



## Analisis Pengaruh Kadar Air dan Porositas terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik, dan Kuat Geser pada Batupasir Formasi Balikpapan dan Pulau Balang, Kabupaten Kutai Kartanegara

Weggie Atanasius Tonapa<sup>1\*</sup>, Albertus Juvensius Pontus<sup>2</sup>, Rety Winonazada<sup>3</sup>, Tommy Trides<sup>4</sup>, Ardhan Ismail<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Indonesia

\*Penulis Korespondensi: [watonapa16@gmail.com](mailto:watonapa16@gmail.com)

**Abstract.** *Compressive strength, tensile strength, and shear strength are the primary parameters used to evaluate the mechanical capacity of rocks to withstand loads, endure tension, and resist shear forces. The physical property variables believed to influence these mechanical properties are moisture content and porosity. Moisture content and porosity represent the percentage of water and the volume of pores or voids within the rock, expressed in percent (%). Therefore, this study aims to analyze the influence of moisture content and porosity on the mechanical strength of rocks, specifically compressive strength, tensile strength, and shear strength expressed through cohesion (c) and the internal friction angle ( $\phi$ ) in the sandstones of the Balikpapan and Pulau Balang Formations. This research employed laboratory testing of physical and mechanical properties on intact rock samples obtained from sandstone outcrops, which were subsequently processed using statistical analysis methods, including linear regression, the coefficient of determination ( $R^2$ ), and the correlation coefficient (r). The results indicate that variations in moisture content and porosity have a highly significant influence and are inversely proportional to the mechanical strength values of the rock. Specifically, higher moisture content and porosity lead to a decrease in the mechanical strength parameters (compressive, tensile, and shear strength) of the sandstones in both formations. This is evidenced by the negative linear trends and correlation/ $R^2$  values ranging from 0.96 to 1.*

**Keywords:** *Compressive Strength; Moisture Content; Porosity; Sandstone; Shear Strength; Tensile Strength.*

**Abstrak.** Kuat tekan, kuat tarik, dan kuat geser merupakan parameter utama dalam menilai kemampuan mekanik batuan dalam menahan beban, menerima tarikan, serta melawan gaya geser. Adapun variabel sifat fisik yang diyakini berpengaruh terhadap sifat mekanik batuan adalah kadar air dan porositas. Kadar air dan porositas menggambarkan persentase jumlah air dan volume pori/ruang kosong yang terdapat di dalam batuan yang dinyatakan dalam persen (%). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kadar air dan porositas terhadap nilai kekuatan mekanik batuan yakni kuat tekan, kuat tarik, dan kuat geser yang dinyatakan melalui kohesi (c) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) pada batupasir Formasi Balikpapan dan Pulau Balang. Penelitian ini menggunakan pengujian laboratorium yakni sifat fisik dan mekanik pada sampel batuan utuh (*intan rock*) yang berasal dari singkapan batupasir kemudian diolah dengan metode analisis statistik menggunakan regresi linear, koefisien determinasi ( $R^2$ ), dan koefisien korelasi (r). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kadar air dan porositas memiliki pengaruh yang sangat signifikan serta berbanding terbalik dengan nilai kekuatan mekanik batuan. Di mana semakin tinggi kadar air dan porositas maka nilai parameter kekuatan mekanik yakni kuat tekan, kuat tarik dan kuat geser batupasir pada kedua formasi semakin menurun. Hal ini dibuktikan dengan hasil tren linear negatif serta nilai korelasi dan  $R^2$  yang berkisar antara 0,96 hingga 1.

**Kata Kunci:** Batupasir; Kadar Air; Kuat Geser; Kuat Tarik; Kuat Tekan; Porositas.

### 1. LATAR BELAKANG

Sifat fisik dan mekanik batuan merupakan aspek fundamental yang sangat penting dalam studi geoteknik, eksplorasi geologi, serta rekayasa sipil. Sifat fisik batuan, yakni kadar air merupakan suatu perbandingan antara berat air dalam batuan dengan berat butiran batuan dan porositas merupakan rasio volume rongga-rongga pori terhadap volume total seluruh batuan. Sementara kuat tekan, tarik dan geser batuan merupakan sebuah parameter kekuatan mekanik pada batuan. Kuat tekan adalah tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh batuan

sebelum mengalami kegagalan. Kuat tarik batuan adalah nilai tegangan tertinggi yang dapat ditahan oleh batuan akibat tarikan sebelum batuan tersebut terbelah. Kuat geser batuan adalah kemampuan batuan melawan tegangan geser yang terjadi pada saat batuan itu diberikan beban (Zhang et al., 2023).

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengujian untuk menganalisis dan mengetahui bagaimana hubungan pengaruh sifat fisik yakni kadar air dan porositas terhadap perilaku mekanik batupasir melalui kuat tekan, kuat tarik dan kuat geser pada formasi Balikpapan dan Pulau Balang yang merupakan representasi yang sangat baik dari kondisi batuan sedimen khususnya batupasir yang mendominasi Wilayah Kutai Kartanegara, yang memiliki karakteristik litologi yang mirip namun terbentuk pada kondisi lingkungan pengendapan yang berbeda sehingga menyebabkan variasi pada sifat fisik dan mekanik batupasir yang tersusun di dalamnya. Sehingga penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan basis data terkait literatur geoteknik serta memberikan data empiris yang relevan untuk kepentingan praktis maupun teoritis dalam keilmuan geoteknik di wilayah Kalimantan Timur.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Batupasir**

Batupasir adalah batuan sedimen klastik yang sebagian besar terdiri dari butiran silikat berukuran pasir (0,0625 hingga 2 mm) yang disatukan oleh mineral lain. Batupasir mencakup sekitar 20–25% dari semua batuan sedimen. Sebagian besar batupasir tersusun dari kuarsa atau feldspar, karena keduanya merupakan mineral yang paling tahan terhadap proses pelapukan di permukaan bumi. Komposisi batupasir umumnya didominasi oleh kuarsa, karena mineral ini sangat tahan terhadap pelapukan. Selain kuarsa, terdapat juga feldspar dan beberapa mineral lain, yang bergantung pada lingkungan asal batuan ini. Porositas yang tinggi merupakan ciri khas batupasir, yang berarti ada banyak ruang antar butiran pasir yang memungkinkan aliran air atau cairan lain (Fadhilah et al., 2024).

### **Sifat Fisik Batuan**

Sifat fisik batuan merupakan sifat batuan yang dapat dilihat secara langsung terhadap fisik batuan, atau sifat fisik merupakan sifat atau karakter batuan dalam keadaan asli. Uji sifat fisik berguna sebagai data pendukung dari batuan yang akan diuji, apabila hasil dari uji sifat fisik batuan yang diuji menunjukkan ketidakseragaman, hal ini menjadi indikasi tidak meratanya *kekuatan* batuan atau dengan kata lain batuan yang diuji sangat bervariasi (heterogen) (Arif, 2016).

### ***Kadar Air***

Kadar air pada batuan adalah salah satu parameter penting yang mempengaruhi sifat fisik dan mekanik batuan. Kadar air didefinisikan sebagai persentase berat air yang terkandung dalam batuan dibandingkan dengan berat kering batuan tersebut. Pengaruh kadar air secara umum lebih besar pada batuan sedimen dibandingkan dengan batuan beku dan batuan metamorf. Sedikit peningkatan kadar air pada batuan sangat memengaruhi kuat tekan suatu batuan terutama pada batuan sedimen (Banunaek et al., 2021). Keberadaan air pada batuan dapat mempengaruhi perubahan sifat fisik dan mekanik batuan seperti kuat tekan, kuat tarik dan karakteristik kuat geser batuan. Perubahan sifat ini dapat menyebabkan penurunan faktor keamanan pada suatu bidang lereng ataupun lahan yang bisa mengakibatkan terjadinya longsoran ataupun runtuh (tanah turun) yang mengakibatkan kerusakan lingkungan, terancamnya keselamatan jiwa serta kerugian dari segi ekonomi dan waktu (Irfan et al., 2023).

