

IDENTIFIKASI KEBERADAAN GAS PADA RESERVOIR BATUAN PASIR BERDASARKAN ANOMALI FREKUENSI RENDAH DAN ATRIBUT ATENUASI GELOMBANG SEISMIK

Mokhammad Puput Erlangga¹, Asido Saputra Sigalingging¹, Purwaditya Nugraha¹

¹Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri-Institut Teknologi Sumatera
e-mail : mokhammad.erlangga@tg.itera.ac.id

Abstrak. Parameter elastik, seperti impedansi akustik, impedansi geser, kecepatan gelombang P dan S, Poisson's ratio yang diturunkan dari inversi simultan data seismik tidak melibatkan pengaruh frekuensi terhadap besaran tersebut. Padahal, frekuensi merupakan parameter fisika yang sangat sensitif terhadap kehadiran fluida gas di dalam pori batuan. Pengaruh frekuensi terhadap penjalaran gelombang seismik pada medium berpori yang tersaturasi gas ditunjukkan dengan adanya fenomena dispersi dan atenuasi pada gelombang seismik. Pada fenomena dispersi, nilai kecepatan rambat gelombang seismik akan berubah terhadap frekuensi. Sedangkan pada fenomena atenuasi, komponen amplitudo pada frekuensi tinggi dari gelombang seismik akan mengalami pelemahan ketika gelombang seismik tersebut merambat melalui medium berpori yang tersaturasi oleh gas. Berdasarkan penjelasan di tersebut, maka pada studi ini kita akan menggunakan anomali frekuensi rendah dan atribut atenuasi untuk menentukan keberadaan gas. Langkah pertama adalah kita akan melakukan dekomposisi spektral data seismik post-stack 2D menggunakan metode transformasi Stockwell. Hasil dekomposisi spektral tersebut kita gunakan untuk melihat langsung anomali frekuensi rendah dan analisa parameter atribut atenuasi. Parameter atribut atenuasi berupa intersep dan gradien dari spektrum amplitudo hasil dekomposisi spektral. Atribut atenuasi yang digunakan pada studi ini disebut sebagai Amplitude Variation with Frequency (AVF), yang merupakan hasil perkalian antara intersep dan gradien dari spektrum amplitudo.

Kata Kunci: atenuasi; dekomposisi spektral; dispersi; frekuensi; kecepatan; saturasi

Abstract. Elastic parameters, such as acoustic impedance, shear impedance, P and S wave velocity, Poisson's ratio derived from simultaneous inversion of seismic data do not involve the influence of frequency on these quantities. In fact, frequency is a physical parameter that is very sensitive to the presence of gas fluid in the rock pore. The influence of frequency on seismic wave propagation in a gas-saturated porous medium is indicated by the phenomena of dispersion and attenuation of seismic waves. In the dispersion phenomenon, the value of seismic wave propagation velocity will change with frequency. While in the attenuation phenomenon, the amplitude component at high frequencies of seismic waves will be weakened when the seismic waves propagate through a porous medium saturated with gas. Based on the explanation above, in this study we will use the low frequency anomaly and attenuation attributes to determine the presence of gas. The first step is that we will perform spectral decomposition of 2D post-stack seismic data using the Stockwell transform method. We use the spectral decomposition results to look directly at the low frequency anomaly and analyze the attenuation attribute parameters. The attenuation attribute parameters are the intercept and gradient of the amplitude spectrum resulting from spectral decomposition. The attenuation attribute used in this study is referred to as Amplitude Variation with Frequency (AVF), which is the product of the intercept and gradient of the amplitude spectrum.

Keywords: attenuation; spectral decomposition; dispersion; frequency; velocity; saturation

PENDAHULUAN

Chen dkk. (2015) mengatakan bahwa parameter elastik yang dihasilkan dari inversi amplitudo terhadap offset (AVO) selama ini merupakan metode yang efektif untuk mendeteksi dan mengkarakterisasi reservoir yang tersaturasi gas. Tetapi parameter elastik, seperti impedansi akustik, impedansi geser, kecepatan gelombang P dan S, poisson's ratio tidak dipengaruhi oleh frekuensi (Chen dkk., 2016). Nilai saturasi gas yang rendah maupun tinggi di dalam pori batuan akan menghasilkan nilai kecepatan gelombang seismik P yang rendah. Hubungan yang tidak linear tersebut akan sulit untuk menentukan saturasi gas berdasarkan nilai kecepatan gelombang seismik P ataupun atribut yang berhubungan dengan nilai kecepatan gelombang P (Chen dkk., 2015). Atribut yang dipengaruhi oleh

frekuensi, terutama anomali frekuensi rendah pada data seismik, memiliki potensi untuk melihat keberadaan hidrokarbon (Chapman dkk., 2005).

