

ARTIKEL RISET

Pengaruh Peningkatan Uniaxial Stress Terhadap Permeabilitas Pada Berbagai Variasi Sudut Foliasi Batuan Kristalin

Fikri Abdullah, Amanda Putri Widyanti, Bimo Rangga Alfaroby Mosyafwa^{*}, Ilham Adi Priambodo and Widya Utama

Received: June 26, 2021 | Accepted: Apr 18, 2022 | Published: July 28, 2022 | DOI: 10.22146/jfi.v26i1.67071

Ringkasan

Sumber daya *geothermal* mulai banyak dikembangkan dan memerlukan penelitian lebih dalam terkait aspek batuan. Batuan kristalin banyak terdapat pada area *geothermal*, foliasi yang terdapat pada batuan kristalin dapat ditinjau untuk mengetahui pengaruhnya terhadap parameter fisis dan mekanis pada tubuh batuan kristalin. Dalam penelitian ini perkembangan permeabilitas digunakan untuk mengetahui pengaruh peningkatan *stress* pada variasi sudut *stress* batuan beku. Sudut foliasi yang digunakan adalah 0, 30, 45, 60, 90 derajat, dan isotropik. Data yang digunakan merupakan hasil percobaan kuat tekan Acosta & Violay (2020), dengan variasi *stress* tetap dijaga di bawah 50 MPa untuk mengurangi dominasi retakan pada saat uji tekan. Analisis data menunjukkan terdapat pola perkembangan peningkatan permeabilitas pada sampel 0, 30, dan 60 derajat, dan penurunan permeabilitas pada sampel 45, 90, dan isotropik. Perkembangan permeabilitas diperiksa dengan hasil perekaman kecepatan gelombang primer (V_p), untuk mengetahui perkembangan densitas dari peningkatan kecepatan gelombang. Dari seluruh sampel menunjukkan pola peningkatan V_p seiring peningkatan tekanan. Nilai permeabilitas mengalami penurunan atau peningkatan sesuai dengan sudut foliasi batuan. Peninjauan berbagai parameter ini dapat digunakan untuk mengetahui ketergantungan perkembangan permeabilitas pada batuan kristalin seiring peningkatan *stress* pada batuan.

Kata Kunci: gelombang primer, permeabilitas, stress uniaksial, sudut foliasi

Abstract

Geothermal resources have begun to be developed and require more in-depth research related to rock aspects. Many crystalline rocks are found in geothermal areas, the foliation contained in crystalline rocks can be reviewed to determine its effect on physical and mechanical parameters in the crystalline rock body. In this study, the development of permeability is used to determine the effect of increased stress on variations in the stress angle of igneous rocks. The foliation angles used are 0, 30, 45, 60, 90 degrees, and isotropic. The data used are the results of the Acosta & Violay (2020) compressive strength experiment, with stress variations being kept below 50 MPa to reduce the dominance of cracks during the compression test. Data analysis showed that there was a developmental pattern of increased permeability in samples 0, 30, and 60 degrees, and a decrease in permeability in samples 45, 90, and isotropic. The development of permeability was checked by recording the primary wave velocity (V_p), to determine the density development of the increase in wave velocity. All samples showed a pattern of increasing V_p with increasing pressure. Permeability values decreased or increased according to the angle of rock foliation. Various parameters could be used to determine the dependence of the development of permeability in crystalline rocks with increasing stress on the rock.

Keywords: primary wave; permeability; uniaxial stress; foliation angle

^{*}Correspondence: bimorangga13@gmail.com

Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

[†]Equal contributor

1 PENDAHULUAN

Eksplorasi dan pengembangan sumber daya panas bumi (*geothermal*) merupakan topik utama dalam masa depan energi terbarukan dunia. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai aspek batuan terhadap prospek panas bumi perlu dilakukan. Salah satu prospek *geothermal* terletak di kawasan vulkanik. Batuan vulkanik memiliki peran dalam menyimpan cadangan *geothermal* di bumi. Sumber panas bumi Batu Panas Kering (*Hot Dry Rock*) dicirikan dengan batuan panas kristalin yang tidak berasosiasi dengan air dan tingkatan permeabilitas rendah bahkan pejal.

