

ANALISIS PENGARUH SUBSTITUSI CO₂ DAN BRINE PADA KECEPATAN SEISMİK MENGGUNAKAN PERSAMAAN GASSMANN BERBASIS MATLAB

Khusnul Nur Rochmah*, Sekar Fajar Lestari, Aussie Anindya Nari Pinandhita, Ferdian Yoga Aditama, Nadhil Abyan Hilmy, Widya Utama

Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

*Corresponding author. Email: khusnulnr@gmail.com

Manuscript received: 31 December 2020; Received in revised form: 15 March 2021; Accepted: 18 March 2021

Abstrak

Persamaan Gassmann adalah hubungan pendekatan yang digunakan untuk menghitung perubahan kecepatan seismik karena perbedaan saturasi fluida di reservoir. Persamaan Gassmann digunakan dalam menghubungkan modulus *bulk* dengan sifat pori serta fluida dalam batuan. Artikel ini bertujuan untuk membahas aplikasi pendekatan Persamaan Gassmann untuk menganalisis perubahan kecepatan seismik akibat pengaruh substitusi fluida (CO₂ dan *brine*) menggunakan *well data* dari wilayah Lapangan Tapti yang terletak di utara-barat laut (NNW) Mumbai dengan variabel perubahan saturasi CO₂ dan *brine* dari 0% sampai 100%. Beberapa diskusi dibutuhkan mengenai asumsi yang terjadi selama substitusi fluida, yakni modulus geser tetap konstan selama proses substitusi fluida, dan jenis fluida yang disubstitusi memengaruhi nilai modulus *bulk* (*K_{sat}*). Analisis dilakukan menggunakan program MATLAB kemudian dilakukan visualisasi grafik menggunakan *Microsoft Excel*. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan gelombang P (*V_p*) terhadap saturasi CO₂ berkurang dari 0% sampai 30% kemudian bertambah sampai tersaturasi 100%, sementara terhadap saturasi *brine* berkurang dari 0% sampai 50% kemudian bertambah sampai tersaturasi 100%. Penurunan kecepatan gelombang P (*V_p*) dikarenakan penambahan saturasi fluida akan menyebabkan modulus *bulk* (*K_{sat}*) berkurang. Kecepatan gelombang S (*V_s*) bertambah seiring substitusi CO₂ dan *brine*. Penambahan kecepatan *V_s* karena saturasi CO₂ lebih signifikan daripada saturasi *brine*. Penambahan kecepatan gelombang S (*V_s*) dikarenakan nilai *bulk density* berkurang seiring penambahan saturasi fluida, dan nilai modulus gesernya tetap konstan. Nilai densitas berkurang seiring substitusi CO₂ dan *brine*. Pengurangan nilai densitas karena saturasi CO₂ lebih signifikan daripada saturasi *brine*. Nilai densitas berkurang dikarenakan volume terisi oleh fluida.

Kata Kunci: kecepatan seismik; Persamaan Gassmann; saturasi fluida.

Abstract

The Gassmann equation is a relational approach used to calculate changes in seismic velocity due to differences in fluid saturation in the reservoir. The Gassmann equation is used in a modulus connected by Bulk to the properties of pores and fluids in rocks. This paper aims to discuss Gassmann equation application to analyze seismic velocity using well data from Tapti field area located in north-northwest (NNW) Mumbai with variable changes in CO₂ and brine saturation from 0% to 100%. It takes some discussion of the assumptions that occur during fluid substitution that shear modulus remains constant during the fluid substitution process, and the type of fluid that substituted affects the bulk modulus (*K_{sat}*) value. The analysis used the MATLAB program, and graph visualization used Microsoft Excel. The results showed that the velocity of P (*V_p*) waves against CO₂ saturation decreased from 0% to 30% then increased to 100% saturated, while brine saturation decreased from 0% to 50% then increased to

100% saturated. The decreased P (V_p) wave velocity due to the fluid saturation will cause bulk modulus (K_{sat}) to decrease. S (V_s) wavelength increases with CO₂ and brine substitution, where the increase in V_s velocity due to CO₂ saturation is more significant than brine saturation. The decrease in S wave velocity (V_s) due to bulk density value decreases with the fluid saturation, and the shear modulus value remains constant. Density values decrease with CO₂ and brine substitution, where the reduction in density value due to CO₂ saturation is more significant than brine saturation. The density value decreases because of the volume filled with fluid.