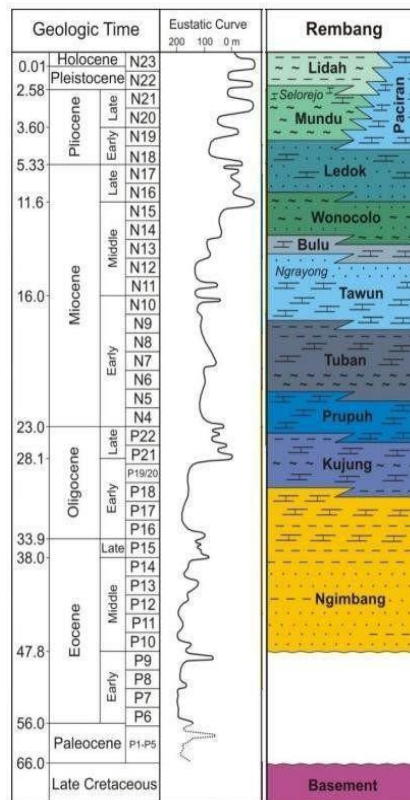
Gelombang seismik yang merambat melalui medium berpori seperti batuan pasir yang tersaturasi oleh gas akan mengalami atenuasi dan dispersi gelombang (Wu dkk., 2010; Chen dkk., 2015; Jin dkk., 2021). Ketika gelombang seismik P merambat pada medium berpori yang tersaturasi gas, maka beberapa bagian medium tersebut akan mengalami kompresi dan beberapa bagian yang lain akan mengalami ekspansi. Secara alami, zona kompresi memiliki tekanan pori yang lebih tinggi dibandingkan zona ekspansi. Jika pori batuan terhubung, maka fluida akan mengalir dari zona kompresi ke zona ekspansi. Fenomena ini disebut sebagai Wave Induced Fluid Flow (WIFF) (Liu dkk., 2011). Aliran fluida tersebut akan menginduksi kehilangan energi. Dengan kata lain, gelombang seismik P yang merambat melalui medium tersebut akan mengalami atenuasi. Bersamaan dengan atenuasi, dispersi kecepatan gelombang seismik P juga terjadi selama perambatan gelombang tersebut (Liu dkk., 2011). Sehingga dengan melibatkan pengaruh frekuensi terhadap properti fisika seperti kecepatan dan koefisien refleksi diharapkan dapat menambahkan akurasi dalam mengestimasi keberadaan zona hidrokarbon.

Atenuasi dan dispersi gelombang seismik telah dilakukan verifikasi dengan menggunakan model fisika batuan, pemodelan numerik, dan beberapa studi lapangan (Maultzsch dkk., 2003). Mandong dkk. (2021) menunjukkan bahwa pada zona reservoir yang tersaturasi oleh hidrokarbon amplitudo dominan pada zona tersebut memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan zona lainnya yang tidak tersaturasi oleh hidrokarbon. Berdasarkan hal tersebut, Mandong dkk. (2021) menunjukkan bahwa nilai atribut atenuasi yang berupa Amplitude Variation with Frequency (AVF) memiliki nilai yang tinggi pada zona yang tersaturasi gas. Erlangga dkk. (2024) memperlihatkan pengaruh sudut dari data seismik partial angle stack pada atribut AVF. Selain itu, Erlangga dkk. (2024) juga menunjukkan bahwa berdasarkan hasil pemodelan poroelastik fisika batuan, nilai atribut AVF berbanding lurus dengan nilai saturasi gas pada reservoir batupasir impedansi rendah. Chen dkk. (2015) menentukan nilai sebaran saturasi gas berdasarkan atribut dispersi yang dihitung dari data seismik post-stack. Atribut dispersi gelombang seismik juga dapat dihitung dari data seismik pre-stack. Wilson dkk. (2009) dan Chen dkk. (2016) menentukan indikator keberadaan gas berdasarkan atribut dispersi yang diturunkan dari persamaan aproksimasi AVO oleh Smith dan Gidlow (1987). Pada studi ini, kita akan menentukan nilai atribut atenuasi gelombang seismik yang dihitung dari hasil dekomposisi spektral dengan metode transformasi Stockwell dan kemudian dibandingkan dengan atribut anomali frekuensi rendah yang dihasilkan dari transformasi Stockwell tersebut. Atribut atenuasi yang digunakan pada studi ini adalah atribut AVF. Analisa anomali frekuensi rendah dan atribut AVF tersebut diterapkan untuk melihat keberadaan gas yang tersaturasi di dalam pori reservoir batuan pasir pada lapangan "X" daerah Jawa Timur.

