

KORELASI NILAI KUAT TEKAN UNIAKSIAL DAN MODULUS ELASTIC BERDASARKAN PARAMETER SIFAT FISIK DAN POINT LOAD BATU GAMPING DI KABUPATEN GUNUNG KIDUL

Albertus Juvensius Pontus^{1*}, Revia Oktaviani², Tommy Trides³

^{1*),2),3)}Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Mulawarman
Jl. Sambaliung, No. 9 Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119, Kalimantan Timur
^(*)Penulis korespondensi: albertpontus@ft.unmul.ac.id

Received : Februari 2023; Accepted: Mei 2023; Published : Mei 2023

Abstract

In mining design, it is necessary to know in advance the characteristics of physical and mechanical properties, especially in the case of limestone. Laboratory tests need to be carried out to determine the physical and mechanical characteristics of limestone. Two important parameters that are often used for geotechnical analysis are the uniaxial compressive strength (UCS) and elastic modulus (E) values. Uniaxial compressive strength and elastic modulus values can be interpreted indirectly by using statistical relationships, which are simple regression and multiple regression, to interpret the correlation between the parameters of specific gravity, porosity and point load index (PLI). Based on the results of statistical analysis, the strongest correlation is found between the point load index (PLI) and UCS, where the correlation value is 0.85. The correlation between the point load index (PLI) and the elastic modulus also has a strong relationship, with the correlation value of 0.74. In the multiple regression analysis, with independent variables (density, porosity, and PLI) and dependent variables (UCS and elastic modulus), the average error for the uniaxial compressive strength (UCS) value is 1.7811 (multiple regression) and 1.5542 (multiple non-linear regression) while the average error for elastic modulus (E) is 0.2460 (multiple regression) and 0.1841 (multiple non-linear regression).

Keywords: limestone, multiple regression, mechanical properties, physical properties, simple non-linear regression

Abstrak

Dalam desain penambangan, perlu diketahui terlebih dahulu karakteristik sifat fisik dan mekanik khususnya dalam hal ini adalah batu gamping. Pengujian skala laboratorium perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekanik batuan gamping. Dua parameter penting yang sering digunakan untuk analisis geoteknik adalah nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan modulus elastis (E). Nilai kuat tekan uniaksial dan modulus elastis dapat ditafsir secara tidak langsung dengan menggunakan hubungan statistik yaitu regresi sederhana dan regresi berganda, untuk menafsir korelasi hubungan parameter bobot isi, porositas dan point load index (PLI). Berdasarkan hasil analisis statistik maka diperoleh korelasi yang memiliki hubungan paling kuat adalah point load index (PLI) dengan UCS dimana nilai korelasi sebesar 0,85 dan hubungan point load index (PLI) dengan modulus elastis memiliki nilai korelasi sebesar 0,74. Sedangkan untuk analisis regresi berganda dengan variabel bebas (densitas, porositas, dan PLI) dan variabel terikat (UCS dan modulus elastis) diperoleh rata-rata error untuk nilai kuat tekan uniaksial (UCS) sebesar 1,7811 (regresi berganda) dan 1,5542 (regresi non-linear berganda) sedangkan rata-rata error untuk modulus elastis (E) sebesar 0,2460 (regresi berganda) dan 0,1841 (regresi non-linear berganda).

Kata kunci : gamping, regresi berganda, regresi non-linear sederhana, sifat fisik, sifat mekanik

PENDAHULUAN

Desa Sidorejo, Kecamatan Ponjong, Kabupaten Gunung Kidul merupakan salah satu wilayah yang memiliki potensi batu gamping, sehingga kerap kali dijumpai aktifitas penambangan

di daerah tersebut. Untuk desain penambangan batu gamping, perlu diketahui terlebih dahulu karakteristik fisik dan mekanik batuan gamping yang ada. Pada saat ini, untuk mengetahui nilai kuat tekan uniaksial dan modulus elastis dapat ditafsir

secara tidak langsung dengan menggunakan hubungan statistik yaitu regresi sederhana dan regresi berganda, untuk menafsir korelasi hubungan parameter bobot isi, porositas dan *point load index* (PLI) terhadap nilai kuat tekan dan *modulus elastic*.

Hasil analisis prediksi nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan *modulus elastic* (E) menggunakan regresi *linear* sederhana dan regresi berganda diharapkan bisa menjadi dugaan awal untuk mengetahui karakteristik sifat mekanik batuan gamping dan dijadikan rujukan dalam desain penambangan atau konstruksi lainnya di daerah penelitian.

METODOLOGI PENELITIAN

Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik adalah karakteristik utama dari batuan yang mempengaruhi perilakunya. Perbedaan struktur padatan, air dan udara dari masing-masing batu membuat perbedaan yang berbeda, tindakan ini pada akhirnya berkaitan erat dengan ketahanan batu saat Anda menguji sifat-sifatnya.

1. Bobot Isi

Merupakan perbandingan antara massa batuan terhadap volume total batuan. Pada umumnya batuan tidak hanya terdiri dari padatan, tetapi juga mengandung gas dan air. Massa gas dan air mengisi rongga di batuan dalam bentuk pori dan rekahan. Dalam kondisi alami, jenis batuan keras biasanya mengandung gas dan air. Dalam kondisi sempurna, gas di dalam batuan dihilangkan dan ruang pori diisi dengan air, sehingga batuan padat seharusnya hanya mengandung air. Proses ini disebut saturasi yang terjadi dalam tabung pengering tertutup. Jika sampel batuan ditimbang dalam air, akan diperoleh nilai berat sampel batuan yang tersuspensi. Sedangkan dalam bentuk batu kering, kandungan cairannya dihilangkan dengan cara dipanaskan di dalam tungku. Proses pengeringan ini diharapkan karena jenis batuan padat hanya mengandung gas dan rongga.