Keywords: fluid saturation; Gassmann's equation; seismic velocity.

Pendahuluan

Seismik refleksi merupakan salah satu metode yang digunakan dalam geofisika. Salah satu penerapan metode seismik refleksi yaitu dalam mengetahui penjalaran gelombang bawah permukaan (Hambali, 2019). Gelombang yang menjalar pada bawah permukaan bumi dalam batuan menggunakan nilai kecepatan yang bergantung terhadap parameter fisis setiap batuan. Gelombang yang melewati suatu fluida akan menunjukkan perilaku yang berbeda. Pada analisis seismik, substitusi fluida digunakan untuk mengetahui kecepatan gelombang seismik batuan bergantung pada saturasi fluidanya (Linzi dan Syaifuddin, 2016). Selain itu, substitusi fluida juga digunakan untuk memodelkan karakteristik seismik berupa kecepatan seismik dan densitas dari reservoir pada suatu kondisi seperti, tekanan, suhu, porositas, jenis mineral, salinitas air dan saturasi fluida pori (Singh et al., 2017). Kecepatan seismik dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti porositas, densitas, tekanan, suhu, dan salinitas (Adler dan Handoko, 2007). Kecepatan seismik dalam suatu reservoir dipengaruhi langsung oleh jumlah fluida yang tersaturasi di dalam batuan. Pada kondisi tersaturasi, gelombang P akan mengalami peningkatan, gelombang S mengalami penambahan seiring saturasi fluida. Kecepatan gelombang tersebut merupakan indikator dalam efek saturasi fluida (Singh et al., 2017). Gelombang seismik tersebut dapat menyebabkan perubahan bentuk dalam batuan serta peningkatan tekanan dalam fluida pori. Peningkatan tekanan tersebut akan membuat batuan menjadi kaku dan

menyebabkan peningkatan modulus bulk (Han and Batzle, 2004). Pada hal ini, Persamaan Gassmann digunakan dalam menghubungkan modulus bulk dengan sifat pori serta fluida dalam batuan. Nolen-Hoeksema (2000) memperkenalkan koefisien fluida yang efektif untuk membedakan modulus bulk dari pori-pori yang berisi fluida. Namun hasilnya tidak dapat dijelaskan karena koefisien fluida tidak hanya dipengaruhi oleh modulus bulk, tapi terdapat parameter batuan lainnya.

Persamaan Gassmann adalah hubungan pendekatan yang digunakan untuk menghitung perubahan kecepatan seismik karena perbedaan saturasi fluida di reservoir. Pada aplikasi persamaan Gassmann dibutuhkan modulus bulk (*dry* dan saturasi) (Han and Batzle, 2004). Perhitungan modulus bulk (K_{sat}) memerlukan empat komponen yaitu porositas, K_{mat} (*bulk modulus* matriks mineral), K^* (*bulk modulus* kerangka batuan), K_f (*bulk modulus* fluida pengisi pori) dan θ (porositas). Berdasarkan Teori Gassman, modulus bulk dari batuan jenuh dituliskan sebagai berikut:

$$K_{sat} = K^* + \frac{(1 - \frac{K^*}{K_{mat}})^2}{\frac{K^*}{K_{mat}} + \frac{(1 - \theta) - 1 - \frac{K^*}{K_{mat}}}{K_{mat}}} \quad (1)$$

Pada hal ini, kondisi batuan memengaruhi kecepatan seismik. Saturasi fluida berpengaruh terhadap kecepatan gelombang P dan S, hal ini dikarenakan hubungan nonlinier V_p dan V_s dengan pembebanan hidrostatik (King, 1966). Bentuk sederhana dari persamaan kecepatan gelombang P dan S diturunkan untuk batuan *non-porous* dan isotropis

(Afianto dkk., 2016). Persamaan kecepatan seismik menggunakan densitas (ρ), modulus geser (μ), dan modulus bulk (K) yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

Pada penelitian ini, Persamaan Gassmann diterapkan untuk mengevaluasi perubahan kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), densitas dan perbandingan V_p/V_s .