METODOLOGI

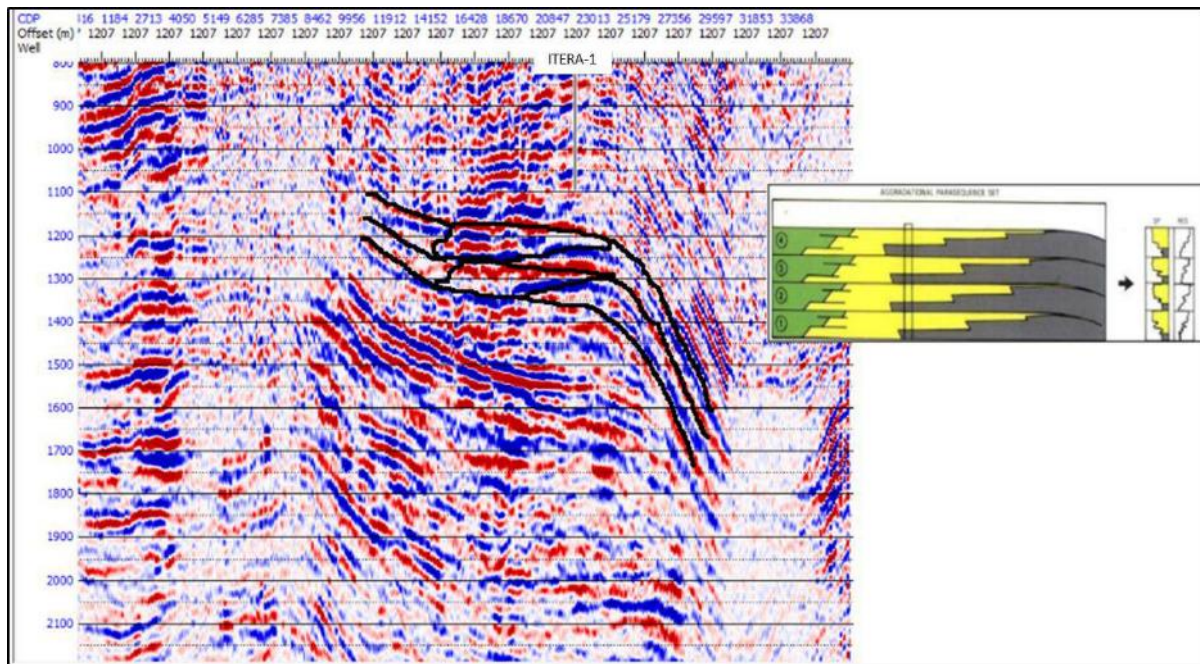
1. Data

Cekungan Jawa Timur terbentuk melalui serangkaian proses geologis seperti pengangkatan, ketidakselarasan, serta dinamika lain seperti penurunan muka air laut dan pergerakan lempeng tektonik. Pada tahap awal pembentukannya, cekungan ini ditandai oleh struktur half graben yang dipengaruhi oleh struktur geologi yang sudah ada sebelumnya. Pergerakan Lempeng Australia dan Sunda turut membentuk tatanan tektonik yang lebih muda, menghasilkan perubahan struktur regional seiring berjalannya waktu. Aktivitas tektonik utama yang terjadi pada zaman Plio-Pleistosen memicu pengangkatan di wilayah Cekungan Jawa Timur sehingga menciptakan morfologi yang kita lihat saat ini. Struktur geologi yang dominan di cekungan ini meliputi sesar naik, sesar turun, sesar geser, serta pelipatan dengan arah barat-timur sebagai dampak dari gaya kompresi selatan-utara.