Terdapat tiga macam bobot isi, yaitu:

a. Bobot isi asli (natural density)

Bobot isi asli adalah rasio berat batuan asli dengan total volume batuan (termasuk rongga).

$$\text{Bobot isi asli} = \frac{W_n}{W_w - W_s} \quad (1)$$

b. Bobot isi kering (dry density)

Bobot isi kering adalah rasio berat batuan kering dengan total volume batuan.

$$\text{Bobot isi kering} = \frac{W_o}{W_w - W_s} \quad (2)$$

c. Bobot isi jenuh (saturated density)

Bobot isi jenuh adalah rasio berat batuan dalam kondisi jenuh dengan volume total batuan.

$$\text{Bobot isi jenuh} = \frac{W_w}{W_w - W_s} \quad (3)$$

2. Berat jenis

Berat jenis adalah rasio berat padatan di dalam batuan terhadap berat kandungan air yang dapat menyatakan seberapa berat batuan relatif terhadap air. Berat jenis terbagi menjadi 2 yaitu :

Berat jenis asli (true specific gravity)

Berat jenis asli adalah perbandingan antara berat kandungan butir batuan dengan berat kandungan airnya.

$$\text{Berat jenis asli} = \frac{W_o}{W_o - W_s} / \text{Bobot isi air} \quad (4)$$

b. Berat jenis semu (apparent specific gravity)

Berat jenis semu merupakan perbandingan antara berat isi kering dengan berat air.

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{W_o}{W_w - W_s} / \text{Bobot isi air} \quad (5)$$

3. Kadar air

Kadar air adalah perbandingan antara berat batuan dengan berat total batuan. Kandungan air terbagi menjadi dua, yaitu:

a. Kadar air asli (natural water content)

Kadar air asli adalah perbandingan antara berat air batuan asli dengan berat butiran batuan dan dinyatakan dalam %.

$$\text{Kadar air asli} = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (6)$$

b. Kadar air jenuh (saturated water content)

Kadar air jenuh adalah rasio berat air dalam kondisi jenuh terhadap massa padatan di dalam batuan.

$$\frac{W_w - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (7)$$

4. Derajat kejenuhan (degree of saturation)

Derajat kejenuhan adalah perbandingan kadar air alami dengan kadar air jenuh. Menunjukkan jumlah air dalam batuan alam versus jumlah air yang dapat mengisi batuan.

$$\text{Derajat kejenuhan} = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \quad (8)$$

5. Porositas (porosity)

Porositas adalah perbandingan antara volume pori-pori dalam batuan dengan volume total batuan.

$$\text{Porositas (n)} = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \quad (9)$$

6. Angka pori (void ratio)

Void ratio adalah perbandingan antara volume pori dalam batuan dengan volume padatan dalam batuan.

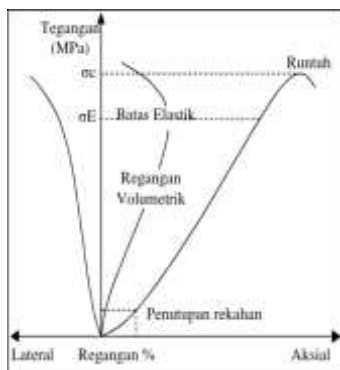
$$\text{Void ratio } (e) = \frac{n}{1-n} \tag{10}$$

Sifat Mekanik Batuan

Uji Kuat Tekan Uniaksial

Tujuannya adalah untuk mendapatkan kuat tekan uniaksial dari spesimen batuan dalam geometri beraturan, atau sebagai inti, balok atau prisma dalam satu arah (uniaksial). Nilai kuat tekan (σ_c) merupakan contoh nilai tekanan tertinggi yang dapat ditahan oleh sampel batuan sebelum sampel tersebut hancur atau jatuh (pecah) tanpa adanya pengaruh tekanan tekanan (tegangan tekanan nol).

Data hasil uji kuat tekan uniaksial dapat diplotkan pada kurva tegangan-regangan. Melalui kurva tegangan-regangan, diperoleh nilai *modulus elastic*, koefisien *Poisson* dan batas *elastic* batuan. Kurva tegangan-regangan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Tegangan Regangan Uji Kuat Tekan Uniaksial (Astawa Rai, 2010)

Persamaan kuat tekan uniaksial adalah:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \tag{11}$$

Dimana σ_c adalah kuat tekan uniaksial (MPa), F adalah besarnya gaya yang bekerja (N), dan A adalah luas penampang contoh batuan (mm²).

Modulus elastic adalah kemampuan suatu batuan untuk mempertahankan keadaan *elastic*nya. Pada uji kuat tekan uniaksial, sampel batuan di bawah tekanan akan mengalami berbagai tahapan deformasi, yaitu deformasi *elastic* dan deformasi plastis. Nilai *modulus elastic* diperoleh dari kemiringan kurva tegangan-regangan pada penampang linier karena pada saat itulah sampel mengalami deformasi *elastic*. Tabel 3.2 menunjukkan beberapa korelasi antara uji indeks

dasar dan *modulus elastic* (E). Persamaan untuk mencari nilai *modulus elastic* adalah:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon\alpha} \tag{12}$$

Dimana E adalah *Modulus elastic* (MPa), $\Delta\sigma$ adalah beda tegangan (MPa), dan $\Delta\epsilon\alpha$ adalah beda regangan aksial (%)

Poisson Rasio (ν) adalah nilai absolut dari rasio regangan lateral terhadap regangan aksial. Jika suatu bahan diregangkan ke satu arah, ia cenderung berkontraksi (dan jarang mengembang) ke dua arah lainnya. Sebaliknya, jika suatu bahan dikompresi, bahan tersebut akan mengembang (dan jarang berkontraksi) ke dua arah lainnya juga. Persamaan untuk mencari nilai rasio *Poisson* adalah:

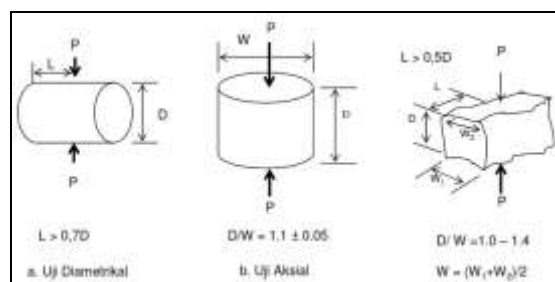
$$\nu = \frac{\epsilon \text{ lateral}}{\epsilon \text{ aksial}} \tag{13}$$

Dimana ν adalah nisbah *Poisson*, ϵ lateral adalah regangan lateral (%), dan ϵ aksial adalah regangan aksial (%).

Point load index (PLI)

Point load index adalah tes indeks yang digunakan untuk memprediksi nilai UCS suatu batuan secara tidak langsung di lapangan. Hal ini dikarenakan prosedur pengujian yang sederhana, penyiapan sampel yang mudah dan dapat dilakukan di lapangan. Peralatan yang digunakan mudah untuk diangkut, tidak terlalu besar dan cukup ringan untuk mengetahui kekuatan batuan di lapangan dengan cepat, sebelum dilakukan pengujian di laboratorium (Astawa Rai, 2010).

Contoh yang digunakan untuk pengujian dapat berbentuk silinder ataupun bongkahan (Gambar 2) dan disarankan untuk pengujian ini berbentuk silinder dengan diameter = 50 mm (ISRM, 1985).



Gambar 2. Tipe dan Syarat Contoh Batuan Uji PLI (ISRM,1985)

Menurut Broch & Franklin (1972), indeks *point load* (I_s) suatu contoh batuan, dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \tag{14}$$

Jika diameter sampel batuan yang digunakan bukan 50 mm, diperlukan faktor koreksi dari persamaan yang diturunkan dari Broch dan Franklin. Menurut Greminger (1982), faktor koreksi celah tergantung pada diameter, karena diameter ideal yang digunakan adalah 50 mm, Greminger mereduksi persamaan menjadi:

$$I_s(50) = F \frac{P}{D^2} \tag{15}$$

Dimana $F = \left(\frac{d}{50}\right)^{0,45}$, sehingga diperoleh persamaan *point load index* yang telah dikoreksi sebagai berikut:

$$I_s(50) = \left(\frac{d}{50}\right)^{0,45} \frac{P}{D^2} \tag{16}$$

Jika $I_s = 1$ MPa, indeks tersebut tidak memiliki arti, maka penentuan kekuatan harus berdasarkan UCS, dan menurut Bieniawski dengan diameter conto 50 mm maka, UCS dapat ditentukan melalui,

$$\sigma_c = 23 I_s \tag{17}$$

Uji aksial dan uji *irregular lamp* menggunakan diameter ekuivalen (D_e) dalam perhitungan *point load index* yang diturunkan dari luas penampang minimum.

$$A = WD = \frac{\pi}{4} D_e^2 \tag{18}$$

$$D_e^2 = \frac{4}{\pi} WD \tag{19}$$

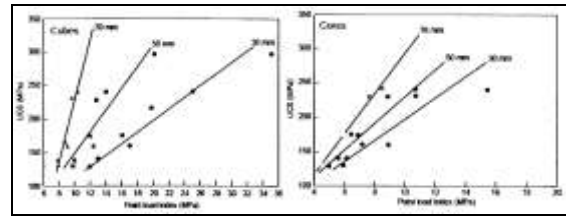
Sehingga persamaan yang digunakan menjadi,

$$I_s(50) = F \frac{P}{D_e^2} \tag{20}$$

Dimana, $F = \left(\frac{D_c}{50}\right)^{0,45}$

Dimana I_s adalah *Point load index* diameter 50 mm (MPa), P adalah Beban maksimum conto pecah (N), dan D adalah Jarak antar konus (mm).

Hawkins (1989) membangun hubungan antara pengaruh skala indeks beban titik terhadap kuat tekan dua bentuk sampel, yaitu kubus dan silinder (Gambar 3). Tampak bahwa semakin kecil ukuran benda uji baik untuk kubus maupun silinder, nilai kuat tekannya juga semakin menurun. Selain itu, juga terlihat bahwa variasi nilai kuat tekan pada sampel kubik lebih besar dibandingkan sampel silinder. sampel (Astawa Rai, 2010).



Gambar 3. Hubungan antara PLI dan UCS (Hawkins, 1989)

Beberapa peneliti mempelajari hubungan antara PLI dan kuat tekan pada berbagai jenis batuan, hampir semuanya menggunakan sampel uji ukuran 50 mm, dan hubungan tersebut menghasilkan persamaan *linear* langsung yang koefisiennya bervariasi (Tabel 1), tergantung pada batuan yang diteliti.