Metodologi Penelitian

Tabel 1. *Sample data* dengan parameter-parameter fisis (Singh et al., 2017).

Depth:	<i>Avg</i>	2.1
1830.0 – 1933.0	<i>V_s (ft/s)</i>	12821.8
	<i>V_p (ft/s)</i>	26028.4
	<i>Avg V_p/V_s</i>	2.1
	<i>Avg</i>	0.3
	<i>Avg V_{sh}</i>	0.6
	<i>Avg T</i>	183.2

Penelitian ini menggunakan sampel data berupa *well data* dari wilayah Lapangan Tapti yang terletak di utara-barat laut (NNW) Mumbai yang diperoleh dari artikel yang ditulis oleh Singh et al. (2017) dengan data sampel dan parameter fisis seperti pada Tabel 1. Data sampel berupa *layer* pada kedalaman antara 1830 m sampai 1833 m (Singh et al., 2017). Data sampel berisi informasi mengenai kedalaman, densitas, V_s , V_p , porositas, volume batu serpih, temperatur, tekanan dan salinitas. Metode penelitian adalah studi literatur dan pengolahan data menggunakan program *script* MATLAB. Data sampel diinjeksikan fluida berupa gas CO₂ dan *brine* dari 0%

sampai 100%. Kemudian data hasil MATLAB dilakukan visualisasi berupa grafik menggunakan *Microsoft Excel*.

Prosedur Penelitian

1. Tahap pengumpulan data

Pada tahap awal penelitian yang dilakukan yaitu studi literatur. Melalui studi literatur, peneliti mengumpulkan literatur-literatur yang mendukung penelitian. Studi literatur yang peneliti gunakan berupa buku serta beberapa jurnal ilmiah.

2. Tahap pengolahan data

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Microsoft Excel* dan *script* MATLAB. Data-data yang diperoleh berupa data V_p , V_s , *Avg V_p/V_s*, *Avg V_{sh}*, serta *Avg T*. Setelah pengolahan data dilakukan kemudian didapatkan hasil berupa perubahan V_p , perubahan V_s , perubahan resistivitas, serta perubahan V_p/V_s . Perubahan V_s merupakan perubahan yang terjadi pada gelombang S, yang didapatkan dari

$$\Delta V_s = \left(\frac{V_{sn} - V_{sn-1}}{V_{sn-1}} \right) + \Delta V_{sn-1} \quad (4)$$

Perubahan V_p merupakan perubahan yang terjadi pada gelombang P, yang didapatkan dari:

$$\Delta V_p = \left(\frac{V_{pn} - V_{pn-1}}{V_{pn-1}} \right) + \Delta V_{pn-1} \quad (5)$$

Perubahan resistivitas (ρ) merupakan perubahan resistivitas pada sampel setelah diberikan fluida. Perubahan resistivitas didapatkan dari persamaan:

$$\Delta \rho = \left(\frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_{n-1}} \right) + \Delta \rho_{n-1} \quad (6)$$

Perubahan V_p/V_s atau rasio *poisson* merupakan ukuran kompresibilitas material atau perbandingan gelombang P dengan gelombang S, didapatkan dari:

$$\Delta \frac{V_p}{V_s} = \left(\frac{\frac{V_p}{V_s} - \frac{V_p}{V_s}}{\frac{V_p}{V_s}} \right) + \Delta \frac{V_p}{V_s} \quad (7)$$

Sedangkan V_p/V_s (%) merupakan rasio *poisson* yang didapatkan dari:

$$\frac{V_p}{V_s} = \Delta \frac{V_p}{V_s} \times 100 \quad (8)$$

3. Tahap analisa data

Analisa data dilakukan menggunakan hasil visualisasi grafik, terdapat tiga grafik yakni grafik kecepatan gelombang P atau Vp, kecepatan gelombang S atau Vs, serta nilai densitas terhadap saturasi CO₂ dan *brine*. Analisa pada penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif.

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Densitas awal CO₂ yang diinjeksikan sebesar 1,5189 g/L, substitusi CO₂ dari 0% sampai 100% menghasilkan nilai kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), serta nilai densitas yang baru akibat penambahan substitusi CO₂ seperti yang tampak pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Parameter Fisis dengan Saturasi CO₂ pada layer 1.