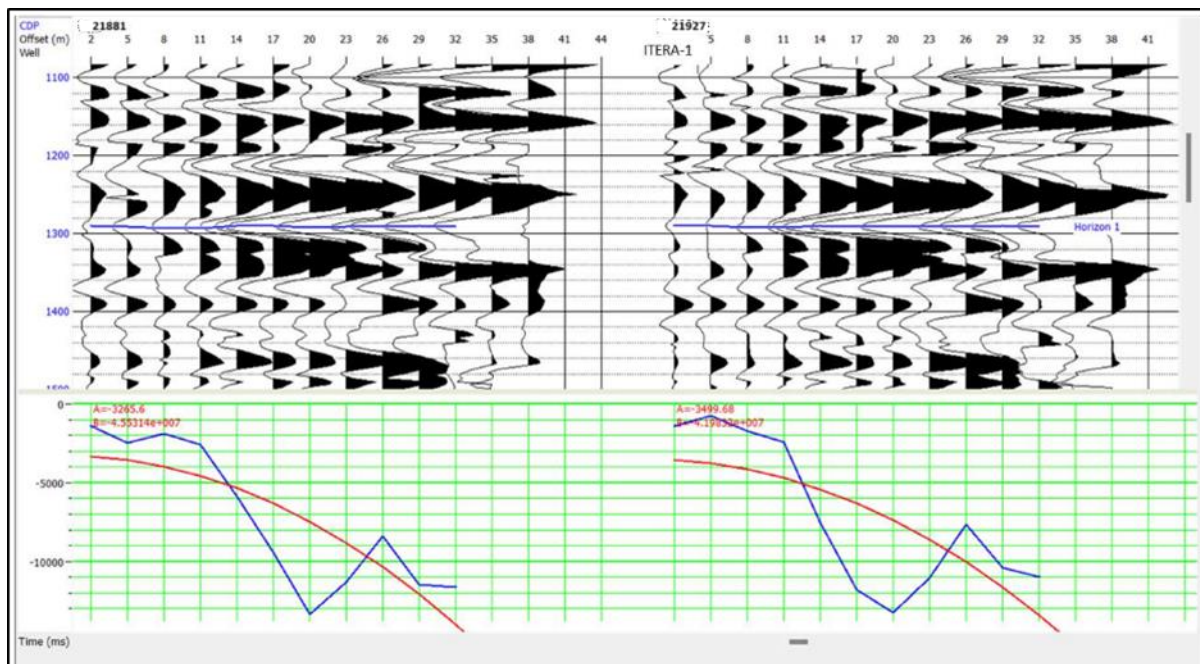


Gambar 1. Kolom stratigrafi Cekungan Jawa Timur Utara (Pringgoprawiro, H., 1983)

Stratigrafi Zona Rembang mengacu pada skema Pringgoprawiro (1983) (Gambar 1), dimulai dari batuan dasar yang tertua, dilapisi oleh Formasi Pra-Ngimbang dari periode Eosen Bawah. Formasi Ngimbang terdiri dari lapisan batupasir, serpih, dan gamping, kadang mengandung lapisan batubara. Di atasnya ada Formasi Kujung, yang terbagi menjadi dua unit yaitu Kujung 1 dan Kujung 2 dengan dominasi batuan serpih dan gamping. Berikutnya adalah Formasi Tuban yang terdiri dari batulempung, disusul Formasi Ngrayong yang dominan berupa batupasir dan tersingkap luas di wilayah Rembang. Kemudian ada Formasi Wonocolo, yang terdiri dari napal dan lempung, dan diakhiri oleh Formasi Ledok, yang tersusun atas napal pasiran, kelterit, dan batupasir.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Data seismic post-stack 2D dan model pengendapan agradasi pada zona target (kotak hijau), dan (b) analisa AVO pada data angle gather pada CDP di sekitar sumur ITERA-1

Target reservoir batupasir pada studi ini berada pada rentang CDP 11912 hingga CDP 25179 dan rentang TWT 1000 ms hingga 1400 ms (area di dalam kotak hijau pada gambar 2a). Target tersebut tepat berada di bawah sumur eksplorasi yang sudah ada (ITERA-1). Berdasarkan penampang data seismic post-stack 2D tersebut, reservoir batuan pasir tersebut memiliki pola pengendapan batuan sedimen dengan bentuk agradasi. Pola penumpukan agradasi akan terbentuk jika ada kenaikan muka air laut relatif sebanding dengan jumlah suplai sedimen. Pola penumpukan ini tidak menunjukkan pola menipis atau menebal melainkan menunjukkan pola yang relatif sama (Gambar 2a).

Berdasarkan analisa AVO (Gambar 2b), event data seismik angle gather pada CDP di sekitar sumur ITERA-1 dan TWT antara 1200 ms sampai dengan 1300 ms menunjukkan nilai intersep dan gradien AVO yang bernilai negatif. Hal ini berarti bahwa pada posisi tersebut merupakan top dari batuan pasir kelas III, yang memiliki nilai impedansi akustik dan Poisson's ratio lebih rendah dibandingkan lapisan di atasnya (lapisan penutupnya).

2. Transformasi Stockwell

Data seismik merupakan gelombang yang memiliki frekuensi bersifat non-stasioner, yaitu frekuensi dari gelombang seismik tersebut selalu bervariasi terhadap waktu. Dekomposisi frekuensi-waktu, atau sering disebut dekomposisi spektral bertujuan untuk mengkarakterisasi respon frekuensi terhadap pengaruh waktu pada data seismik.