Penentuan nilai sifat fisis batuan yaitu permeabilitas, memiliki peran penting dan merupakan langkah awal dalam penelitian lapangan minyak untuk dilakukannya karakteristik dan deskripsi reservoir. Merujuk pada penelitian sebelumnya oleh Acosta & Violay, 2020 telah dilakukan uji kuat tekan terhadap 6 variasi sudut foliasi batuan kristalin dan didapatkannya nilai permeabilitas masing-masing variasi.

Analisa lanjutan dilakukan untuk mengetahui pengaruh peningkatan *uniaxial stress* terhadap permeabilitas pada berbagai sudut foliasi batuan kristalin.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Tegangan dan Regangan

Sebuah benda dapat berubah bentuk karena dipengaruhi gaya yang mana bisa berupa tegangan dan regangan. Tegangan merupakan tahanan material terhadap gaya atau beban yang mana diukur dalam bentuk gaya per satuan luas [1], sedangkan regangan didefinisikan sebagai perubahan ukuran atau bentuk material dari panjang awal sebagai hasil dari gaya yang menarik atau menekan. Tegangan dan regangan bisa dijelaskan secara rinci menggunakan sudut pandang 2D sebagai *basic* dan mudah dipelajari atau dikembangkan menjadi 3D. Hubungan antara tegangan dan regangan sesuai dengan prinsip dasar hukum Hooke untuk elastisitas, dalam limit elastik suatu benda. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan berbanding lurus dengan regangan yang mana dijelaskan pada rumus di bawah:

$$\text{Modulus} = \frac{\text{Tegangan}}{\text{Regangan}} \quad (1)$$

dengan k adalah koefisien elastisitas [2][3].

In-situ Stress

In-situ stress merupakan salah satu parameter penting untuk *modelling* dalam bidang *geoengineering* seperti

pada industri minyak dan gas. Pengukuran yang dilakukan untuk memetakan keadaan *stress* pada batuan bawah permukaan [4]. Terdapat tiga komponen *stress* yang diperhatikan pada bawah permukaan yaitu vertikal atau *overburden stress*, *maximum* dan *minimum horizontal stress*, biasanya *stress* ini diukur menggunakan *hydraulic fracturing test*. *Polygon stress* dibutuhkan untuk membatasi besar dari *in-situ stress* dengan memasukkan besar koefisien gesek dari patahan [4].

Permeabilitas

Setiap batuan memiliki kemampuan batuan dalam meloloskan fluida (permeabilitas) karena adanya retakan sehingga fluida bisa lolos. Permeabilitas termasuk ke dalam besaran skalar karena hanya memiliki nilai tanpa arah dan cenderung linear dengan porositas [5]. Permeabilitas pada suatu batuan tergantung pada : Porositas, ukuran pori, bentuk pori, morfologi permukaan pori bagian dalam, susunan pori dan batang pori (topologi dari jaringan pori), ukuran butir dan distribusinya serta kompaksi dan sementasi. Permeabilitas dibagi menjadi tiga yaitu permeabilitas absolut dengan kemampuan meloloskan fluida 100%, permeabilitas efektif dan permeabilitas relatif [6].

Gelombang P - Densitas

Gelombang kompresi (Gelombang P) merupakan gelombang badan yang berkecepatan tinggi melebihi gelombang S yang mana gelombang ini bersifat longitudinal yang merambat bolak - balik dengan arah rambatnya [7]. Sedangkan densitas merupakan perbandingan antara massa dan volume dan biasanya digunakan untuk parameter dalam persamaan kecepatan gelombang P dan S dan impedansi akustik di mana mempengaruhi respon gelombang seismik bawah permukaan. Efek densitas dirumuskan dalam persamaan Wyllie sebagai berikut [1]:

$$\text{sat} = ma(1 - Sw) + wSw + hc(1 - Sw) \quad (2)$$

Di mana sat = densitas batuan tersaturasi fluida, ma sebagai densitas matriks, adalah porositas batuan, Sw sebagai saturasi air, w adalah densitas air dan hc sebagai densitas hidrokarbon.