Tabel 1. Persamaan hubungan kuat tekan dan modulus elastic (E) dengan PLI

Referensi	Persamaan	Tipe Batuan
Broch & Franklin (1972)	$\sigma_c = 24 I_s (50)$	Batu pasir
Bieniawski (1975)	$\sigma_c = 23 I_s (50)$	Batuan beku, batuan sedimen
Brook (1985)	$\sigma_c = 22 I_s (50)$	-
Singh (1981)	$\sigma_c = 18,7 I_s (50)$	Batu pasir dan shale
Vallejo, dkk (1989)	$\sigma_c = 12,5 I_s (50)$	Shale
Vallejo, dkk (1989)	$\sigma_c = 17,4 I_s (50)$	Batu pasir
Kramadibrata (1992)	$\sigma_c = 11,82 I_s (50)$	Batu pasir dan batu lempung
Gunsallus & Kulhawy (1984)	$\sigma_c = 16,5 I_s (50) + 51$	Dolostone, batu pasir, batu gamping
Cargill & Shakoor (1990)	$\sigma_c = 23 I_s (54) + 13$	Batuan sedimen, batuan metamorf
Kahraman (2001)	$\sigma_c = 8,41 I_s (50) + 9,51$	Batuan beku, batuan sedimen, metamorf
Tsidzi (1990)	$\sigma_c = \frac{I_s (50)}{0,03 + 0,003 I_s (50)}$	Batuan metamorf
Yilman dan Yuksek (2008)	$E = 10,943 I_s (50) + 0,8527$	Gypsum
Yilman dan Yuksek (2009)	$E = 14,122 I_s (50) - 2,745$	Gypsum

Analisis Korelasi Dan Regresi Analisis Data Statistik

Istilah "statistik" mengacu pada fungsi matematika dari kumpulan data yang diukur, seperti nilai rata-rata, nilai terbesar (Xmax), nilai terkecil (Xmin), dll. Serangkaian prinsip operasi yang

digunakan mungkin berbeda tergantung pada metodologi statistik yang digunakan. Namun, jenis fungsi statistik yang paling umum digunakan dalam geologi teknik adalah rata-rata, median, modus, standar deviasi, jangkauan, dan kuartil dalam distribusi frekuensi (Hoek, 2007).

1. Nilai Rata-rata Sampel (*Mean*)

Rata-rata aritmatika dari kumpulan data dan merupakan pusat distribusi probabilitas sepanjang sumbu x. Rerata (\bar{x}) dari kumpulan data “n” ($x = x_1, x_2 \dots x_n$) diberikan oleh:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{21}$$

2. Varians

Varians adalah ukuran dispersi atau ukuran variasi, varians dapat menggambarkan distribusi data kuantitatif.

$$S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2 \tag{22}$$

3. Standar Deviasi

Standar deviasi adalah salah satu teknik statistik yang digunakan untuk menjelaskan homogenitas kelompok. Jika standar deviasinya nol, ini menunjukkan bahwa semua nilai dalam himpunan itu sama. Sedangkan nilai deviasi yang lebih besar menunjukkan bahwa titik data individu jauh dari nilai rata-rata. Secara umum, dalam distribusi normal, sekitar 68% data sampel berada dalam rentang batas yang ditentukan oleh $\bar{x} \pm SD$, sedangkan 95% data sampel berada pada $\bar{x} \pm 2.SD$.

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - a} \tag{23}$$

4. Koefisien Variasi (COV)

COV didefinisikan sebagai standar deviasi dibagi dengan rata-rata (\bar{x}). COV tidak berdimensi dan sangat berguna untuk mengukur ketidakpastian. Nilai koefisien varians yang kecil menunjukan tingkat ketidakpastian yang kecil. Besarnya koefisien variansi menunjukkan tingkat ketidakpastian data. Semakin besar KV ($KV > 0,25$), maka data memiliki tingkat ketidakpastian tinggi dan cenderung menghasilkan distribusi tidak normal, sebaliknya semakin kecil KV ($KV \leq 0,25$), data memiliki tingkat ketidakpastian rendah-sedang dan cenderung membentuk distribusi normal (Hoek, 2007).

$$COV = \frac{\text{standar deviasi}}{\text{rata-rata}} \times 100\% \tag{24}$$

Analisis Korelasi Parsial Pearson Product Moment

Analisis korelasi parsial ini digunakan untuk mengetahui kekuatan hubungan antara korelasi dua variabel dimana variabel lain yang dianggap berpengaruh (seperti variabel kontrol) dikendalikan atau diperbaiki. Karena variabel yang diteliti adalah data interval, maka teknik statistik yang digunakan adalah *Pearson Correlation Product Moment* (Sugiyono, 2013). Menurut Sugiyono (2013), menentukan koefisien korelasi dengan menggunakan metode analisis korelasi *Pearson Product Moment* sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \tag{25}$$

Dimana :

- r_{xy} : korelasi antara variabel x dan y
- x : $(x_i - \bar{x})$
- y : $(y_i - \bar{y})$

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \tag{26}$$

Dimana r_{xy} adalah koefisien korelasi Pearson, x_i adalah variabel *independent*, y_i adalah variabel dependen, dan n adalah banyaknya sampel.

Dari hasil yang diperoleh dengan rumus di atas, dapat diketahui tingkat pengaruh variabel X dan variabel Y. Pada hakikatnya nilai r dapat bervariasi dari -1 hingga +1, atau secara matematis dapat ditulis menjadi $-1 \leq r \leq +1$. Hasil dari perhitungan akan memberikan tiga alternatif, yaitu :

1. Bila $r = 0$ atau mendekati 0, maka korelasi antar kedua variabel sangat lemah atau tidak terdapat hubungan antara variabel X terhadap variabel Y.
2. Bila $r = +1$ atau mendekati +1, maka korelasi antar kedua variabel adalah kuat dan searah, dikatakan positif.
3. Bila $r = -1$ atau mendekati -1, maka korelasi antar kedua variabel adalah kuat dan berlawanan arah, dikatakan negatif.

Analisis Regresi Berganda

Karena variabel independen yang diuji pengaruhnya terhadap variabel dependen, dalam penelitian ini lebih dari satu maka proses analisis regresi yang digunakan adalah analisis regresi berganda. Menurut Sugiyono (2013) mendefinisikan bahwa: “Analisis regresi berganda digunakan oleh peneliti, apabila peneliti bermaksud untuk memprediksi bagaimana keadaan (kenaikan dan penurunan) variabel dependen (kriteria) nantinya, jika dua atau lebih variabel independen sebagai faktor prediksi dimanipulasi (meningkat atau menurun).”

