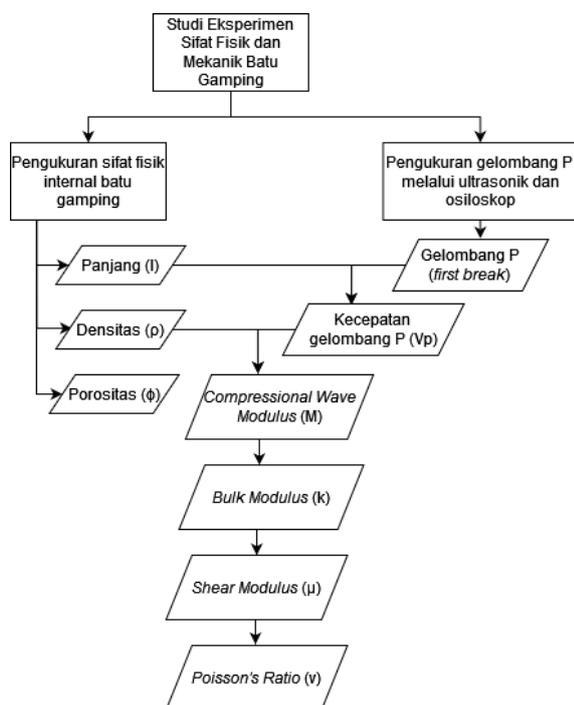
$$\mu = \rho \cdot V_s^2$$

Poisson's Ratio (v) adalah ukuran perubahan geometrik bentuk di bawah tekanan uniaksial.

$$v = \frac{1 (V_p/V_s)^2 - 2}{2 (V_p/V_s)^2 - 1}$$

III. METODOLOGI

Eksperimen dilakukan pada spesimen silinder Batu Gamping dengan panjang 2.7 cm, diameter 6 cm, dan porositas 21% (Gambar 1). Satu set peralatan ultrasonik digunakan untuk mengirim gelombang ke spesimen Batu Gamping. Untuk melakukan uji ultrasonik pada spesimen Batu Gamping dilakukan dengan cara mengimpit spesimen Batu Gamping diantara probe sender dan receiver. Kemudian perangkat ultrasonik mentransmisikan gelombang P dan gelombang S ke dalam spesimen batuan. Selanjutnya, Wavelet dideteksi dan ditampilkan pada alat osiloskop. Perubahan tegangan sinyal dapat diplot pada osiloskop dan disajikan dari waktu ke waktu. Sehingga memungkinkan hasil eksperimen untuk dianalisis.



Gambar 2. Diagram Alir Eksperimen

Data wavelet yang didapat pada osiloskop inilah yang kemudian direkam dan disimpan di komputer. Data tersebut kemudian diolah di software Ms. Excel. Data ini meliputi data amplitudo (A) dan waktu periode gelombang (T). Data waktu sebelum gelombang ditransmisikan, ketika menerima gelombang pertama, dan ketika gelombang teredam secara penuh juga ikut termasuk [12].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen diawali dengan perhitungan massa dan volume Batu Gamping. Spesimen Batu Gamping yang digunakan dalam penelitian ini memiliki panjang 2,7 cm

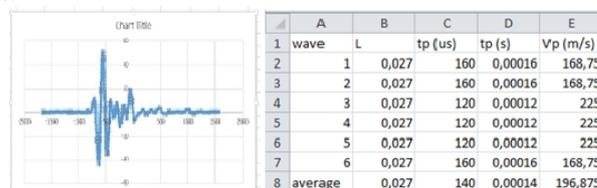
dan diameter 6 cm. Setelah dilakukan penimbangan dengan menggunakan neraca digital, diperoleh berat Batu Gamping adalah 90,889 g atau 0,0090889 kg. Pengukuran volume dilakukan dengan cara memasukkan Batu Gamping kedalam gelas ukur yang berisi air. Selisih volume gelas ukur berisi air sebelum dan sesudah diberi Batu Gamping adalah volume Batu Gamping. Volume Batu Gamping yang diperoleh adalah 60 cc atau $6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$. Selanjutnya adalah pengukuran densitas dengan cara membagi massa dengan volume Batu Gamping. Maka diperoleh:

$$\rho = \frac{0,090889 \text{ kg}}{6.10^{-5} \text{ m}^3} = 1514,817 \text{ kg/m}^3$$