CO ₂	Vp	ΔVp	Vp (%)	Vs	ΔVs	Vs (%)	rho	Δrho	ρ(%)	Vp/Vs	ΔVp/Vs	Vp/Vs (%)
0%	30461	0	0	12819	0	0	2,104	0	0	2,376	0	0
10%	26642	-0,125	-12,537	12873	0,004	0,421	2,086	-0,008	-0,841	2,070	-0,129	-12,904
20%	26430	-0,133	-13,333	12928	0,008	0,849	2,068	-0,017	-1,690	2,044	-0,141	-14,122
30%	26422	-0,134	-13,363	12984	0,013	1,282	2,051	-0,025	-2,546	2,035	-0,146	-14,584
40%	26473	-0,132	-13,170	13040	0,017	1,713	2,033	-0,034	-3,409	2,030	-0,148	-14,821
50%	26550	-0,129	-12,880	13097	0,022	2,150	2,015	-0,043	-4,275	2,027	-0,150	-14,966
60%	26641	-0,125	-12,537	13155	0,026	2,593	1,998	-0,052	-5,153	2,025	-0,151	-15,066
70%	26740	-0,122	-12,165	13214	0,030	3,041	1,980	-0,060	-6,039	2,024	-0,151	-15,143
80%	26845	-0,118	-11,772	13273	0,035	3,488	1,962	-0,069	-6,933	2,023	-0,152	-15,196
90%	26956	-0,114	-11,359	13333	0,039	3,940	1,945	-0,078	-7,830	2,022	-0,152	-15,235
100%	27070	-0,109	-10,936	13394	0,044	4,397	1,927	-0,087	-8,740	2,021	-0,153	-15,269

Densitas awal *brine* yang disubstitusikan sebesar 1,07 g/L, substitusi *brine* dari 0% sampai 100%. menghasilkan nilai kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan

gelombang S (Vs), serta nilai densitas yang baru akibat penambahan substitusi *brine* seperti yang tampak pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Parameter Fisis dengan Saturasi *brine* pada layer 1.

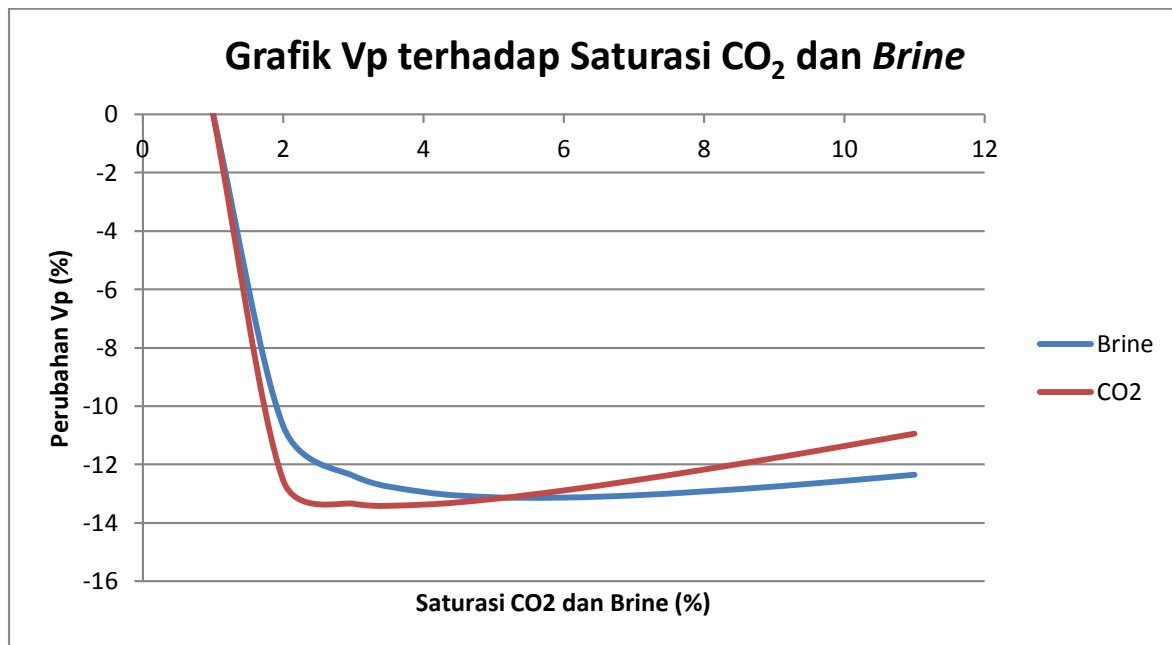
brine	Vp	ΔVp	Vp (%)	Vs	ΔVs	Vs (%)	rho	Δrho	ρ(%)	Vp/Vs	ΔVp/Vs	Vp/Vs(%)
0%	30398	0	0	12819	0	0	2,1037	0	0	2,371	0	0
10%	27150	-0,107	-10,685	12853	0,003	0,265	2,0942	-0,005	-0,452	2,112	-0,109	-10,921
20%	26687	-0,124	-12,390	12888	0,005	0,538	2,0812	-0,011	-1,072	2,071	-0,020	-1,972
30%	26539	-0,129	-12,945	12923	0,008	0,809	2,07	-0,016	-1,611	2,054	-0,008	-0,824
40%	26491	-0,131	-13,126	12958	0,011	1,080	2,0588	-0,022	-2,152	2,044	-0,005	-0,450
50%	26488	-0,131	-13,137	12993	0,014	1,350	2,0476	-0,027	-2,696	2,039	-0,003	-0,281
60%	26508	-0,131	-13,062	13029	0,016	1,627	2,0363	-0,032	-3,247	2,035	-0,002	-0,201
70%	26544	-0,129	-12,926	13065	0,019	1,903	2,0251	-0,038	-3,797	2,032	-0,001	-0,140