### ***Porositas***

Porositas merupakan perbandingan volume rongga-rongga pori terhadap volume total seluruh batuan yang biasanya dinyatakan dalam persen (%). Porositas menjelaskan ukuran dari ruang kosong di antara material, dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume, yang bernilai antara 0 dan 1, atau sebagai persentase antara 0-100% keberadaan rongga-rongga ini dapat berupa ruang antarbutir, rekahan, maupun lubang akibat proses pelarutan (Irfan et al., 2023). Porositas dikontrol oleh bentuk dan susunan butir material, derajat sortasi, pemadatan, sementasi, retakan dan pelapukan pelarutan. Ada dua jenis porositas yang dikenal dalam teknik reservoir, yaitu porositas absolut merupakan rasio volume pori-pori total batuan terhadap volume total batuan dan porositas efektif merupakan rasio volume pori-pori yang saling berhubungan terhadap volume total batuan (Banunaek et al., 2021).

### ***Sifat Mekanik Batuan***

Sifat mekanik batuan adalah karakteristik yang menggambarkan perilaku batuan ketika dikenakan beban atau tekanan. Sifat-sifat ini sangat penting dalam berbagai aplikasi teknik, seperti dalam rekayasa sipil, geoteknik, dan eksplorasi sumber daya alam. Beberapa sifat mekanik batuan meliputi kekuatan tekan, kekuatan tarik, kekuatan geser, dan elastisitas (Supandi, 2022). Kekuatan dan ketahanan suatu batuan diperoleh dari pengujian sifat mekanik batuan, dimana kekuatan batuan adalah kemampuan suatu batuan mempertahankan kekuatannya hingga pecah dan ketahanan batuan yaitu kemampuan batuan bertahan ketika mengalami kondisi yang berulang atau dapat disebut basah-kering (Rai et al., 2014).

### ***Kuat Tekan Uniaksial***

Kekuatan tekan batuan adalah kemampuan mekanik batuan untuk menahan beban yang diterapkan secara vertikal. Tujuannya adalah untuk menentukan seberapa besar tekanan yang dapat diterima oleh batuan sebelum mengalami kehancuran. Kekuatan tekan bervariasi tergantung pada jenis batuan, dengan batuan beku umumnya memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan batuan sedimen. Secara teoritis, kegagalan (*failure*) pada uji kuat tekan terjadi ketika tegangan yang diberikan melampaui ikatan kohesi dan gesekan antar butir penyusun batuan tersebut (Bieniawski, 1976).

Pengujian kuat tekan pada batuan di laboratorium umumnya dapat dilakukan dengan uji kuat tekan uniaksial/*Uniaxial Compressive Strength* (UCS). Secara teoretis UCS mempresentasikan kekuatan tekan puncak dari material batuan yang masif. UCS diukur pada sampel batuan berbentuk silinder dengan perbandingan tinggi terhadap diameter 2:1 yang diberikan beban tekan secara bertahap hingga mencapai titik kehancuran. Nilai UCS kemudian dihitung dengan membandingkan gaya tekan maksimum dengan luas penampang sampel batuan (Bieniawski, 1976). Untuk perhitungan kuat tekan uniaksial dapat di lihat pada Persamaan 1:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(I)$$

Keterangan:

- $\sigma_c$  = Kuat tekan uniaksial batuan (Mpa)
- $F$  = Gaya yang berkerja pada saat sampel batu hancur (KN)
- $A$  = Luas penampang sampel batuan (cm<sup>2</sup>)
- $\phi$  = Sudut geser dalam (°)

Pengklasifikasian nilai kuat tekan uniaksial sangat krusial dalam menentukan kualitas mekanik batuan untuk mengelompokkan massa batuan ke dalam kategori tertentu berdasarkan rentang nilai kekuatan yang dimiliki suatu batuan. Penggunaan klasifikasi yang baku memastikan bahwa data hasil pengujian dapat diterjemahkan menjadi informasi yang relevan dengan kondisi aktual dilapangan. *Internasional Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) merupakan salah satu standar acuan internasional dalam mengevaluasi tingkat kekuatan batuan berdasarkan nilai *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) seperti terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Klasifikasi Kuat Tekan Menurut ISRM (1981).

| Klasifikasi        | UCS (MPa) |
|--------------------|-----------|
| Sangat-sangat kuat | >250      |
| Sangat kuat        | 100-250   |
| Kuat               | 50-100    |
| Sedang             | 25-50     |
| Lemah              | 5-25      |
| Sangat lemah       | 1-5       |

Sangat-sangat lemah

<1

### **Kuat Tarik Tidak Langsung**

Menurut ASTM D 653-67 *standard definition of terms and symbol*, kuat tarik dari suatu material didefinisikan sebagai nilai tegangan maksimum yang dikembangkan oleh suatu sampel material. Secara praktis, kuat tarik dipandang sebagai nilai tegangan maksimum yang dikembangkan oleh suatu sampel material dalam suatu pengujian tarikan yang dilakukan untuk memecah batuan dalam kondisi tertentu (Arif, 2016).

Adapun salah satu metode yang digunakan untuk mengukur kuat tarik batuan yaitu uji kuat tarik tidak langsung/*Indirect Tensile Strength* (ITS). Kuat tarik tidak langsung merupakan kemampuan batuan untuk menahan gaya tarik murni yang bekerja pada satu arah sumbu hingga batuan tersebut mengalami keruntuhan (Bieniawski, 1976). Untuk mendapatkan nilai kuat tarik tidak langsung ( $\sigma_t$ ) dicari dengan menggunakan rumus seperti pada Persamaan 2:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot t} \dots\dots\dots (II)$$

Keterangan:

$\sigma_t$  = Kuat tarik batuan (Mpa)

$F$  = Gaya yang berkerja pada saat sampel batu hancur (KN)

$D$  = Diameter sampel batuan (cm)

$t$  = Tinggi sampel batuan (cm)

Pengklasifikasian nilai kuat tarik (*tensile strength*) merupakan tahapan yang krusial dalam analisis kekuatan batuan dalam menahan gaya tarik. Dengan merujuk pada standar klasifikasi, penentuan kelas kekuatan dapat memberikan dasar yang kuat dalam memprediksi perilaku massa batuan khususnya kekuatan tarik suatu batuan. ISRM (1973) menyusun klasifikasi kekuatan batuan dan memberikan pedoman bahwa nilai kuat tarik batuan umumnya berkisar antara 1/10 hingga 1/20 dari nilai kuat tekannya (UCS) seperti yang terlihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Klasifikasi Kuat Tarik batuan (Modifikasi ISRM, 1981).

| Klasifikasi         | ITS (MPa) |
|---------------------|-----------|
| Sangat-sangat kuat  | >25       |
| Sangat kuat         | 10-25     |
| Kuat                | 5-10      |
| Sedang              | 2,5-5     |
| Lemah               | 1-2,5     |
| Sangat lemah        | 0,25-1    |
| Sangat-sangat lemah | <0,25     |

### **Kuat Geser Langsung**

Kuat geser batuan adalah parameter mekanika batuan yang sangat penting dalam geoteknik, terutama untuk analisis stabilitas lereng, desain terowongan, fondasi, dan struktur geoteknik lainnya. Kuat geser menggambarkan kemampuan batuan untuk menahan tegangan geser sebelum terjadi keruntuhan atau pergeseran. Nilai ini biasanya dicirikan oleh dua parameter *Mohr-Coulomb*: kohesi ( $c$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Secara umum, untuk mengetahui kekuatan geser batuan yang paling sering digunakan yaitu Uji Geser Langsung (*Direct Shear Test*). Uji geser langsung adalah metode pengujian laboratorium di mana sampel batuan ditempatkan dalam sebuah kotak geser (*shear box*) dan dikenai beban normal (tegak lurus terhadap bidang geser) dan kemudian beban geser horizontal hingga terjadi kegagalan sepanjang bidang geser yang telah ditentukan. Uji ini memungkinkan pengukuran langsung kohesi dan sudut geser dalam batuan (Hoek and Brown, 1997).