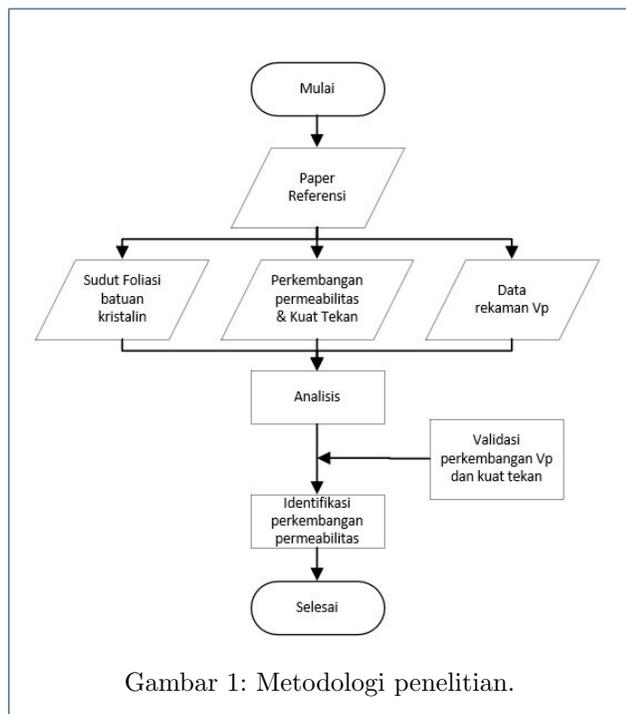
Stress 3D

Secara general, *stress* 3D merupakan pengembangan dari *stress* 2D yang mana pada *stress* 3D mendapat imbuhan elemen kartesius (z) sehingga elemen vektornya menjadi $\mathbf{n} = (nx, ny, nz)$. Pada 2D, menunjukkan bahwa nilai maksimum dan minimum *normal stress* dan *stress* utama bekerja pada sembarang. Hal tersebut sesuai dengan aturan

Mohr Circle karena dua *point* di mana lingkaran berpotongan, nilai $\tau = 0$ merupakan nilai signifikan dari σ . Sedangkan pada 3D, *stress* utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) juga menunjukkan nilai σ tetap yaitu nilai maksimum absolut, minimum absolut, dan titik acuan dalam ruang tiga dimensi dari vektor satuan \mathbf{n} [2].

3 METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan data hasil pengujian lab oleh Acosta & Violay, 2020. Data yang tersedia berupa nilai kuat tekan, sudut foliasi batuan, permeabilitas pada *stress* aksial dan radial, tekanan fluida, *stress* radial efektif, permeabilitas, emisi akustik, dan nilai kecepatan gelombang P yang direkam seiring percobaan. Data kemudian di analisis dengan sudut pandang yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Data yang digunakan adalah data nilai kuat tekan, permeabilitas, dan Vp. Dalam data tersebut, sampel yang digunakan memiliki sudut foliasi dalam derajat: 0, 30, 45, 60, 90, terhadap sumbu vertikal, dan 1 sampel dianggap isotropik.



Gambar 1: Metodologi penelitian.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data

Data disajikan dalam Tabel 1.

4.2 Analisis Data

Pada sampel 1-6 masing-masing akan diuji coba menggunakan axial dan radial stress 10,15 dan

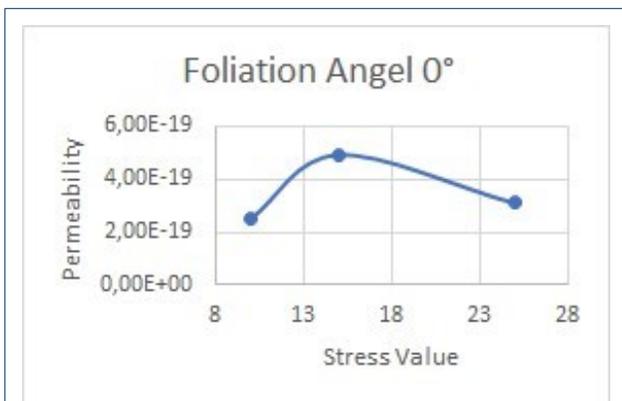
Tabel 1: Tabel Derajat Kristalinitas dari setiap sampel.

Sampel	Axial dan Radial Stress	Permeabilitas
1	10	2,49E-19
	15	4,94E-19
	25	3,12E-19
2	10	1,96E-19
	15	3,77E-19
	25	2,73E-19
3	10	1,08E-19
	15	1,02E-19
	20	1,51E-19
4	25	5,17E-20
	10	1,50E-19
	15	3,13E-19
5	20	1,71E-19
	25	2,14E-20
	10	5,77E-20
6	15	4,99E-20
	20	4,99E-20
	25	3,60E-20
	10	6,03E-20
	15	1,17E-20
	25	1,30E-20