Stockwell dkk. (1996) memperkenalkan metode Transformasi Stockwell yang digunakan untuk melakukan analisa frekuensi terhadap waktu (dekomposisi spektral). Amplitudo dari wavelet pada Transformasi Stockwell merupakan fungsi pembawa frekuensi seperti yang ditunjukkan persamaan di bawah ini.

$$U_s(\omega, \tau) = \int h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\tau-t)^2 \omega^2}{8\pi^2}} e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

dengan:

$h(t)$: input trace seismik

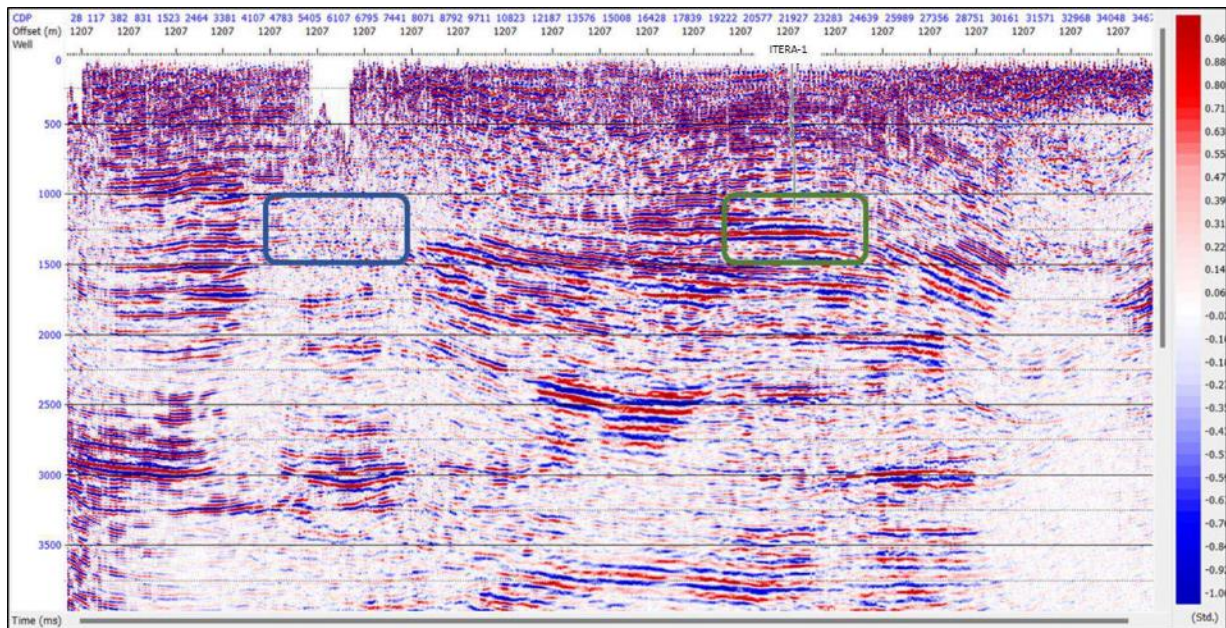
ω : frekuensi sudut

τ : titik tengah (*centre time*).

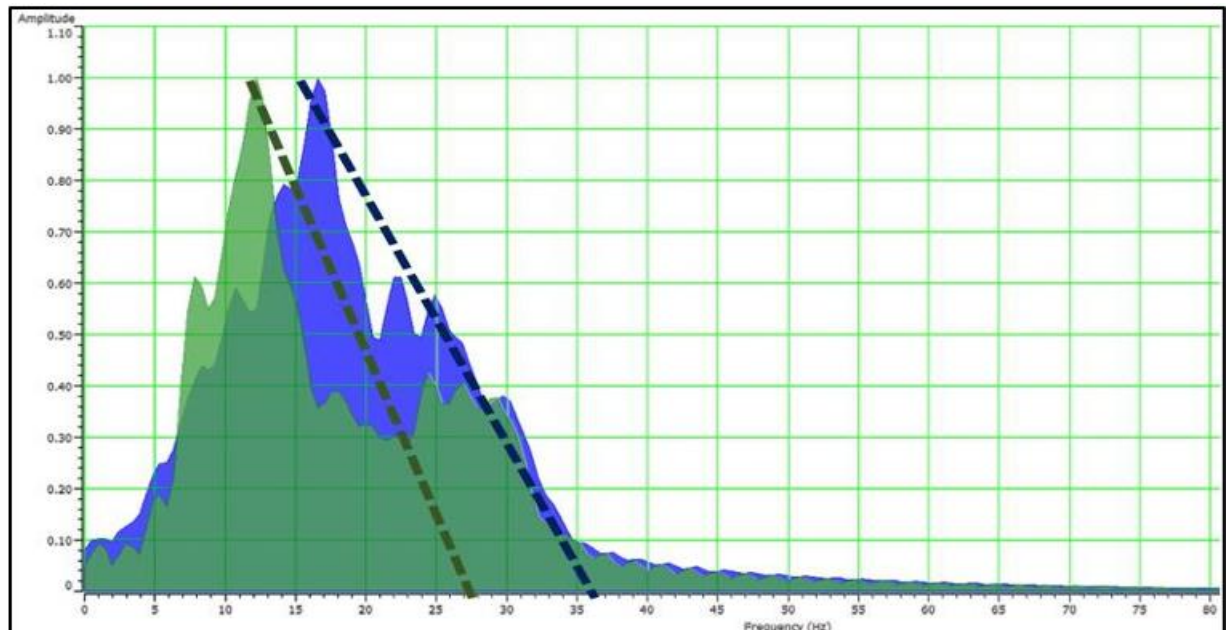
3. Amplitude Variation with Frequency (AVF)