Kriteria *Mohr-Coulomb* menyatakan bahwa kegagalan geser akan terjadi ketika tegangan geser yang bekerja pada suatu bidang melebihi kombinasi kohesi dan komponen gesekan yang timbul dari tekanan normal yang secara matematis, ini dinyatakan sebagai  $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$  (Bieniawski, 1976). Untuk mencari besarnya nilai kekuatan geser batuan dapat menggunakan rumus seperti pada Persamaan 3:

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \phi \dots\dots\dots(III)$$

Keterangan:

$\tau_f$  = Kuat geser atau tegangan geser pada saat keruntuhan (kPa)

$c$  = Kohesi (MPa)

$\sigma_n$  = Tegangan normal yang diterapkan (kPa)

$\phi$  = Sudut geser dalam ( $^\circ$ )

**Korelasi Pengaruh Sifat Fisik Terhadap Kekuatan Mekanik Batuan**

Sifat fisik batuan merupakan parameter fundamental yang menentukan bagaimana batuan akan berperilaku saat menerima beban teknis atau tegangan induksi. Karakteristik mekanik pada batuan sendiri tidak dapat berdiri sendiri tanpa mempertimbangkan kondisi fisik material tersebut (Winonazada et al., 2020). Peningkatan kadar air pada batuan sedimen akan mengakibatkan penurunan nilai kekuatan mekanik yang signifikan karena air yang masuk kedalam pori batuan akan bertindak sebagai pelumas antar butir dan menurunkan gaya gesek internal batuan. Sementara keberadaan rongga atau ruang pori di dalam massa batuan secara langsung mereduksi luas penampang efektif yang berfungsi dalam menahan beban serta menjadi zona konsentrasi tegangan yang mempercepat proses keruntuhan pada batuan (Schon, 2011).

## **Analisis Statistik**

Metode analisis statistik merujuk pada serangkaian teknik dan prosedur matematis yang digunakan untuk mengumpulkan, mengatur, meringkas, menyajikan, menganalisis, dan menafsirkan data. Metode analisis statistik bertujuan untuk mendeskripsikan gambaran terhadap objek yang diteliti melalui data sampel atau populasi. Gambaran dapat berupa ukuran pemusatan/ *tendency* (rata-rata, median, modus, proporsi), ukuran letak/ posisi (kuartil, desil, persentil) maupun ukuran dispersi/ keragaman data (jangkauan/*range*, standar deviasi dan varian/ragam) (Sihombing, 2022).

### ***Regresi Linear***

Menurut Sahir (2021), regresi merupakan metode untuk mencari pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Variabel bebas atau independen atau sering disebut variabel X merupakan variabel penyebab. Variabel terikat atau dependen atau variabel Y merupakan variabel akibat. Analisis regresi dipakai untuk memprediksi, bagaimana suatu variabel mempengaruhi variabel lain dan untuk mengetahui bentuk-bentuk hubungan tersebut. Regresi sederhana merupakan analisis yang terdiri hanya dua variabel yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Regresi sederhana dapat dijabarkan seperti pada Persamaan 4:

$$Y = a + bX \dots\dots\dots(IV)$$

Keterangan:

a = Konstanta (apabila nilai x sebesar 0, maka Y akan sebesar a atau konstanta)

b = Koefisien regresi (nilai peningkatan atau penurunan)

X = Variabel bebas (independen)

Y = Variabel terikat (depeden)

### ***Koefisien Determinasi***

Koefisien determinasi sering disimbolkan dengan  $R^2$ , pada prinsipnya melihat pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Bila angka koefisien determinasi dalam model regresi terus menjadi kecil atau semakin dekat dengan nol berarti semakin kecil pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat atau nilai  $R^2$  semakin mendekati 100% berarti semakin besar pengaruh semua variabel bebas terhadap variabel terikat (Sahir, 2021) seperti terlihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Nilai Koefisien Determinasi (Engkus, 2019).

| <b>0%≤KD≤100%</b> | <b>Tingkat</b>           |
|-------------------|--------------------------|
| 81% - 100%        | Sangat Tinggi            |
| 49% - 80%         | Tinggi                   |
| 17% - 48%         | Cukup Tinggi             |
| 5% - 16%          | Rendah tapi pasti        |
| 0% - 4%           | Rendah atau lemah sekali |

Rumus koefisien determinasi seperti pada Persamaan 5:

$$KD = R^2 \times 100\% \dots\dots\dots(V)$$

Keterangan:

KD = Nilai Koefisien Determinasi

R<sup>2</sup> = Nilai Koefisien Korelasi

**Koefisien Korelasi**

Menurut (Sihombing, 2022), pengujian korelasi (r) digunakan untuk melihat arah dan kuat/besaran hubungan antar variabel. Misalnya di dalam analisis menggunakan variabel X dan Y, maka diasumsikan bahwa dua buah variabel digunakan ukuran koefisien korelasi korelasi (r), besarnya koefisien korelasi antara dua variabel adalah 0 sampai dengan 1. Apabila kedua variabel mempunyai nilai r = 0, berarti kedua variabel tersebut tidak memiliki suatu hubungan. Sedangkan, apabila kedua variabel mempunyai nilai r = ± 1, maka kedua variabel tersebut memiliki hubungan yang sangat kuat. Sementara untuk korelasi yang bertanda positif dan negatif menandakan hubungan searah dan berlawanan arah yang menunjukkan kenaikan maupun penurunan suatu variabel yang diikuti oleh variabel lainnya seperti terlihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Nilai Koefisien Korelasi (r) (Fitri et al, 2023).

| <b>Nilai (r)</b>              | <b>Makna</b> |
|-------------------------------|--------------|
| 0,9 s.d. 1 / -0,9 s.d. -1     | Sangat Kuat  |
| 0,7 s.d. 0,9 / -0,7 s.d. -0,9 | Kuat         |
| 0,5 s.d. 0,7 / -0,5 s.d. -0,7 | Sedang       |
| 0,3 s.d. 0,5 / -0,3 s.d. -0,5 | Lemah        |
| 0 s.d. 0,3 / -0 s.d. -0,3     | Sangat Lemah |

**3. METODOLOGI PENELITIAN**

**Metode Pengumpulan Data**

Data yang diperlukan dan digunakan dalam penelitian ini yaitu data primer dan sekunder. Data primer berupa bongkahan atau batuan utuh (*intan rock*) yang diambil dari singkapan batupasir pada 3 (tiga) lokasi berbeda pada kedua formasi serta pengambilan titik

koordinat pada setiap lokasi pengambilan sampel batuan yakni batupasir. Pengambilan sampel batuan dan titik koordinat pada tiap lokasi dilakukan dengan *manual sampling* dan secara langsung di lapangan untuk kemudian diuji dan diolah secara lanjut.

Sementara untuk data sekunder berupa peta kesampaian daerah dan peta geologi regional. Peta tersebut dihasilkan dari hasil titik koordinat yang di-*plotting* ke dalam *software* Arcgis untuk mengetahui dan mendapatkan letak lokasi pengambilan sampel dan mengetahui jenis formasi yang terdapat dan termasuk pada wilayah penelitian.