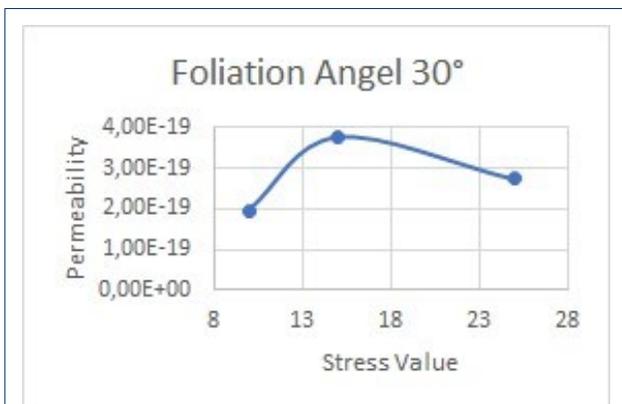
25 untuk mengetahui parameter permeabilitas, di mana pada sampel 1 dengan axial dan radial stress 10 permeabilitas menunjukkan angka 2.49E19, kemudian diuji lagi dengan axial & radial stress 15 permeabilitas menunjukkan angka 4.94E-19, lalu diuji kembali dengan axial dan radial stress 25 permeabilitas menunjukkan angka 3.12E19. Pada sampel 2 mula-mula diuji dengan axial & radial stress 10 di mana permeabilitas menunjukkan angka 1.96E19, Sampel 2 diuji kembali dengan axial & radial stress 15 di mana permeabilitas menunjukkan angka 3.77E-19, lalu pengujian ke-3 dengan axial dan radial stress 25 yang mana permeabilitas menunjukkan angka 2.73E-19. Pada sampel 3 seperti pada sampel sebelumnya diuji dengan axial dan radial stress 10 terlebih dahulu di mana permeabilitas menunjukkan angka 1.08E-19, kemudian pengujian ke-2 dengan axial dan radial stress 15 permeabilitas menunjukkan angka pada 1.02E-19, lalu diuji kembali dengan axial dan radial stress 25 permeabilitas menunjukkan angka 5.17E-20. Pada sampel 4 awalnya diuji coba dengan axial dan radial stress 10 di mana permeabilitas menunjukkan angka 1.5E-19, kemudian diuji lagi dengan axial dan radial stress 15 permeabilitas menunjukkan angka 1.5E-19, lalu pengujian ke-3 dengan axial dan radial stress 25 permeabilitas menunjukkan angka pada 2.14E-19. Pada sampel 5 mula-mula diuji dengan axial dan radial stress 10 di mana permeabilitas menunjukkan angka 5.77E-20, kemudian pengujian ke-2 dengan axial dan radial stress 15 di mana permeabilitas menunjukkan angka 4.99E20, lalu diuji kembali dengan axial dan radial stress 25 di mana permeabilitas menunjukkan angka

pada 3.6E-20. Pada sampel 6 diuji coba dengan axial dan radial stress 10 di mana permeabilitas menunjukkan angka pada 6.03E-20, dan kemudian diuji lagi dengan axial dan radial stress 15 di mana permeabilitas menunjukkan angka pada 1.17E-20, pada pengujian terakhir diuji dengan axial dan radial stress 25 di mana permeabilitas menunjukkan angka pada 1.3E-20. Sampel diuji dengan tetap di bawah tekanan 50 MPa, untuk menghindari kemunculan dan dominasi retakan yang tersebar pada sampel, menurut hasil penelitian Rawling *et al.*, 2015.

4.3 Grafik



Gambar 2: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 1.

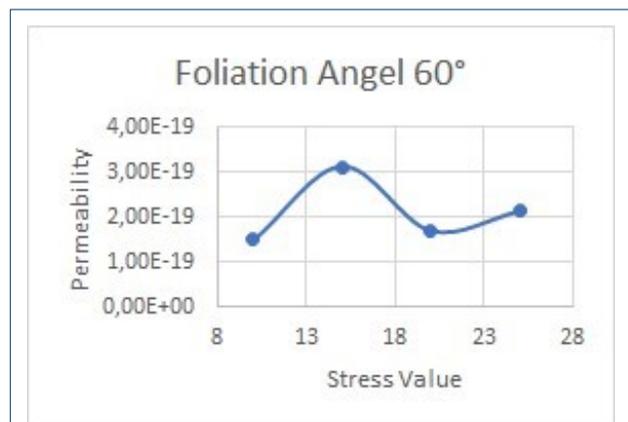


Gambar 3: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 2.