Untuk menghitung nilai porositas, dilakukan perhitungan kasar untuk memperkirakan jumlah pori dibandingkan dengan matriks batuan. Diperkirakan sampel Batu Gamping memiliki porositas sebesar 21%. Kemudian perhitungan kecepatan Gelombang P (V_p) dilakukan dengan cara membagi panjang Batu Gamping dengan waktu kedatangan Gelombang P (t_p). Alat ultrasonic dan osiloskop digunakan untuk mengetahui sifat-sifat gelombang ketika merambat melalui Batu Gamping. Untuk menentukan waktu tempuh gelombang P, dilakukan dengan cara pengamatan data first break gelombang P melalui osiloskop. Rata-rata waktu Gelombang P tiba kira-kira adalah 140 μs atau 0.00014 s. Jadi, kecepatan Gelombang P (V_p) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_p = \frac{\text{Length of limestone (L)}}{\text{arrival time of Pwaves (} t_p \text{)}}$$

Dari eksperimen, diambil 6 data pengukuran kedatangan gelombang P, yang kemudian dilakukan perhitungan menggunakan Ms. Excel (Gambar 4) untuk mendapatkan nilai rata-rata kecepatan Gelombang P. Nilai rata-rata kecepatan Gelombang P (V_p) adalah 196,875 m/s.



Gambar 3. Gelombang P dan Kalkulasi Kecepatan Gelombang P (V_p) menggunakan software Ms. Excel

Selanjutnya adalah perhitungan sifat mekanik Batu Gamping meliputi perhitungan *Compressional Wave Modulus (M)*, *Shear Modulus*, *Bulk Modulus*, dan *Poisson's Ratio* berdasarkan persamaan dan teori. Selain itu, juga dilakukan perhitungan kecepatan Gelombang S.

- *Compressional wave modulus* (M)

$$M = \rho \cdot V_p^2 = 1514,817 * (196,875)^2 = 58713951,88$$

- *Shear modulus* (μ)

$$\mu = \frac{M - \lambda}{2} = \frac{58713951,88 - 0,029534203}{2} = 29356975,93$$

- *Bulk modulus* (k)

$$k = M - \left(\frac{4}{3}\right)\mu = 58713951,88 - \left(\frac{4}{3}\right)29356975,93 = 19571317,31$$

- *Poisson's ratio* (ν)

$$\nu = \frac{\lambda}{3k - \lambda} = \frac{0,029534203}{3 * 19571317,31 - 0,029534203} = 5,03018E - 10$$

- Kecepatan Gelombang S (Vs)

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{29356975,93}{1514,817}} = 139,2116475$$

Hasil dari keseluruhan percobaan dirangkum ke dalam tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Rangkuman Hasil Percobaan

Spesimen Batu Gamping	
Massa (m)	0,090889 kg
Panjang (L)	0,027 m
Diameter (d)	0,006 m
Densitas (ρ)	1514,817 kg/m ³
Porositas (\emptyset)	21 %
Kecepatan Gelombang P (Vp)	196,875 m/s
<i>Compressional Wave Modulus</i> (M)	58713951,9 kPa
<i>Bulk Modulus</i> (k)	19571317,3 kPa
<i>Shear Modulus</i> (μ)	29356975,9 kPa
<i>Poisson's Ratio</i> (ν)	5,03E-10
Kecepatan Gelombang S (Vs)	139,217 m/s

Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai-nilai parameter fisik dan mekanik Batu Gamping. Beberapa nilai parameter penting Modulus Elastisitas seperti *Compressional Wave Modulus* (M), *Bulk Modulus* (k) dan *Shear Modulus* (μ) didapatkan dengan cara menghitung berdasarkan teori dan persamaan yang ada. Modulus Elastisitas adalah faktor proporsionalitas antara tegangan normal relatif terhadap regangan. Besar nilai Modulus Elastisitas tergantung pada komposisi mineral, porositas,

jenis perpindahan, dan gaya beban yang diterapkan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa nilai Modulus Elastisitas sampel Batu Gamping tidak terlalu tinggi yaitu 58,72 GPa untuk *Compressional Wave Modulus* (M); 19,57 GPa untuk *Bulk Modulus* (k); dan 29,36 GPa untuk *Shear Modulus* (μ). Nilai yang didapat ini hampir sama dengan beberapa penelitian lain oleh Vukadin et al. (2021) [18].