### **Metode Pengolahan Data**

Sampel batuan yang telah diambil dari lapangan kemudian dilakukan preparasi untuk mengolah bongkahan menjadi sampel uji yang memenuhi kriteria geometri sesuai dengan standar teknis yang berlaku. Kemudian dilakukan pengujian laboratorium yakni uji sifat fisik untuk mendapatkan nilai kadar air dan porositas serta uji sifat mekanik berupa kuat tekan uniaksial, kuat tarik tidak langsung, dan kuat geser langsung untuk mendapatkan nilai kekuatan mekanik (tekan, tarik, dan geser) pada batuan khususnya batupasir yang kemudian dianalisis secara lanjut.

### **Metode Analisis Data**

Data hasil pengujian dari laboratorium kemudian diolah dan dianalisis dengan metode analisis statistik menggunakan regresi linear sederhana, koefisien determinasi ( $R^2$ ), dan koefisien korelasi ( $r$ ) untuk mendapatkan model persamaan regresi, serta mengetahui seberapa besar pengaruh dan hubungan pada variabel X terhadap variabel Y.

## **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Lokasi Pengambilan Sampel**

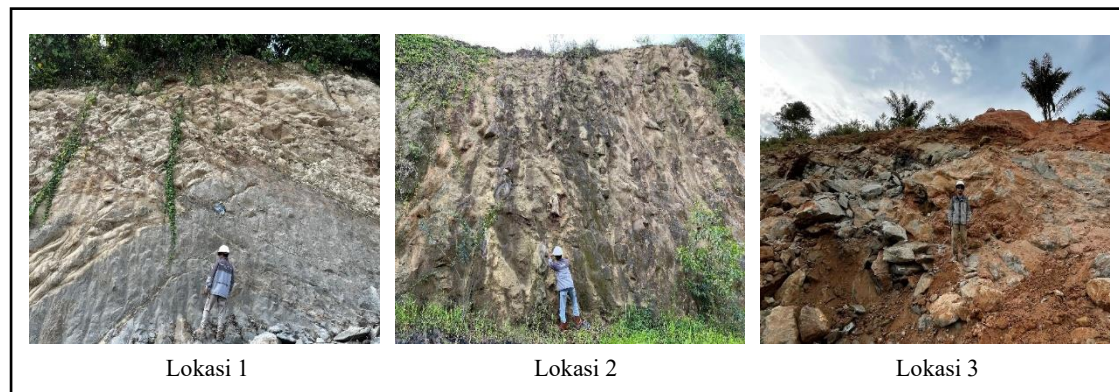
Pengambilan sampel batuan dilakukan di 6 (enam) lokasi singkapan batupasir yakni 3 (tiga) lokasi pada Formasi Balikpapan dan 3 (tiga) lokasi pada Formasi Pulau Balang, dimana pada setiap lokasi diambil 3 (tiga) titik yang mewakili lokasi tersebut untuk mendapatkan nilai rata-rata kekuatan fisik dan mekanik batupasir pada kedua formasi yang tersebar di wilayah Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Pemilihan lokasi pengambilan sampel ditentukan berdasarkan integrasi peta geologi lembar Samarinda dan orientasi jalur lintasan lapangan dengan mempertimbangkan tingkat kesegaran batuan (*fresh rock*) pada kondisi singkapan batuan yakni batupasir yang dapat mewakili masing-masing formasi, sehingga data yang diperoleh dapat meminimalkan bias akibat faktor pelapukan sekunder di

permukaan singkapan. Kondisi visual pada tiap lokasi singkapan batupasir dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



**Gambar 1.** Lokasi Sampel Batupasir Formasi Balikpapan.

Pada Formasi Balikpapan, sampel batuan diambil pada tiga lokasi singkapan batupasir yang berbeda di mana pada lokasi 1 terletak di Desa Purwajaya, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara. Lokasi 2 terletak di Desa Dayaku, Bakungan, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara. Lokasi 3 terletak di Desa Tlk. Dalam, Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur.



**Gambar 2.** Lokasi Sampel Batupasir Formasi Pulau Balang.

Pada Formasi Pulau Balang, pengambilan sampel batuan juga dilakukan pada tiga lokasi singkapan batupasir yang berbeda dimana pada lokasi 1 terletak di Desa Loh Sumber, Kecamatan Loa Kulu, Kabupaten Kutai Kartanegara. Lokasi 2 terletak di Desa Bukit Raya, Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara. Lokasi 3 terletak di Jl. Poros Samarinda-Bontang, Tanah Datar, Kecamatan Muara Badak, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur.

### **Hasil Uji Sifat Fisik Batupasir**

Pada penelitian ini dilakukan pengujian sifat fisik batuan di Laboratorium Teknologi Mineral dan Batubara, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman. Pengujian ini bertujuan

untuk mendapatkan nilai parameter awal sifat fisik berat natural ( $W_n$ ), berat jenuh ( $W_w$ ), berat jenuh tergantung ( $W_s$ ), dan juga berat kering ( $W_o$ ) yang kemudian diolah lebih lanjut untuk mendapatkan nilai rata-rata pada kadar air dan porositas batuan khususnya batupasir pada kedua formasi seperti terlihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

**Tabel 5.** Hasil Uji Sifat Fisik Formasi Balikpapan.

| Lokasi | Kode Sampel      | Sifat Fisik   |               |
|--------|------------------|---------------|---------------|
|        |                  | Kadar Air (%) | Porositas (%) |
| 1      | FB-01_A          | 4,84          | 22,01         |
|        | FB-01_B          | 4,47          | 21,32         |
|        | FB-01_C          | 6,00          | 24,81         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>5,10</b>   | <b>22,72</b>  |
| 2      | FB-02_A          | 7,37          | 30,30         |
|        | FB-02_B          | 7,55          | 31,09         |
|        | FB-02_C          | 6,99          | 29,01         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>7,30</b>   | <b>30,13</b>  |
| 3      | FB-03_A          | 8,98          | 34,15         |
|        | FB-03_B          | 9,36          | 35,19         |
|        | FB-03_C          | 9,73          | 36,43         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>9,36</b>   | <b>35,26</b>  |

**Tabel 6.** Hasil Uji Sifat Fisik Formasi Pulau Balang.

| Lokasi | Kode Sampel      | Sifat Fisik   |               |
|--------|------------------|---------------|---------------|
|        |                  | Kadar Air (%) | Porositas (%) |
| 1      | FPB-01_A         | 1,99          | 10,20         |
|        | FPB-01_B         | 1,96          | 10,67         |
|        | FPB-01_C         | 1,96          | 11,11         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>1,97</b>   | <b>10,66</b>  |
| 2      | FPB-02_A         | 2,50          | 11,92         |
|        | FPB-02_B         | 2,67          | 12,46         |
|        | FPB-02_C         | 2,46          | 12,79         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>2,54</b>   | <b>12,39</b>  |
| 3      | FPB-03_A         | 4,24          | 18,18         |
|        | FPB-03_B         | 3,75          | 16,67         |
|        | FPB-03_C         | 3,18          | 15,22         |
|        | <b>Rata-rata</b> | <b>3,73</b>   | <b>16,69</b>  |

Berdasarkan kedua tabel, terlihat nilai sifat fisik batupasir pada Formasi Balikpapan menunjukkan nilai kadar air rata-rata sebesar 5,10% hingga 9,36%, dengan porositas sebesar 22,72% hingga 35,26%. Sementara pada batupasir Formasi Pulau Balang memiliki nilai kadar air rata-rata yang lebih rendah yaitu sebesar 1,97% sampai 3,73%, dengan porositas yang juga lebih rendah sebesar 10,66% sampai 16,69%.

### Hasil Uji Sifat Mekanik Batupasir

Pengujian sifat mekanik batuan dilakukan di Laboratorium Teknologi Mineral dan Batubara, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai parameter kekuatan mekanik batuan meliputi uji kuat tekan uniaksial, uji kuat tarik tidak langsung, serta uji kuat geser langsung pada batupasir kedua formasi seperti terlihat pada Tabel 7 sampai dengan Tabel 12.