Persamaan regresi berganda untuk dua prediktor atau lebih yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e \quad (27)$$

Dimana Y adalah variabel dependen, a adalah koefisien konstanta, b_1, b_2, \dots, b_n adalah koefisien regresi, x_1, x_2, \dots, x_n adalah variabel *independent*, dan e adalah tingkat kesalahan (error).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik di Laboratorium.

1. Pengujian Sifat Fisik

Pengujian sifat fisik dilakukan dilaboratorium dengan menggunakan conto batuan gamping sebanyak 15. Sampel batu gamping yang perolah dari lapangan kemudian dilakukan pengujian dengan tahapan sebagai berikut :

- a) Penimbangan sampel batuan dalam kondisi asli (Wn).
- b) Selanjutnya sampel di masukan kedalam desikator yang berisi air kemudian di diamkan selama ± 24 jam, lalu sampel di timbang dalam kondisi jenuh air (Ww).
- c) Sampel jenuh air yg telah selesai di timbang beratnya, kemudian dilakukan penimbangan tergantung (Ws).

Kemudia sampel di masukan kedalam *oven* untuk dikeringkan pada suhu ± 100 °c dalam kurung waktu ± 24 jam dengan tujuan untuk mendapatkan berat sampel dalam kondisi kering (Wo).

Berikut adalah hasil pengujian sifat fisik seperti yang ditunjukkan pada tabel 2. Perhitungan menggunakan persamaan 1 sampai 10.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Fisik

Kode Sampel	Bobot isi asli gr/cm ³	Bobot isi kering gr/cm ³	Bobot isi jenuh gr/cm ³	Apperent SG	True SG	Kadar air asli %	Kadar air jenuh %	Derajat kejenuhan %	Porositas %	Void ratio
G-01	1,90	1,89	2,16	1,89	2,58	0,39	14,21	2,73	26,83	0,37
G-02	2,12	2,11	2,29	2,11	2,56	0,20	8,33	2,38	17,57	0,21
G-03	1,89	1,88	2,16	1,88	2,62	0,67	15,10	4,42	28,37	0,40
G-04	1,95	1,95	2,19	1,95	2,58	0,29	12,65	2,31	24,62	0,33
G-05	1,84	1,83	2,13	1,83	2,60	0,22	16,02	1,34	29,39	0,42
G-06	2,08	2,08	2,29	2,08	2,65	0,30	10,43	2,86	21,67	0,28
G-07	1,84	1,84	2,12	1,84	2,56	0,14	15,23	0,90	28,03	0,39
G-08	1,85	1,85	2,13	1,85	2,58	0,18	15,30	1,19	28,28	0,39
G-09	1,96	1,95	2,21	1,95	2,62	0,22	13,02	1,65	25,42	0,34
G-10	1,86	1,84	2,14	1,84	2,62	1,31	16,19	8,11	29,78	0,42
G-11	2,03	2,03	2,24	2,03	2,58	0,18	10,60	1,74	21,50	0,27
G-12	2,04	2,04	2,25	2,04	2,60	0,09	10,55	0,85	21,51	0,27
G-13	1,98	1,98	2,21	1,98	2,59	0,20	12,04	1,69	23,79	0,31
G-14	1,86	1,85	2,16	1,85	2,69	0,11	16,74	0,67	31,04	0,45
G-15	1,95	1,94	2,19	1,94	2,60	0,46	13,12	3,54	25,45	0,34



Gambar 4. Pengujian Sifat Fisik, (a) penimbangan dalam kondisi asli, (b) penjenuhan sampel dalam desikator, (c) pengeringan sampel dalam oven.

2. Pengujian Sifat Mekanik

Uji Point Load

Uji *point load* merupakan uji indeks yang secara luas telah digunakan untuk memprediksi nilai kuat tekan suatu batuan secara tidak langsung di lapangan. Pada pengujian ini peneliti

menggunakan sampel batuan yang berbentuk kubus, dimana terdapat 15 buah sampel dilakukan tiga kali pengujian untuk memperoleh nilai beban maksimum conto pecah (P). Berikut adalah hasil dari pengujian *point load* seperti yang ditunjukkan pada tabel

Tabel 3. Hasil Pengujian Point load Index

Kode Sampel	D (mm)	W (mm)	P (kN)			P rata-rata (kN)	De ² (mm ²)	De (mm)	F (mm)	Is (MPa)
			I	II	III					
G-01	48	48	3,6	3,8	3,7	3,70	2935,03	54,18	1,04	1,31
G-02	49	49	5,6	5,6	5,5	5,57	3058,60	55,30	1,05	1,90
G-03	49	49	5	4,8	5,2	5,00	3058,60	55,30	1,05	1,71
G-04	48	48	5,3	4,9	5,4	5,20	2935,03	54,18	1,04	1,84
G-05	50	50	4	3,8	4,2	4,00	3184,71	56,43	1,06	1,33
G-06	47	47	6	5,6	6,4	6,00	2814,01	53,05	1,03	2,19
G-07	48	48	5,3	5,5	5,1	5,30	2935,03	54,18	1,04	1,87
G-08	49	49	3,8	4	3,7	3,83	3058,60	55,30	1,05	1,31
G-09	49	49	5,6	5,2	6	5,60	3058,60	55,30	1,05	1,92
G-10	50	50	5	4,7	5,3	5,00	3184,71	56,43	1,06	1,66
G-11	49	49	10,5	10,4	11,1	10,67	3058,60	55,30	1,05	3,65
G-12	48	48	6	5,7	6,3	6,00	2935,03	54,18	1,04	2,12
G-13	47	47	6,5	6,8	6	6,43	2814,01	53,05	1,03	2,35
G-14	50	50	5	5,2	4,8	5,00	3184,71	56,43	1,06	1,66
G-15	52	52	4,1	4,2	3,8	4,03	3444,59	58,69	1,07	1,26
Rata-rata										1,87

Dari hasil pengujian *point load index* dari 15 buah sampel diperoleh rata-rata nilai sebesar 1,87 MPa.