Metode AVF ini didasarkan pada perbedaan spektrum amplitudo pada domain frekuensi terhadap waktu tempuh gelombang seismik atau zona tertentu yang terdapat indikasi saturasi fluida hidrokarbon. Input yang digunakan pada metode AVF adalah data frequency gather yang dihasilkan dari metode dekomposisi spektral frekuensi-waktu. Dengan mentransformasi data seismik ke dalam bentuk frequency gather, analisis kehilangan frekuensi tinggi (atenuasi) dapat dilakukan pada trace seismik tertentu. Hal ini juga dilakukan untuk membantu menginterpretasi gradien frekuensi pada rentang frekuensi tertentu.

Perbedaan yang diamati pada data seismik antara zona non-reservoir (kotak biru) dengan zona reservoir (kotak hijau) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a menunjukkan bahwa zona reservoir memiliki spektrum amplitudo (hijau) dengan atenuasi yang tinggi, yang ditunjukkan oleh frekuensi dominan yang rendah dan komponen amplitudo frekuensi tinggi yang rendah. Sementara zona non-reservoir memiliki spektrum amplitudo (biru) dengan atenuasi yang rendah, yang ditunjukkan oleh frekuensi dominan yang lebih tinggi dan komponen amplitudo frekuensi tinggi yang lebih tinggi. Gambar 3b memperlihatkan regresi garis sederhana diplot dari kira-kira puncak amplitudo spektrum ke sisi frekuensi yang lebih tinggi dari setiap zona. Zona yang teratenuasi lebih tinggi memiliki intersep dan gradien yang lebih tinggi sementara zona yang teratenuasi lebih rendah memiliki intersep dan gradien yang lebih rendah.



(a)



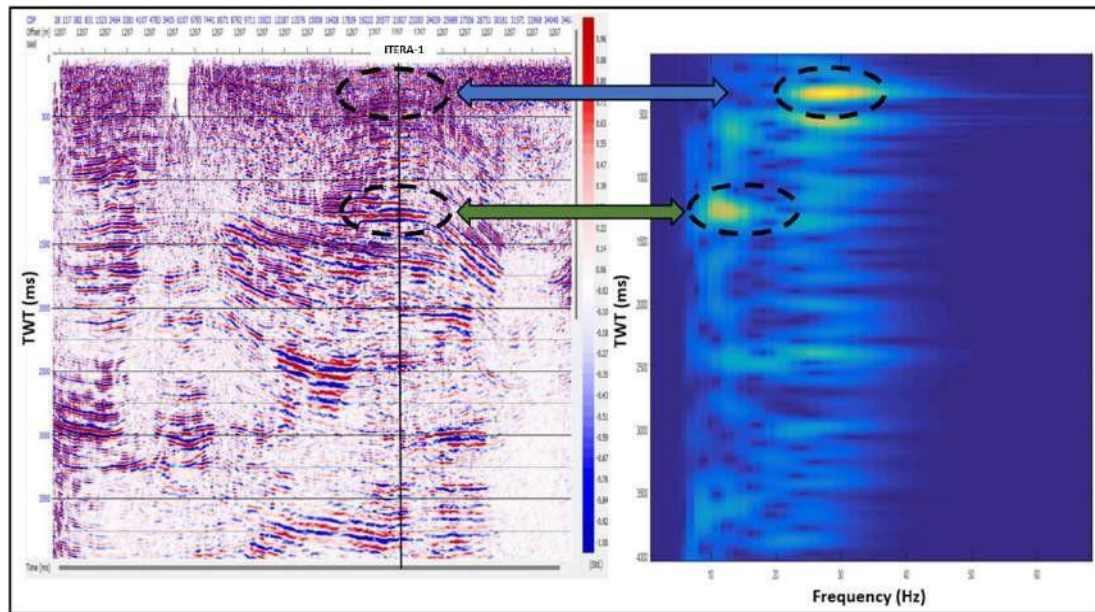
(b)

Gambar 3. (a) interpretasi zona non-reservoir (kotak biru) dan zona reservoir (kotak hijau) pada data seismik 2D dan (b) spektrum frekuensi: zona atenuasi rendah (biru) dan zona atenuasi tinggi (hijau)