### ***Uji Kuat Tekan Uniaksial***

**Tabel 7.** Hasil Uji Kuat Tekan Formasi Balikpapan.

| Lokasi | Sampel | F. Puncak (kN) | UCS (Mpa) | Rata-rata (Mpa) | Klasifikasi |
|--------|--------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1      | FB01-A | 35             | 27,87     | 27,87           | Sedang      |
|        | FB01-B | 33             | 26,27     |                 |             |
|        | FB01-C | 37             | 29,46     |                 |             |
| 2      | FB02-A | 30             | 23,89     | 23,89           | Lemah       |
|        | FB02-B | 32             | 25,48     |                 |             |
|        | FB02-C | 28             | 22,29     |                 |             |
| 3      | FB03-A | 22             | 17,52     | 18,58           | Lemah       |
|        | FB03-B | 23             | 18,31     |                 |             |
|        | FB03-C | 25             | 19,90     |                 |             |

**Tabel 8.** Hasil Uji Kuat Tekan Formasi Pulau Balang.

| Lokasi | Sampel  | F. Puncak (kN) | UCS (Mpa) | Rata-rata (Mpa) | Klasifikasi |
|--------|---------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1      | FPB01-A | 85             | 67,68     | 69,00           | Kuat        |
|        | FPB01-B | 87             | 69,27     |                 |             |
|        | FPB01-C | 88             | 70,06     |                 |             |
| 2      | FPB02-A | 77             | 61,31     | 62,37           | Kuat        |
|        | FPB02-B | 80             | 63,69     |                 |             |
|        | FPB02-C | 78             | 62,10     |                 |             |
| 3      | FPB03-A | 68             | 54,14     | 53,08           | Kuat        |
|        | FPB03-B | 65             | 51,75     |                 |             |
|        | FPB03-C | 67             | 53,34     |                 |             |

Berdasarkan kedua tabel, didapatkan nilai UCS rata-rata batupasir pada Formasi Balikpapan sebesar 18,58 MPa sampai 27,87 MPa yang tergolong ke dalam kekuatan lemah hingga sedang. Pada Formasi Pulau Balang didapatkan nilai UCS rata-rata sebesar 53,08 MPa sampai 69,00 MPa yang tergolong ke dalam kekuatan kuat. Sehingga secara keseluruhan batupasir pada Formasi Pulau Balang memiliki nilai UCS dan tingkat kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan batupasir pada Formasi Balikpapan.

### ***Uji Kuat Tarik Tidak Langsung***

**Tabel 9.** Hasil Uji Kuat Tarik Formasi Balikpapan.

| Lokasi | Sampel | F. Puncak (kN) | ITS (Mpa) | Rata-rata (Mpa) | Klasifikasi |
|--------|--------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1      | FB01-A | 7              | 2,79      | 2,79            | Sedang      |
|        | FB01-B | 6              | 2,39      |                 |             |
|        | FB01-C | 8              | 3,18      |                 |             |
| 2      | FB02-A | 6              | 2,39      | 2,39            | Lemah       |
|        | FB02-B | 7              | 2,79      |                 |             |
|        | FB02-C | 5              | 1,99      |                 |             |
| 3      | FB03-A | 3              | 1,19      | 1,86            | Lemah       |

|        |   |      |
|--------|---|------|
| FB03-B | 5 | 1,99 |
| FB03-C | 6 | 2,39 |

**Tabel 10.** Hasil Uji Kuat Tarik Formasi Pulau Balang.

| Lokasi | Sampel  | F. Puncak (kN) | ITS (Mpa) | Rata-rata (Mpa) | Klasifikasi |
|--------|---------|----------------|-----------|-----------------|-------------|
| 1      | FPB01-A | 16             | 6,37      | 6,90            | Kuat        |
|        | FPB01-B | 17             | 6,77      |                 |             |
|        | FPB01-C | 19             | 7,56      |                 |             |
| 2      | FPB02-A | 15             | 5,97      | 6,24            | Kuat        |
|        | FPB02-B | 16             | 6,37      |                 |             |
|        | FPB02-C | 16             | 6,37      |                 |             |
| 3      | FPB03-A | 14             | 5,57      | 5,31            | Kuat        |
|        | FPB03-B | 13             | 5,18      |                 |             |
|        | FPB03-C | 13             | 5,18      |                 |             |

Berdasarkan kedua tabel, didapatkan nilai ITS rata-rata batupasir pada Formasi Balikpapan sebesar 1,86 MPa sampai 2,79 MPa yang tergolong ke dalam kekuatan lemah hingga kuat. Pada Formasi Pulau Balang didapatkan nilai ITS rata-rata yang lebih tinggi yaitu sebesar 5,31 MPa sampai 6,90 MPa yang tergolong ke dalam kekuatan kuat. Sehingga secara keseluruhan batupasir pada Formasi Pulau Balang memiliki nilai ITS dan tingkat kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan batupasir pada Formasi Balikpapan.

### ***Uji Kuat Geser Langsung***

**Tabel 11.** Hasil Uji Kuat Geser Formasi Balikpapan.

| Lokasi | Kode Sampel | Beban (Kg) | Tegangan Normal (kPa) | Tegangan Geser (kPa) | Kohesi (kPa) | Sudut Geser Dalam (°) |
|--------|-------------|------------|-----------------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| 1      | FB01-A      | 5,5        | 43,26                 | 188,32               | 164,95       | 29,22                 |
|        | FB01-B      | 8,7        | 67,65                 | 204,02               |              |                       |
|        | FB01-C      | 15         | 117,32                | 230,17               |              |                       |
| 2      | FB02-A      | 5,5        | 43,26                 | 151,71               | 129,43       | 26,53                 |
|        | FB02-B      | 8,7        | 67,65                 | 162,17               |              |                       |
|        | FB02-C      | 15         | 117,32                | 188,32               |              |                       |
| 3      | FB03-A      | 5,5        | 43,26                 | 115,09               | 96,2         | 22,95                 |
|        | FB03-B      | 8,7        | 67,65                 | 125,55               |              |                       |
|        | FB03-C      | 15         | 117,32                | 146,47               |              |                       |

**Tabel 12.** Hasil Uji Kuat Geser Formasi Pulau Balang.

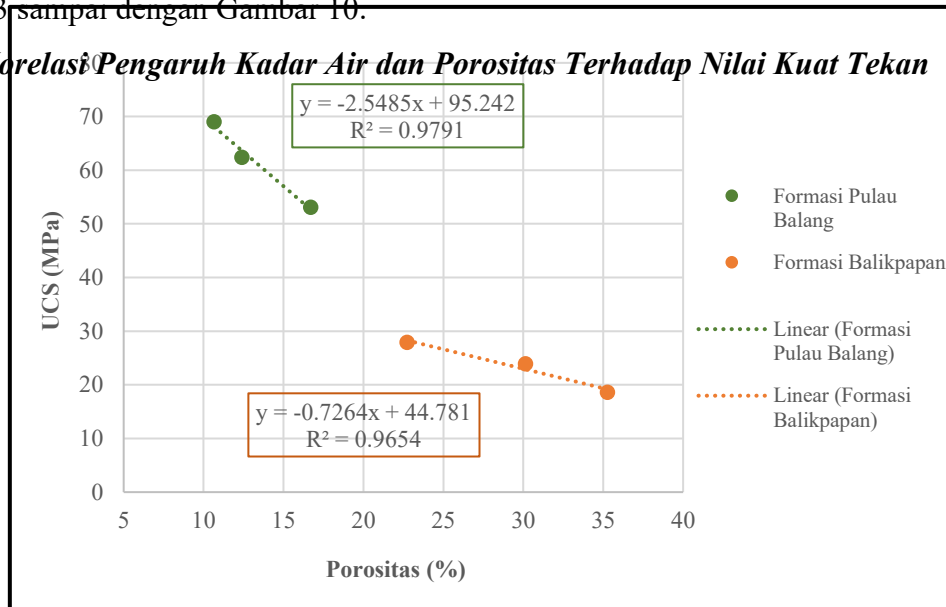
| Lokasi | Kode Sampel | Beban (Kg) | Tegangan Normal (kPa) | Tegangan Geser (kPa) | Kohesi (kPa) | Sudut Geser Dalam (°) |
|--------|-------------|------------|-----------------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| 1      | FPB01-A     | 5,5        | 43,26                 | 481,27               | 438,54       | 46,21                 |
|        | FPB01-B     | 8,7        | 67,65                 | 512,66               |              |                       |
|        | FPB01-C     | 15         | 117,32                | 559,74               |              |                       |
| 2      | FPB02-A     | 5,5        | 43,26                 | 423,73               | 383,19       | 42,69                 |
|        | FPB02-B     | 8,7        | 67,65                 | 444,65               |              |                       |
|        | FPB02-C     | 15         | 117,32                | 491,74               |              |                       |
| 3      | FPB03-A     | 5,5        | 43,26                 | 345,26               | 312,75       | 37,64                 |
|        | FPB03-B     | 8,7        | 67,65                 | 366,19               |              |                       |
|        | FPB03-C     | 15         | 117,32                | 402,80               |              |                       |