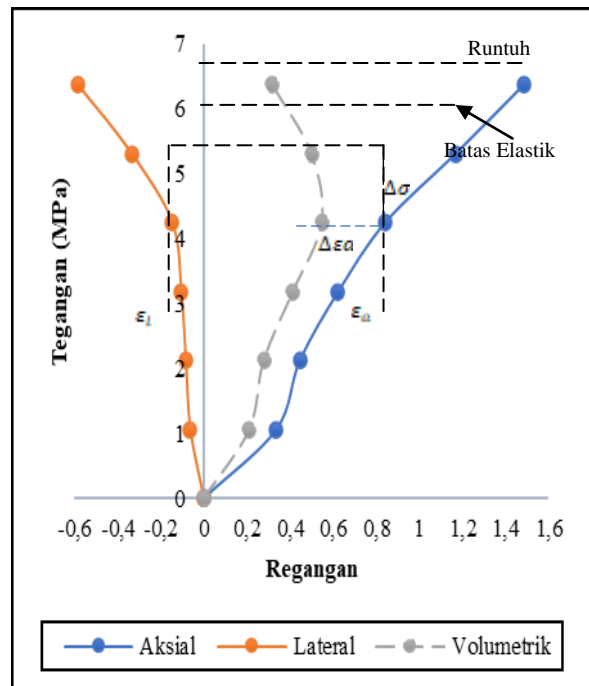
Uji Kuat Tekan Uniaksial

Pengujian kuat tekan uniaksial dilakukan untuk memperoleh nilai kuat tekan batu gamping dan *modulus elastic*. Berikut adalah hasil pengujian kuat tekan, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Uniaksial

No.	Sampel	UCS (MPa)	E (GPa)
1	G-01	6,38	0,54
2	G-02	14,58	1,31
3	G-03	12,50	1,34
4	G-04	12,77	1,29
5	G-05	10,43	1,10
6	G-06	15,51	1,45
7	G-07	12,50	1,63
8	G-08	7,70	1,10
9	G-09	14,01	1,30
10	G-10	12,76	1,03
11	G-11	18,75	1,71
12	G-12	16,20	1,61
13	G-13	13,48	1,42
14	G-14	10,66	1,09
15	G-15	8,50	0,79

Gambar 5 menunjukkan contoh hubungan kurva tegangan - regangan pada sampel G-01.



Gambar 5. Kurva Tegangan – Regangan

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{1500}{23,52} \times 0,1 = 6,38 \text{ MPa}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} = \frac{4,25 - 2,13}{0,84 - 0,45} \times 0,01 = 536,78 \text{ MPa}$$

$$v = \frac{\epsilon \text{ lateral}}{\epsilon \text{ aksial}} = \frac{0,15}{0,84} = 0,173$$

Berikut ini adalah rekapitulasi dari hasil pengujian di laboratorium (Tabel 5), baik itu uji sifat fisik maupun sifat mekanik.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Sifat Mekanik

Sampel	Densitas (gr/cm ³)	Porositas (%)	PLI (MPa)	UCS (MPa)	E (GPa)
G-01	1,90	26,83	1,31	6,38	0,54
G-02	2,12	17,57	1,90	14,58	1,31
G-03	1,89	28,37	1,71	12,50	1,34
G-04	1,95	24,62	1,84	12,77	1,29
G-05	1,84	29,39	1,33	10,43	1,10
G-06	2,08	21,67	2,19	15,51	1,45
G-07	1,84	28,03	1,87	12,50	1,63
G-08	1,85	28,28	1,31	7,70	1,10
G-09	1,96	25,42	1,92	14,01	1,30
G-10	1,86	29,78	1,66	12,76	1,03
G-11	2,03	21,50	3,65	18,75	1,71
G-12	2,04	21,51	2,12	16,20	1,61
G-13	1,98	23,79	2,35	13,48	1,42
G-14	1,86	31,04	1,66	10,66	1,09
G-15	1,95	25,45	1,26	8,50	0,79

Dari hasil pengujian sifat fisik dan sifat mekanik kemudian dilakukan analisis statistik untuk memperoleh hasil korelasi dari nilai porositas, densitas dan *point load index* dari batu gamping terhadap nilai kuat tekan dan *modulus elastic*.

3. Pengolahan Statistik Data Hasil Uji Laboratorium

Hasil statistik deskriptif dapat dilihat pada Tabel 6. Berdasarkan hasil dari standar deviasi, penyebaran data terbesar terlihat pada data porositas, dan UCS dengan nilai 3,79 dan 3,31. Sementara itu penyebaran data paling sedikit adalah densitas/bobot isi dengan nilai 0,09. Namun, jika dilihat dari nilai koefisien variannya maka bisa dibedakan menjadi dua kelompok data yang kurang lebih penyebarannya datanya sama. Kelompok data yang pertama yaitu *point load index*, UCS dan *modulus elastic* dan kelompok data yang kedua adalah porositas dan bobot isi.