Data perubahan permeabilitas terhadap nilai kuat tekan diperlihatkan pada Gambar 2 - 7. Batuan yang diukur merupakan batuan beku kristalin, yang setiap sampel memiliki variasi sudut foliasi yang berbeda-beda. Terdapat pola yang sama di antara grafik-grafik tersebut. Pada sampel 1, sampel 2,



Gambar 4: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 3.

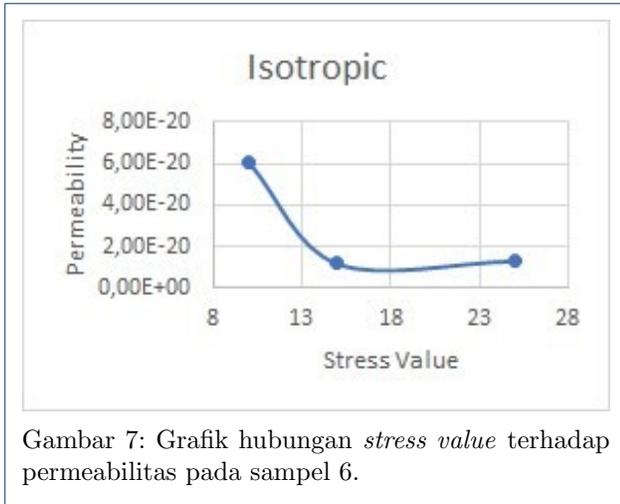


Gambar 5: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 4.



Gambar 6: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 5.

sampel dan sampel 4. Nilai permeabilitas mengalami kenaikan setelah tekanan naik 5 MPa, dari 10 MPa,



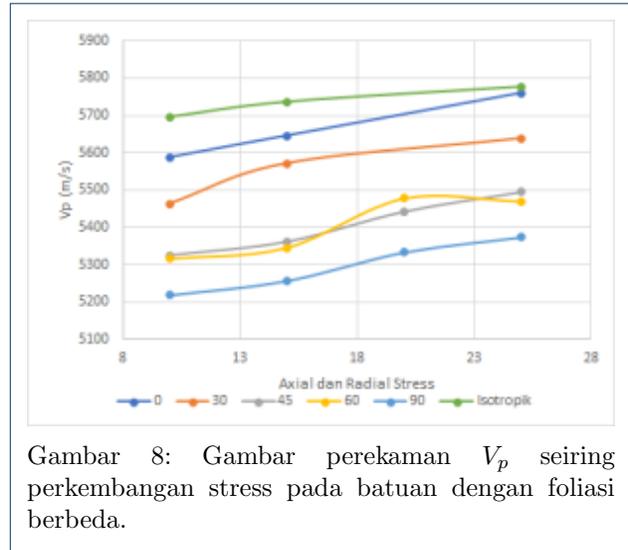
Gambar 7: Grafik hubungan *stress value* terhadap permeabilitas pada sampel 6.

ke 15 MPa. Kemudian mengalami penurunan ketika diberikan penekanan lebih lanjut, sampai pada 25 Mpa, nilai permeabilitas akan mengalami penurunan. Pada sampel 5 dan 6, nilai permeabilitas turun secara langsung ketika tekanan axial dan radial stress ditingkatkan. Dalam tinjauan grafik mohr-coloumb saat dihubungkan dengan tekanan pori, lingkaran mohr akan mengalami pergeseran terhadap kondisi mula mula sebelum terjadinya tekanan pori.

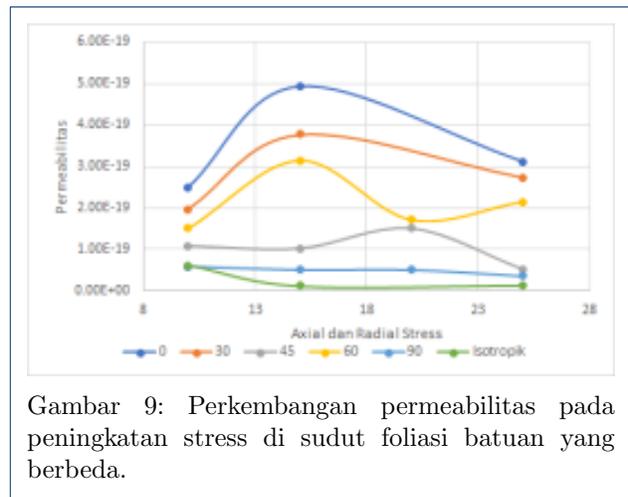
Dalam perkembangan dan eksplorasi *geothermal*, perlu diketahui dinamika transport hidrolis pada batuan yang dianggap isotropik. Perlu ditinjau lebih lanjut terkait perkembangan porositas dan permeabilitas seiring bertambahnya tekanan pada pori batuan. Kecepatan primer akan meningkat seiring menutupnya pori pada batuan. Nilai yang tertera pada grafik permeabilitas perlu dihubungkan dengan nilai kecepatan gelombang P pada batuan. Nilai kecepatan gelombang P batuan antar sampel tertera pada Gambar 8.