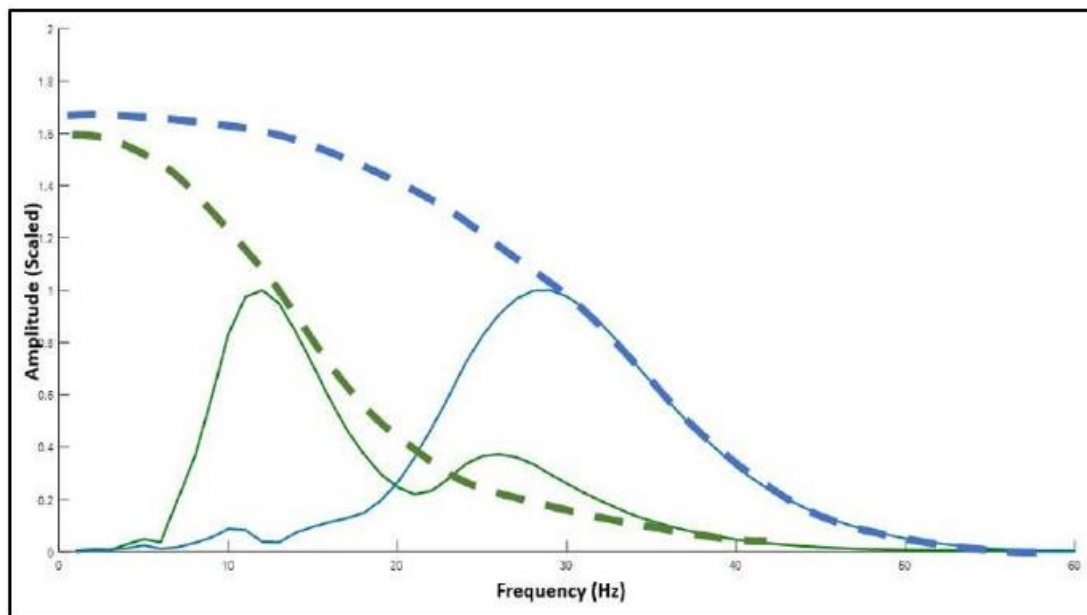
Penampang spektrum amplitudo terhadap frekuensi sebagai fungsi waktu yang dihasilkan dari dekomposisi spektral ditampilkan dalam bentuk frequency gather (Gambar 4a) sebelum dilakukan analisa variasi amplitudo terhadap frekuensi (AVF). Dengan mentransformasi data seismik ke dalam frequency gather, analisis kehilangan frekuensi tinggi (atenuasi) dapat dilakukan pada setiap trace seismik tertentu.

Atribut atenuasi direpresentasikan dengan nilai produk perkalian antara intersep (I) dan gradien (G) dari regresi garis kurva spektrum amplitudo dengan persamaan $y = I + G \cdot \sin^2(x)$ (Mandong dkk., 2021), dimana y adalah nilai amplitudo dan x adalah nilai frekuensi. Atribut atenuasi disebut juga

sebagai produk AVF (AVF I*G). Nilai rentang frekuensi (x) diambil dari nilai frekuensi pada amplitudo maksimum hingga nilai frekuensi 70 Hz. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4b.



(a)



(b)

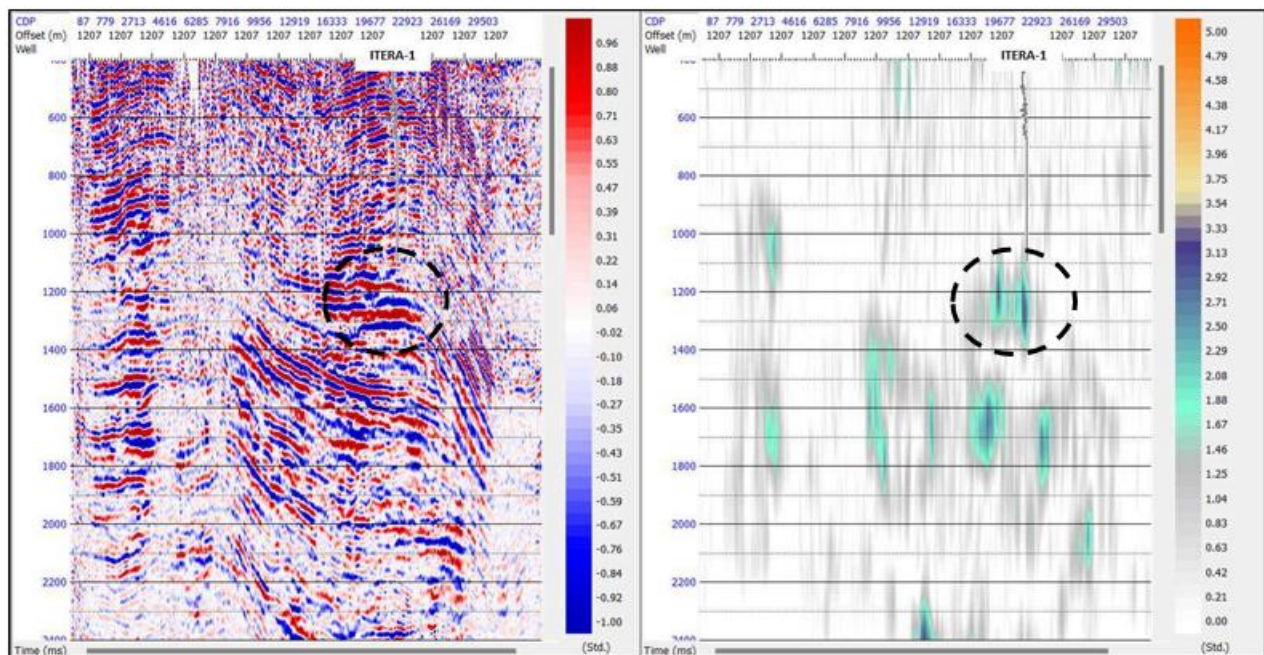
Gambar 4. (a) Penampang seismik (kiri) dan penampang frequency gather dari salah satu trace seismik pada posisi sumur (kanan), dan (b) plot spektrum amplitudo terhadap frekuensi dari dua event waktu yang ditandai dengan panah hijau dan biru.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dekomposisi spektral menggunakan Transformasi Strockwell pada penelitian dapat dilihat pada gambar 4. Berdasarkan hasil dekomposisi spektral tersebut, penampang seismik pada frekuensi 10 Hz (Gambar 5b) terdapat anomali frekuensi rendah yang memiliki posisi rentang TWT dan CDP yang sama dengan zona target reservoir batuan pasir yang memiliki pola pengendapan batuan sedimen dengan bentuk agradasasi pada data seismic post-stack (Gambar 5a). Pada penampang seismik frekuensi