Tabel 6. Hasil Statistik Deskriptif

Tes Yang Dilakukan	Mean	Min	Max	SD	COV (%)
Densitas (gr/cm ³)	1,94	1,84	2,12	0,09	4,69
Porositas (%)	25,55	17,57	31,04	3,79	14,85
PLI (MPa)	1,87	1,26	3,65	0,60	31,87
UCS (MPa)	12,45	6,38	18,75	3,31	26,62
E (GPa)	1,25	0,54	1,71	0,32	25,49

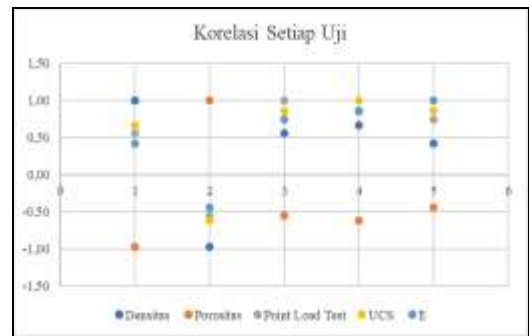
Perhitungan statistik deskriptif dapat menggunakan persamaan 21, 23 dan 24.

Korelasi dependen dari tes individu menunjukkan porositas memiliki korelasi negatif dengan semua sifat lainnya, yang berarti kenaikan porositas menghasilkan pengurangan semua nilai lainnya. Menurut interpretasi Evans, ketergantungan kekuatan dapat digambarkan oleh ukuran, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Korelasi antara tes yang Dilakukan

Tes Yang Dilakukan	Densitas	Porositas	PLI	UCS	E
Densitas (gr/cm ³)	1,00	-0,96	0,56	0,67	0,43
Porositas (%)	-0,96	1,00	-0,55	-0,62	-0,44
PLI (MPa)	0,56	-0,55	1,00	0,85	0,74
UCS (MPa)	0,67	-0,62	0,85	1,00	0,86
E (GPa)	0,43	-0,44	0,74	0,86	1,00

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara setiap uji yang dilakukan dengan menggunakan analisis korelasi Pearson. Dapat dilihat bahwa PLI mempunyai hubungan yang kuat dengan UCS dengan nilai 0,85 dibandingkan dengan korelasi yang lainnya seperti densitas dan porositas.



Gambar 6. Korelasi setiap uji

Model Regresi Non-linear

Persamaan regresi terdiri dari hubungan yang didefinisikan untuk estimasi nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan *modulus elastic* (E) sebagai variabel dependen (terikat) berdasarkan nilai variabel *independent* (bebas). Dalam penelitian ini variabel *independent* (bebas) adalah *point load index*. Tabel 8 menunjukkan koefisien determinasi dan persamaan dari UCS dan *modulus elastic* dengan PLI.

Tabel 8. Hasil Analisis Regresi Non-linear

Persamaan Regresi	Jenis Persamaan	Koefisien Determinasi (R ²)
$UCS = 5,8401e^{0,38477PLI}$	Eksponensial	R ² = 0,62
$UCS = 7,0518PLI^{0,9044}$	Power	R ² = 0,74
$E = 0,63626e^{0,3398PLI}$	Eksponensial	R ² = 0,46
$E = 0,7455PLI^{0,8125}$	Power	R ² = 0,58

Berdasarkan hasil analisis regresi *non-linear*, diperoleh hubungan yang paling baik untuk nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan *point load index* adalah jenis persamaan *power* dengan nilai koefisien determinasi R² = 0,74, sedangkan hubungan yang baik untuk memprediksi nilai *modulus elastic* (E) adalah regresi *power*, dimana nilai koefisien determinasinya R² = 0,58.

Model Regresi Berganda dan Non-linear Berganda

Regresi Berganda dan Non-linear Berganda telah banyak digunakan untuk memprediksi nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan modulus elastic (E) dari batuan menggunakan sifat indeks batuan yang berbeda. Untuk memprediksi nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan modulus elastic (E) dari batu gamping menggunakan regresi berganda dan non-linear berganda dianggap sebagai produk dari tiga parameter input, yaitu bobot isi, porositas dan point load index. Persamaan regresi berganda dan regresi non-linear berganda yang dikembangkan untuk

prediksi nilai kuat tekan uniaksial (UCS) dan modulus elastic (E) ditunjukkan dalam persamaan 28, 29, 30 dan 31.

$$UCS = -69,07 + 31,57d + 0,47n + 3,55I_{(50)} \tag{28}$$

$$E = -2,55 + 1,28d + 0,019n + 0,338I_{(50)} \tag{29}$$

$$UCS = 0,0139xDen^{4,55} xPor^{0,99} xPLI^{0,91} \tag{30}$$

$$E = 0,0346xDen^{2,04} xPor^{0,51} xPLI^{0,82} \tag{31}$$

Tabel 9 merupakan hasil prediksi dari nilai kuat tekan uniaksial (UCS) berdasarkan persamaan 28 dan 30.

Tabel 9. Hasil Prediksi Nilai Kuat Tekan Uniaksial

Sampel	Aktual UCS (MPa)	Prediksi UCS (MPa)		Error	
		Linear Berganda	Non-Linear Berganda	Linear Berganda	Non-linear Berganda
G-01	6,378	8,016	8,441	-1,6381	-2,0633
G-02	14,583	12,729	12,890	1,8547	1,6938
G-03	12,500	10,071	11,307	2,4290	1,1930
G-04	12,766	10,676	12,108	2,0902	0,6585
G-05	10,430	7,493	8,150	2,9366	2,2794
G-06	15,514	14,676	16,823	0,8383	-1,3087
G-07	12,500	8,957	10,780	3,5432	1,7204
G-08	7,701	7,349	8,031	0,3519	-0,3302
G-09	14,006	11,434	13,083	2,5712	0,9226
G-10	12,755	9,641	10,756	3,1141	1,9995
G-11	18,750	18,143	23,686	0,6071	-4,9355
G-12	16,204	12,987	14,736	3,2170	1,4678
G-13	13,477	12,959	15,582	0,5182	-2,1051
G-14	10,656	10,016	11,019	0,6402	-0,3623
G-15	8,503	8,870	8,777	-0,3670	-0,2736
Rata-rata Error				1,7811	1,5542

Dari hasil prediksi nilai kuat tekan uniaksial (Tabel 9), berdasarkan rumus dari hasil analisis pada persamaan 28 dan 30, maka diperoleh rata-rata error sebesar 1,7811 untuk regresi berganda dan

1,5542 untuk regresi non-linear berganda. Tabel 10, merupakan hasil prediksi dari modulus elastic (E) berdasarkan persamaan 29 dan 31.