Grafik pada Gambar 8 memperlihatkan adanya nilai kecepatan gelombang P yang menurun seiring bertambahnya sudut Foliasi batuan. Sampel Foliasi 0 derajat hingga 90 derajat mengalami penurunan kecepatan gelombang P pada setiap stress yang diterapkan. Hal yang perlu diperhatikan yakni, adanya kenaikan kecepatan gelombang P pada setiap peningkatan axial dan radial stress, terhadap semua sampel. Hal itu menunjukkan adanya tekanan dari seluruh sisi sampel menyebabkan pemampatan pada pori batuan. Perlu dibandingkan nilai permeabilitas sampel terhadap kecepatan P wave pada setiap penerapan axial dan radial stress. Grafik nilai permeabilitas terhadap nilai P wave ditunjukkan pada Gambar 9.

Apabila nilai permeabilitas dibandingkan pada semua sampel, didapatkan nilai permeabilitas yang



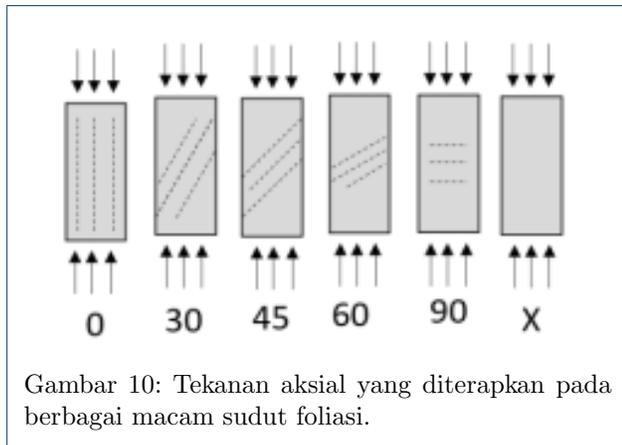
Gambar 8: Gambar perekaman V_p seiring perkembangan stress pada batuan dengan foliasi berbeda.



Gambar 9: Perkembangan permeabilitas pada peningkatan stress di sudut foliasi batuan yang berbeda.

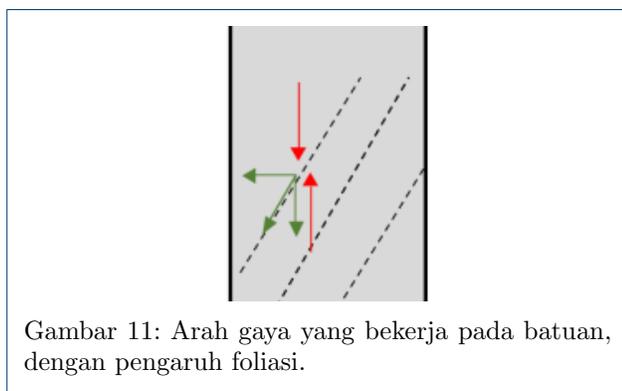
menurun seiring bertambahnya sudut Foliasi pada batuan. Pada sampel dengan sudut kurang dari 50 derajat, peningkatan nilai uniaxial stress akan menaikkan kemudian menurunkan nilai permeabilitas, dengan nilai akhir permeabilitas lebih tinggi dari kondisi mula-mula. Nilai permeabilitas sampel dengan Foliasi kurang dari 50 derajat kurang sesuai dengan kondisi perekaman V_p seiring peningkatan uniaxial stress. Sampel dengan Foliasi lebih dari 50 derajat dan isotropis memiliki pola perkembangan permeabilitas yang berbalik dengan perekaman V_p seiring peningkatan uniaxial stress. Hal tersebut menunjukkan pengaruh uniaxial stress pada perkembangan V_p dan permeabilitas. Dari data tersebut, nilai permeabilitas akan menurun dan V_p meningkat. Tekanan yang diaplikasikan pada sampel akan menekan mineral, sehingga menyebabkan pemampatan pada sampel dan meningkatkan nilai

densitas dan menjadikan nilai V_p semakin membesar. Ilustrasi pengaruh tekanan axial diberikan pada Gambar 10.