80%	26588	-0,128	-12,760	13102	0,022	2,187	2,0139	-0,044	-4,351	2,029	-0,001	-0,117
90%	26640	-0,126	-12,564	13138	0,025	2,461	2,0027	-0,049	-4,907	2,028	-0,001	-0,079
100%	26696	-0,124	-12,354	13175	0,027	2,743	1,9915	-0,055	-5,466	2,026	-0,001	-0,071

Pembahasan

Gambar 1 menunjukkan korelasi antara penambahan saturasi terhadap kecepatan gelombang P (V_p). Hasil menunjukkan bahwa kecepatan gelombang P (V_p) terhadap saturasi CO_2 berkurang dari 0% sampai 30% kemudian bertambah sampai tersaturasi 100%, sementara terhadap saturasi Brine berkurang dari 0% sampai 50% kemudian bertambah sampai

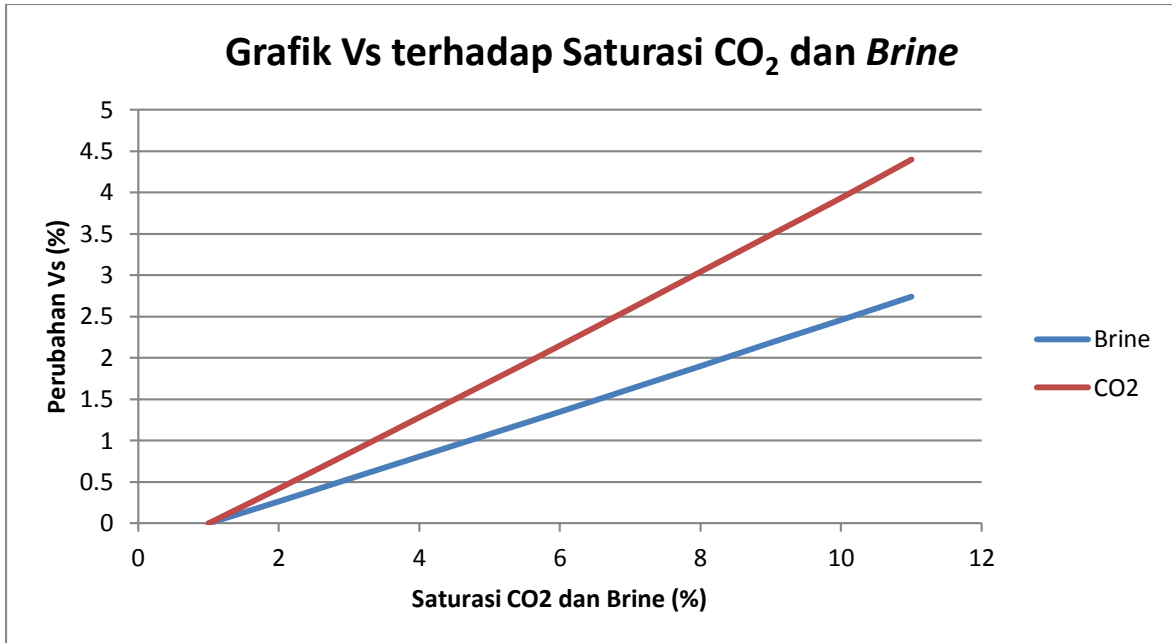
tersaturasi 100%. Penurunan kecepatan gelombang P (V_p) dikarenakan penambahan saturasi fluida akan menyebabkan modulus *bulk* (K_{sat}) berkurang tetapi pada saat yang sama densitas curah (ρ_{sat}) berkurang. Karena hubungan terbalik, maka kecepatan gelombang P akan meningkat. Perbedaan jenis fluida juga akan mempengaruhi modulus *bulk* batuan (K_{sat}).