Berdasarkan kedua tabel, didapatkan nilai parameter kuat geser batupasir pada Formasi Balikpapan yakni kohesi sebesar 96,82 kPa sampai 164,95 kPa dengan sudut geser dalam sebesar 22,95° sampai 29.22°. Sementara pada Formasi Pulau Balang memiliki kohesi yang lebih besar yaitu 312,75 kPa hingga 438,54 kPa dengan sudut geser dalam sebesar 37,64° sampai 46,21°. Sehingga secara keseluruhan batupasir pada Formasi Pulau Balang memiliki nilai kohesi dan sudut geser dalam yang lebih besar dibandingkan dengan batupasir pada Formasi Balikpapan.

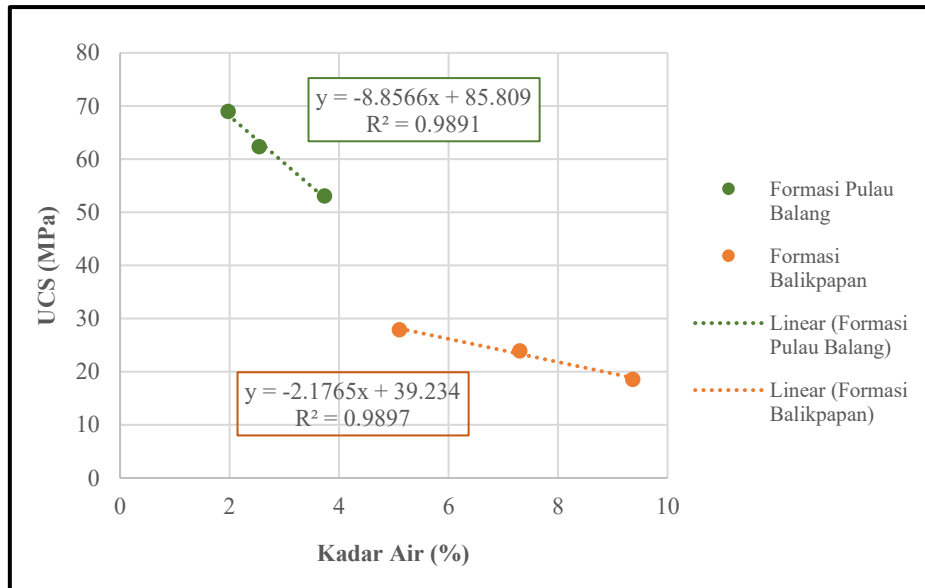
**Hubungan Pengaruh Sifat Fisik Terhadap Sifat Mekanik Batupasir**

Analisis hubungan antara sifat fisik dan mekanik batuan ini dilakukan untuk melihat seberapa besar pengaruh karakteristik fisik yakni kadar air dan porositas dalam mempengaruhi kekuatan mekanik yakni kuat tekan, tarik, dan geser batupasir pada Formasi Balikpapan dan Pulau Balang yang memiliki karakteristik batuan yang berbeda seperti yang terlihat pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 10.

**Grafik Korelasi Pengaruh Kadar Air dan Porositas Terhadap Nilai Kuat Tekan**



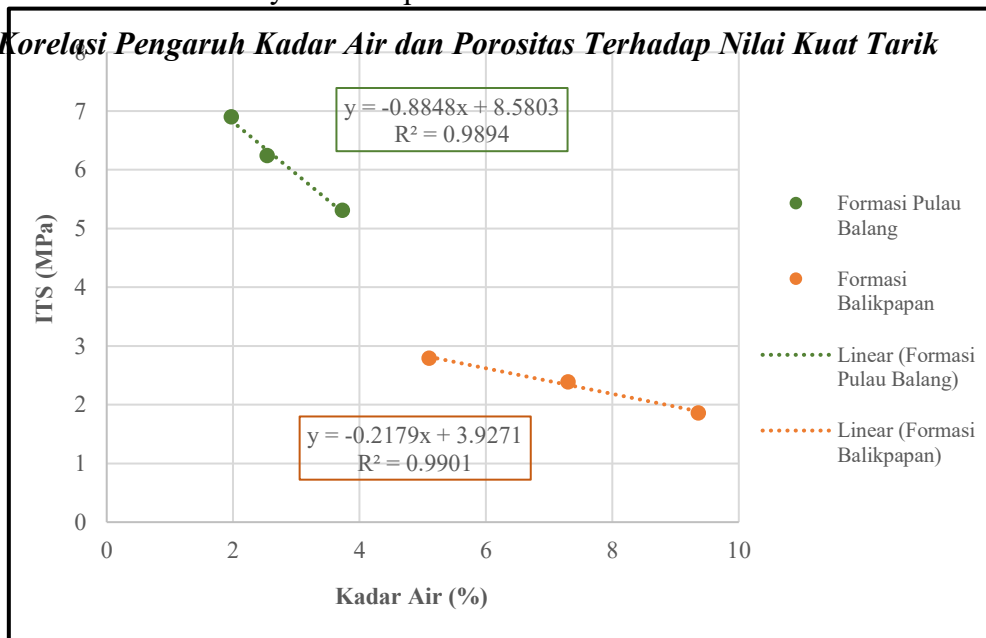
**Gambar 3.** Korelasi Kadar Air Terhadap Nilai UCS Kedua Formasi.



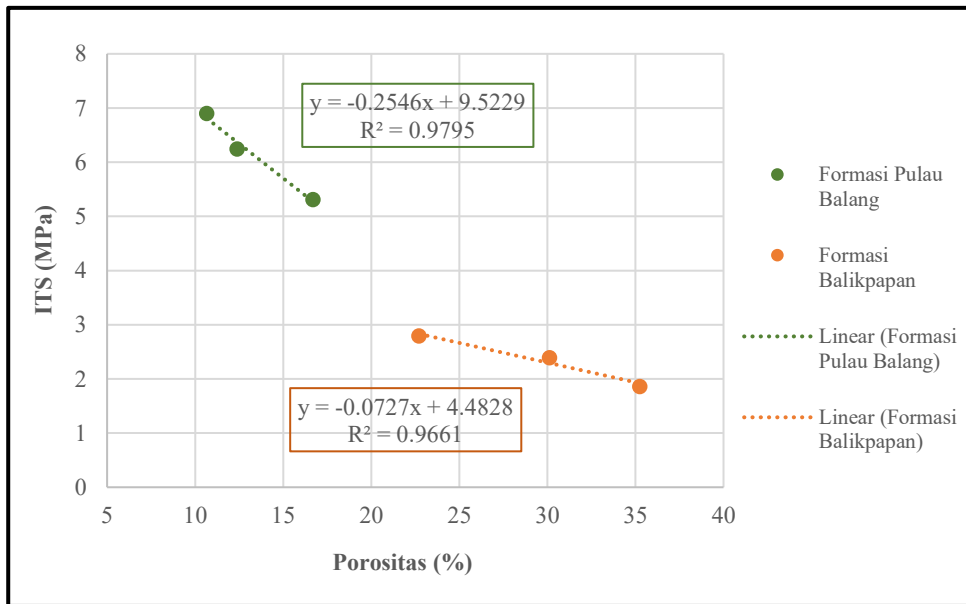
**Gambar 4.** Korelasi Porositas Terhadap Nilai UCS Kedua Formasi.