Tabel 10. Hasil Prediksi Modulus elastic

Sampel	Aktual E (GPa)	Prediksi E (GPa)		Error	
		Linear Berganda	Non-linear Berganda	Linear Berganda	Non-linear Berganda
G-01	0,537	0,8186	0,8499	-0,2818	-0,3132
G-02	1,313	1,1277	1,1669	0,1854	0,1462
G-03	1,341	0,9797	1,0866	0,3614	0,2545
G-04	1,289	1,0296	1,1430	0,2596	0,1461
G-05	1,095	0,8005	0,8469	0,2946	0,2483
G-06	1,454	1,2609	1,4121	0,1935	0,0423
G-07	1,635	0,9657	1,1030	0,6689	0,5316
G-08	1,102	0,7921	0,8353	0,3096	0,2664
G-09	1,301	1,0755	1,2067	0,2251	0,0938
G-10	1,033	0,9517	1,0523	0,0808	-0,0197
G-11	1,711	1,6838	2,0307	0,0267	-0,3202
G-12	1,610	1,1788	1,3123	0,4311	0,2976
G-13	1,416	1,2212	1,4129	0,1952	0,0036
G-14	1,087	0,9667	1,0666	0,1203	0,0203
G-15	0,790	0,8443	0,8486	-0,0547	-0,0590
Rata-rata Error				0,2460	0,1842

Dari hasil prediksi *modulus elastic* (Tabel 10), berdasarkan rumus dari hasil analisis pada persamaan 29 dan 31 maka diperoleh rata-rata *error* sebesar 0,2460 untuk regresi berganda dan 0,1842 untuk regresi *non-linear* berganda.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Korelasi densitas dengan UCS (0,67); Porositas dengan UCS (-0,62) dan korelasi PLI dengan UCS (0,85), sedangkan korelasi densitas dengan *modulus elastic* (0,43); korelasi porositas dengan *modulus elastic* (-0,44) dan korelasi PLI dengan *modulus elastic* (0,74).
2. Berdasarkan nilai koefisien determinasi dari analisis regresi *non-linear* sederhana maka, persamaan *power* lebih baik dari eksponensial dengan nilai R^2 (0,74) untuk prediksi nilai UCS berdasarkan data PLI. Sedangkan untuk prediksi *modulus elastic* berdasarkan data PLI maka jenis persamaan *power* lebih bagus dari jenis persamaan eksponensial dengan nilai R^2 (0,58).
3. Berdasarkan nilai rata-rata *error* atau perbedaan uji laboratorium dan prediksi maka diperoleh, rata-rata *error* UCS sebesar 1,7811 (regresi berganda) dan 1,5542 (regresi *non-linear* berganda) sedangkan rata-rata *error* untuk *modulus elastic* sebesar 0,2460 (regresi berganda) dan 0,1842 (regresi *non-linear* berganda).

DAFTAR PUSTAKA

- Bieniawski, Z.T., The *point load* test in Geotechnical Practice, Engineering Geology, Vol. 9, Elsevier Scientific Publishing, Co., Amsterdam, Netherlands, (1975).
- Broch, E. and Franklin, J.A., The *point load* strength test. Int. J. Rock Mech & Min. Sci. 9: 669-697 (1972)
- Brook, N. (1985) The Equivalent Core Diameter Method of Size and Shape Correction in *Point load* Testing. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 22, 61-70.
- Cargill, J. S., Shakoor, A. (1990): Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial strength of rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 27, 495-503.
- Gunsallus, K. L., Kulhawy, F. H. (1984): A comparative evaluation of rock strength measures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 21, 233-248.
- Greminger, M., 1982, Experimental Studies of the Influence of Rock Anisotropy on Size and Shape Effect in *Point load* Testing, International Journal Rock Mechanic, Vol 19, pp. 241-246, Pergamon Press, Great Britain.
- Hoek, E., 2007. Practical Rock Engineering. Canada.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), Rock Characterization, Testing and Monitoring. ISRM Suggested Method, Brown, E.T (editor). Pergamon Press, Oxford, 1981.
- Kahraman S. 2001. *Evaluation of simple methods for assessing the unconfined compressive strength of rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38, 981-984.
- Kahraman S, Yeken Tekin. 2008. *Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity*, Bull. Eng. Geol. Environ. 67, 277-281.
- Rai, M.A., Kramadibrata, S., dan Wattimena, R.K. 2010. Mekanika Batuan, Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Singh V. K., Singh D. P. (1993): Correlation between *point load* index and compressive strength for quartzite rocks, Geotechnical and Geological Engineering, 11, 269-272.
- Sugiyono. 2013. Statistik Untuk Penelitian, Bandung : Alfabeta Bandung.
- Tsidzi, K. E. N., (1991): *Point load* - uniaxial compressive strength correlation, Proceeding of 7th ISRM Congress, Aachen, Germany, 1, 637-639.
- Vallejo, L. E., Welsh, R. A., Robinson, M. K. (1989): Correlation between unconfined compressive and *point load* strength for Appalachian rocks, Proceeding of 30th US Symposium on Rock Mechanics, Morgantown, 461-468.