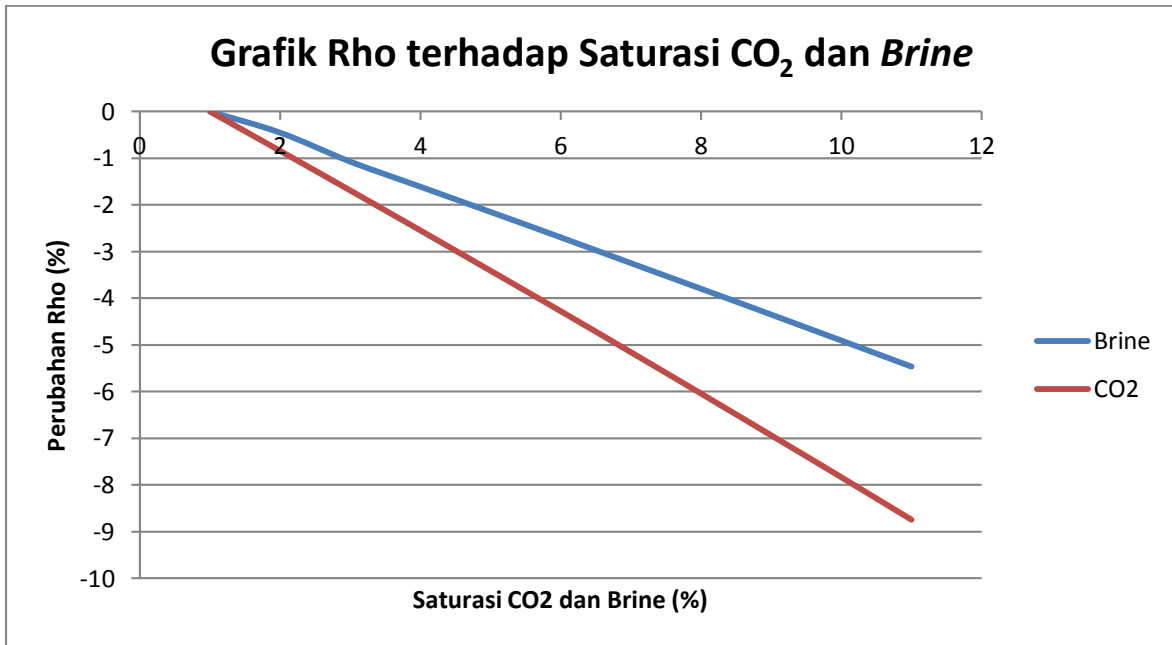
Gambar 1. Grafik V_p terhadap Saturasi CO_2 dan *brine*.

Gambar 2 menunjukkan korelasi antara penambahan saturasi terhadap kecepatan gelombang S (V_s). Perubahan kecepatan gelombang S (V_s) tidak terlalu signifikan, penambahan kecepatan V_s karena saturasi CO_2 lebih signifikan daripada saturasi *brine*. Bertambahnya kecepatan gelombang S (V_s) dikarenakan nilai *bulk density* berkurang seiring penambahan saturasi fluida, dan nilai modulus gesernya tetap konstan sama dengan nilai modulus kerangka atau *dry*.