Berdasarkan kedua grafik, kadar air dan porositas berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai kuat tekan pada batupasir kedua formasi. Dibuktikan oleh tren linear yang negatif serta nilai korelasi dan nilai  $R^2$  pada setiap variabel dengan rentang 0,96 sampai 0,99 (mendekati angka 1), yang berarti semakin besar tingkat kadar air dan porositas maka semakin kecil nilai kuat tekan batuan yakni batupasir kedua formasi.

**Grafik Korelasi Pengaruh Kadar Air dan Porositas Terhadap Nilai Kuat Tarik**



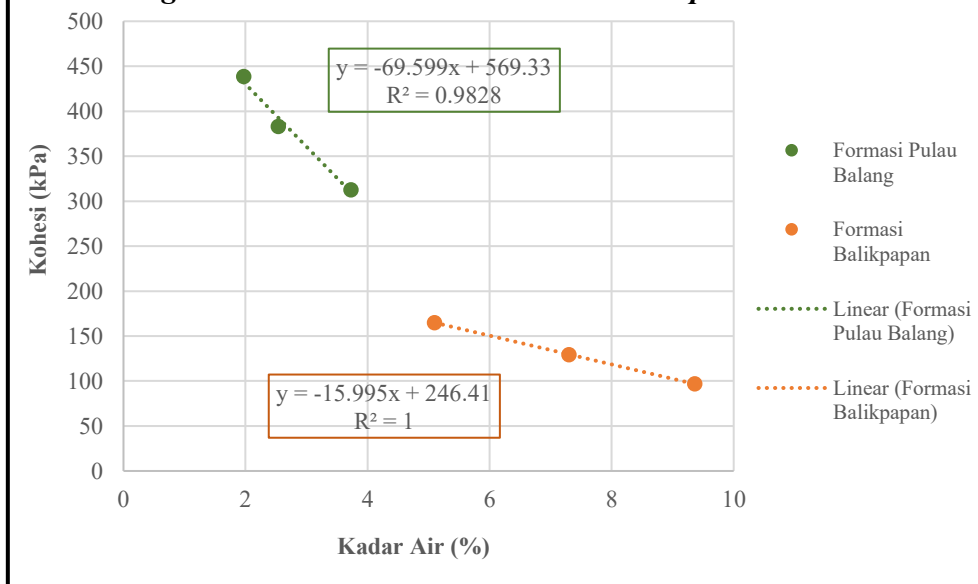
**Gambar 5.** Korelasi Kadar Air Terhadap Nilai ITS Kedua Formasi.



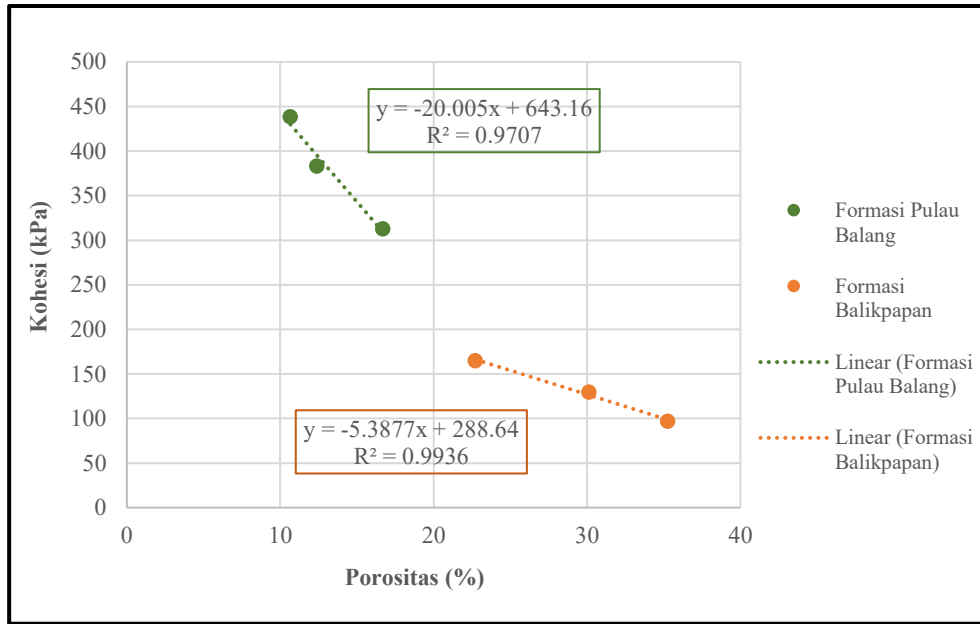
**Gambar 6.** Korelasi Porositas Terhadap Nilai ITS Kedua Formasi.

Berdasarkan kedua grafik, kadar air dan porositas berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai kuat tarik pada batupasir kedua formasi. Dibuktikan oleh tren linear negatif serta nilai korelasi dan nilai  $R^2$  pada setiap variabel dengan rentang 0,96 sampai 0,99 (mendekati angka 1), yang berarti semakin besar tingkat kadar air dan porositas maka semakin kecil nilai kuat tarik batuan yakni batupasir kedua formasi.