Gambar 10: Tekanan aksial yang diterapkan pada berbagai macam sudut foliasi.

Permeabilitas pada sampel batuan yang memiliki foliasi kurang dari 50 derajat dari Gambar 9 akan cenderung membesar, hal tersebut diakibatkan oleh persebaran gaya dari arah vertikal. Sudut foliasi yang cenderung mendekati 0 derajat akan memudahkan dilatasi horizontal. Hal tersebut berbeda dengan sudut 50 derajat ke atas, dimana gaya vertikal akan semakin memampatkan batuan di sisi foliasinya. Ilustrasi gaya yang bekerja pada foliasi diberikan pada Gambar 11. Adanya foliasi akan mempermudah orientasi retakan pada batuan kristalin.



Gambar 11: Arah gaya yang bekerja pada batuan, dengan pengaruh foliasi.

5 KESIMPULAN

Dari pengolahan dan analisis data, parameter mekanika berupa peningkatan besaran stress dapat digunakan untuk mengetahui perkembangan permeabilitas. Data menunjukkan nilai permeabilitas pada 3 sampel mengalami peningkatan dan 3lainnya mengalami penurunan permeabilitas. Perkembangan permeabilitas dapat divalidasi

dengan hasil perekaman gelombang primer berupa kecepatan gelombang. Peningkatan atau penurunan permeabilitas dipengaruhi oleh sudut foliasi batuan kristalin, yang dapat berperan sebagai pemicu awal arah permulaan retakan sebagai respon persebaran gaya pada saat uji tekan.

PENULIS

- 1 Fikri Abdullah
Dari :
(1) Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 2 Amanda Putri Widyanti
Dari :
(1) Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 3 Bimo Rangga Alfaroby Mosyafwa
Dari :
(1) Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 4 Ilham Adi Priambodo
Dari :
(1) Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 5 Widya Utama
Dari :
(1) Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Jurnal Fisika Indonesia, its website and the articles published are licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/). © Departemen of Physics Universitas Gadjah Mada.

Pustaka

1. Subhan M. Aplikasi inversi seismik dan atribut seismik untuk karakterisasi reservoir lapangan X. 2009. Available from: <https://lib.ui.ac.id/file?file=digital/20181554-S29176-Muhammad%20Subhan.pdf>.
2. Jaeger JC, Cook NGW, Zimmerman R. Fundamentals of rock mechanics. John Wiley & Sons; 2009.
3. Souisa M. Analisis modulus elastisitas dan angka poisson bahan dengan uji tarik. BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan. 2011 Dec;5(2):9-14. Available from: <https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/barekeng/article/view/188>.
4. Zhang Y, Zhang J. Lithology-dependent minimum horizontal stress and in-situ stress estimate. Tectonophysics. 2017;703-704:1-8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195117300926>.
5. Harrison JP, Hudson JA, Popescu ME. Engineering Rock Mechanics: Part 2. Illustrative Worked Examples. Applied Mechanics Reviews. 2002 04;55(2):B30-1. Available from: <https://doi.org/10.1115/1.1451166>.
6. Nurwidyanto NI M I, Widodo S. Estimasi Hubungan Porositas dan Permeabilitas pada Batupasir (Study Kasus Formasi Kerek, Ledok, Selorejo). Berkala Fisika. 2005 jul;8(3):87-90. Available from: [http://eprints.undip.ac.id/2137/1/Estimasi_Hubungan_Porositas_dan_Permeabilitas_pada_Batupasir_\(Study_Kasus_Formasi_Kerek%2C_Ledok%2C_Selorejo\).pdf](http://eprints.undip.ac.id/2137/1/Estimasi_Hubungan_Porositas_dan_Permeabilitas_pada_Batupasir_(Study_Kasus_Formasi_Kerek%2C_Ledok%2C_Selorejo).pdf).
7. Hudha SN, Harmoko U, Widada S, H YD, Yulianto G, Sahid S. Penentuan struktur bawah permukaan dengan menggunakan metode seismik refraksi di lapangan panas bumi diw dan derekan, kecamatan bergas, kabupaten semarang. Youngster Physics Journal. 2014;3(3).