Gambar 3 menunjukkan korelasi antara penambahan saturasi terhadap nilai densitas (ρ). Nilai densitas berkurang seiring substitusi CO_2 dan *brine*, pengurangan nilai densitas karena saturasi CO_2 lebih signifikan daripada saturasi *brine*. Nilai densitas berkurang seiring dengan jumlah saturasi fluida dikarenakan volume terisi oleh fluida.



Gambar 2. Grafik Vs terhadap Saturasi CO₂ dan *brine*.



Gambar 3. Grafik Rho terhadap Saturasi CO₂ dan *brine*.

Kesimpulan

Saturasi fluida berpengaruh signifikan terhadap V_p , V_s , dan densitas (ρ). Hal tersebut bergantung pada jenis fluida dan kadar fluida. Kecepatan gelombang P (V_p) mengalami penurunan pada saturasi CO₂ 0% sampai 30%, mengalami penurunan pada saturasi *brine* 0% sampai 50%, kemudian mengalami kenaikan sampai tersaturasi 100%. Kecepatan gelombang S (V_s) bertambah seiring substitusi CO₂ dan

brine, penambahan kecepatan V_s karena saturasi CO₂ lebih signifikan daripada saturasi *brine*. Nilai densitas (ρ) berkurang seiring substitusi CO₂ dan *brine*, pengurangan nilai densitas karena saturasi CO₂ lebih signifikan daripada saturasi *brine*.

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur tim penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan artikel ilmiah ini. Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan artikel ilmiah ini banyak pihak yang turut membantu. Pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dosen Mata Kuliah Fisika Batuan karena telah memberikan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan artikel.
2. Orang tua mahasiswa yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan kepada penulis dalam menjalankan perkuliahan.
3. Teman-teman anggota kelompok 2 Fisika Batuan A yang selalu semangat mengerjakan artikel ini.

Daftar Pustaka

- Adler, J. dan Handoko, B.E.N. 2007. *Pengukuran Parameter Seismik dan Difraksi Sinar-X (XRD) pada Batuan Karbonat Formasi Parigi*. ITB J. Sci. 39:146–165.
<https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2007.39.1-2.8>
- Afianto, M.A., Lestari, W., Syaifuddin, F.S. dan Marianto, F.D. 2016. *Karakterisasi Reservoir pada Litologi Karbonat Menggunakan Analisa Inversi Simultan Di Lapangan "MAF"*. J. Geosaintek. 2(3):213-222.
<https://doi.org/10.12962/j25023659.v2i3.2111>
- Hambali, M.D. 2019. *Respon AVO dan Pemodelan Substitusi Fluida dengan Menggunakan Teori Gassmann dan Differential Effective Medium pada Batuan Karbonat*. J. Appl. Sci. 1(2):010–017.
<https://doi.org/10.36870/japps.v1i2.47>
- Han, D. and Batzle, M.L. 2004. *Gassmann's equation and fluid-*

saturation effects on seismic velocities. Geophysics. 69(2):398–405.

<https://doi.org/10.1190/1.1439763>

- King, M.S. 1966. *Wave Velocities in Rocks as a Function of Changes in Overburden Pressure and Pore Fluid Saturants*. Geophysics. 31(1):50
<https://doi.org/10.1190/1.1439763>

- Linzai, N., Syaifuddin, F. dan Widodo, A. 2016. *Analisis Pemodelan Substitusi Fluida pada Sumur*. J. Tek. ITS. 5(2):B344-B47.
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18065>

- Nolen-Hoeksema, R.C. 2000. *Modulus-porosity relation, Gassmann's equations, and the low frequency elastic-wave response to fluids*. Geophysics. 65(5):1355–1363.
<https://doi.org/10.1190/1.1444826>

- Singh, N.P., Singh, R.K., Sarkar, P. and Maurya, S.P. 2017. *Estimating Petrophysical Parameters due to Fluid Substitution in Sandstone Reservoir using Gassmann Equation*. In: Challenges in petro-physical evaluation and rock physics modelling of carbonate reservoirs, likely elucidations & way forward, 3th November – 1st December, India, Bombay.