**Grafik Korelasi Pengaruh Kadar Air dan Porositas Terhadap Nilai Kuat Geser**

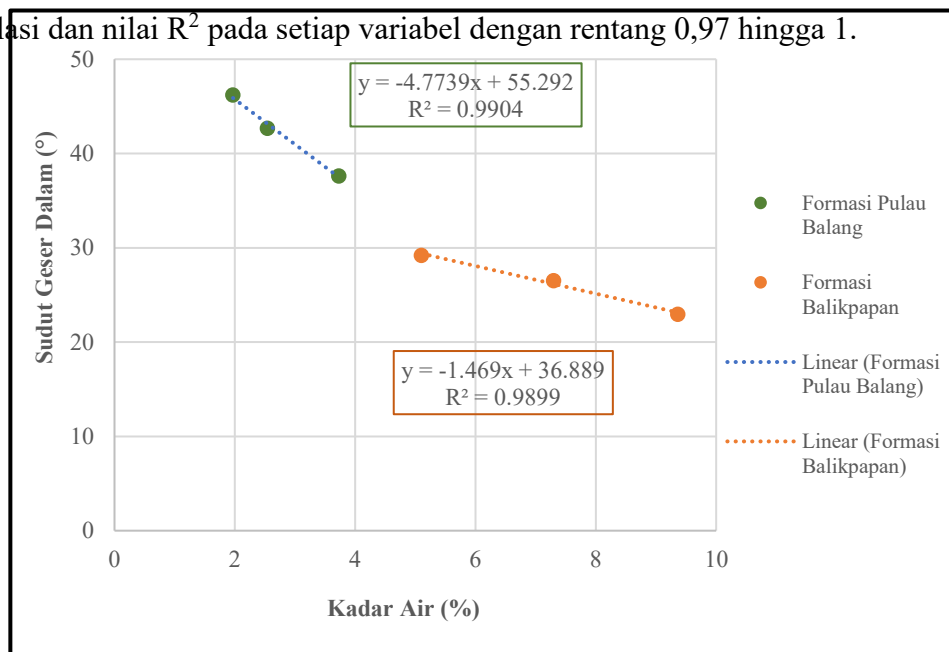


**Gambar 7.** Korelasi Kadar Air Terhadap Nilai Kohesi Kedua Formasi.

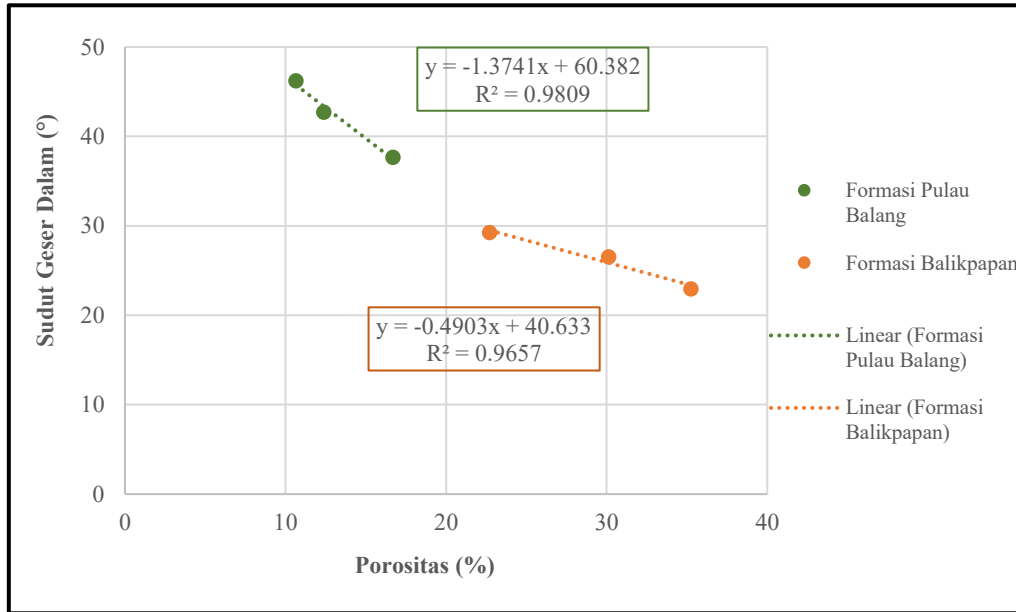


**Gambar 8.** Korelasi Porositas Terhadap Nilai Kohesi Kedua Formasi.

Berdasarkan kedua grafik, kadar air dan porositas berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai kohesi pada batupasir kedua formasi. Dibuktikan oleh tren linear negatif serta nilai korelasi dan nilai  $R^2$  pada setiap variabel dengan rentang 0,97 hingga 1.



**Gambar 9.** Korelasi Kadar Air Terhadap Sudut Geser Dalam Kedua Formasi.



**Gambar 10.** Korelasi Porositas Terhadap Sudut Geser Dalam Kedua Formasi

Berdasarkan kedua grafik, kadar air dan porositas berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai sudut geser dalam pada batupasir kedua formasi. Dibuktikan oleh tren linear negatif serta nilai korelasi dan nilai  $R^2$  pada setiap variabel dengan rentang 0,97 hingga (mendekati angka 1).

Sehingga secara keseluruhan, disimpulkan bahwa kadar air dan porositas berpengaruh sangat signifikan terhadap nilai kuat geser pada batupasir di kedua formasi yang dinyatakan dalam nilai kohesi dan sudut geser dalam. Dibuktikan dengan tren linear negatif serta nilai korelasi dan nilai  $R^2$  setiap variabel pada rentang 0,96 hingga 1, yang berarti semakin besar tingkat kadar air dan porositas maka semakin kecil nilai kuat geser batuan yakni batupasir kedua formasi.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, tingginya nilai  $R^2$  yang berkisar antara 0,96 hingga 1 oleh sifat fisik terhadap nilai kekuatan mekanik batupasir di kedua formasi membuktikan bahwa kadar air dan porositas memiliki pengaruh yang sangat signifikan serta berbanding terbalik dengan nilai kekuatan mekanik batuan khususnya batupasir. Kadar air dan porositas merupakan faktor pengendali utama yang menentukan besar kecilnya nilai kekuatan batuan, di mana semakin tinggi kadar air dan porositas maka nilai parameter kekuatan mekanik yakni kuat

tekan, kuat tarik dan kuat geser batupasir pada kedua formasi semakin menurun. Hal itu juga didukung oleh tren linear yang menunjukkan korelasi yang negatif pada setiap variabel pada batupasir kedua formasi di setiap lokasi penelitian wilayah Kabupaten Kutai Kartanegara.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan ikut berpartisipasi dalam penelitian ini baik secara langsung maupun tidak langsung terkhusus kepada dosen pembimbing, dosen penguji, orang tua, saudara, sahabat dan teman serta semua pihak yang tidak dapat penulis ucapkan satu persatu.

## DAFTAR REFERENSI

- Arif, I. (2016). *Geoteknik tambang*. Gramedia Pustaka Utama.
- Banunaek, D. J., Herman, H., Sikopa, M. C., & Thari, I. A. (2021). Analisis pengaruh kadar air dan derajat kejenuhan terhadap kuat tekan uniaksial pada batu gamping chalk, gamping dan batu pasir di Ramang-Ramang Maros. *Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMATAN)*, 3(1), 353–357.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Z. T. Bieniawski (Ed.), *Exploration for rock engineering: Proceedings of the Symposium* (Vol. 1, pp. 97–106). Balkema.
- Engkus, E. (2019). Pengaruh kualitas pelayanan terhadap kepuasan pasien di Puskesmas Cibitung Kabupaten Sukabumi. *Jurnal Governansi*, 5(2), 99–109. <https://doi.org/10.30997/jgs.v5i2.1956>
- Fadhilah, A., Suryandi, S., Ghony, M. A., & Putra, P. (2024). Penentuan nilai kuat tekan batulempung dan batupasir menggunakan metode unconfined compression strength pada titik bor SYNC X05. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, 2(2), 57–65. <https://doi.org/10.62278/jits.v2i2.43>
- Fitri, A., Rahim, R., Nurhayati, Pagiling, A. S. L., Natsir, I., Munfarikhatin, A., Simanjuntak, D. N., Hutagaol, K., & Anugrah, N. E. (2023). *Dasar-dasar statistika untuk penelitian*. Yayasan Kita Menulis.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). (1981). *Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods* (E. T. Brown, Ed.). Pergamon Press.
- Irfan, I., Trides, T., Winarno, A., Respati, L. L., & Devy, S. D. (2023). Studi perbandingan nilai kuat geser batu lempung berdasarkan kondisi jenuh, kondisi alami, dan kondisi kering Formasi Palau Balang menggunakan metode direct shear di Kalimantan Timur. *Jurnal Ilmiah Mandalika*, 4(5), 51–61. <https://doi.org/10.36312/vol4iss5pp51-61>
- Rai, M. A., Kramadibrata, S., & Wattimena, R. K. (2014). *Mekanika batuan*. Institut Teknologi Bandung.

- Sahir, S. H. (2021). *Metodologi penelitian*. KBM Indonesia.
- Schön, J. H. (2011). *Physical properties of rocks: A workbook* (Vol. 8). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1567-8032\(11\)08006-2](https://doi.org/10.1016/S1567-8032(11)08006-2)
- Sihombing, P. R. (2022). *Aplikasi STATA untuk statistisi pemula*. Gemala.
- Winonazada, R., Irwan, A. G., & Rezky, D. M. (2020). Analisis pengaruh kadar air dan derajat kejenuhan terhadap perbedaan nilai kuat tekan uniaksial pada batugamping, Pantai Ngrumput, Yogyakarta. *Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, 4.
- Zhang, Q., Liu, X., Wang, S., & Li, Y. (2023). Effects of porosity and water content on the mechanical properties and failure characteristics of sandstone. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(12), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11542-7>