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian eksperimen Sifat Fisik dan Mekanik Batu Gamping menunjukkan bahwa alat ultrasonik dapat dengan baik mengestimasi nilai parameter sifat fisik dan mekanik dari spesimen Batu Gamping. Jika dibandingkan dengan penelitian lain, hasil pengukuran dan perhitungan juga menunjukkan rentang nilai yang sesuai. Beberapa parameter yang didapatkan antara lain densitas (ρ), porositas (\emptyset), kecepatan gelombang (P), *Compressional Wave Modulus* (M), *Bulk Modulus* (k), *Shear Modulus* (μ), *Poisson's Ratio* (ν), dan kecepatan gelombang S (Vs). Nilai parameter *Compressional Wave Modulus* (M), *Bulk Modulus* (k), *Shear Modulus* (μ) adalah 58,72 GPa, 19,57 GPa, dan 29,36 GPa, berturut-turut. Hasil ini sesuai dengan hasil beberapa penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Untuk selanjutnya bisa juga dilakukan perbandingan hasil pengukuran menggunakan uji coba destructive. Selain itu, pengujian parameter-parameter sifat fisik dan mekanik Batu Gamping dapat juga dilakukan dalam beberapa kondisi yang berbeda-beda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan eksperimen ini. Penulis juga turut berterima kasih kepada semua pihak yang membantu penyelesaian penelitian ini. Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna. Penulis senantiasa menerima saran dan kritik yang membangun. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi khalayak umum, civitas akademika dan pengembangan ilmu pengetahuan.

REFERENCES

- [1] I. Fung, "Carbon Cycle."
- [2] R. C. Selley, "Differences between Limestones and Sandstones," no. 1986, pp. 107–113, 1994.
- [3] F. L. Schwab, "Sedimentary Petrology SEDIMENTARY ROCKS."
- [4] D. E. S. Proprietes and D. E. Quelques, "REVUE," pp. 105–110, 1981.
- [5] S. Assefa, C. Mccann, and J. Sothcott, "Velocities of compressional and shear waves in limestones," no. July 2002, pp. 1–13, 2003.
- [6] Q. Meng, C. Wang, and J. Liu, "Physical and micro-structural characteristics of limestone after high temperature exposure," 2019.
- [7] W. S. González-gómez, P. Quintana, A. May-pat, F. Avilés, and J. May-crespo, "International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Thermal effects on the physical properties of limestones from the Yucatan Peninsula," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 75, pp. 182–189, 2015, doi: 10.1016/j.ijrmms.2014.12.010.
- [8] J. Yang, L. Fu, W. Zhang, and Z. Wang, "Mechanical property and thermal damage factor of limestone at high temperature International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Mechanical property and thermal damage factor of limestone at high temperature," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 117, no. July 2021, pp. 11–19, 2019, doi: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.012.
- [9] H. Arman, "Correlation of P - wave velocity with mechanical and physical properties of limestone with statistical analysis," *Sci. Rep.*, pp. 1–18, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-03524-0.
- [10] K. A. Herastuti and N. P. Ira, "Studi Analisis Pengaruh Variasi Ukuran Butir batuan terhadap Sifat Fisik dan Nilai Kuat Tekan," 2016.
- [11] M. A. Rai, K. Suseno, and W. Ridho Kresna, *Mekanika Batuan*. 2014.
- [12] M. Heidari, R. Ajalloeian, A. Ghazifard, and M. Hashemi, "Evaluation of P and S Wave Velocities and Their Return Energy of Rock Specimen at Various Lateral and Axial Stresses," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 9, 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01221-9.
- [13] J. H. Schön, "Density," in *Developments in Petroleum Science*, vol. 65, Elsevier, 2015, pp. 109–118.
- [14] M. Indians, T. Romans, and A. Way, "Lime and limestone 1."
- [15] P. Stepień, Z. Rusin, and A. Bracka, "Analysis of the Pore Space of the Swietokrzyskie Region ' s Jurassic Devonian Limestones Based on Testing with the Use Mercury Intrusion Porosimetry and Differential Scanning Calorimetry Analysis of the Pore Space of the Swietokrzyskie Region ' s Jurassic Devonian Limestones Based on Testing with the Use Mercury Intrusion Porosimetry and Differential Scanning Calorimetry," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/471/3/032072.
- [16] X. Shen, M. Chen, W. Lu, and L. Li, "Using P wave modulus to estimate the mechanical parameters of rock mass," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2016, doi: 10.1007/s10064-016-0932-0.
- [17] T. Lay and T. C. Wallace, *Modern global seismology*. Elsevier, 1995.
- [18] D. Vukadin, J. Oreskovic, and C. Kutasi, "Elastic Properties of Pannonian Basin Limestone under," *Energies*, vol. 14, no. 7291, 2021.