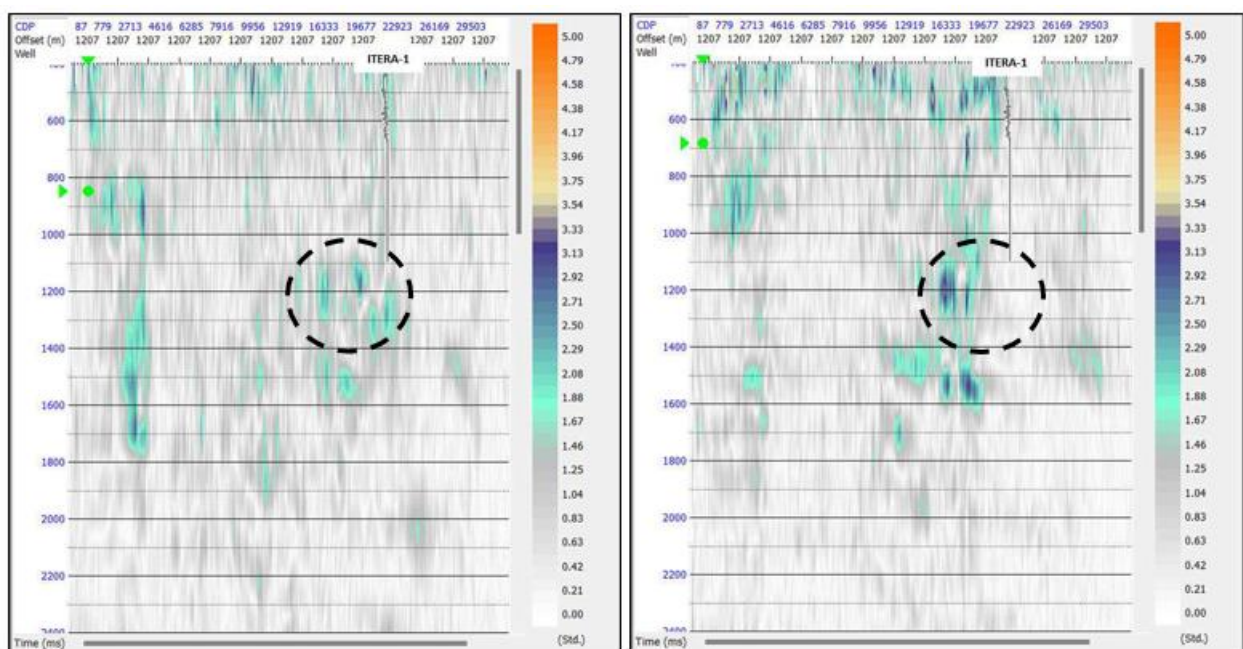
20 Hz (Gambar 5d) anomali frekuensi rendah masih memiliki posisi TWT yang sama dengan zona target, hanya saja bergeser ke arah kiri dari anomali frekuensi rendah yang muncul pada penampang seismik frekuensi 10 Hz (Gambar 5b). Hal ini disebabkan karena penampang seismik frekuensi 20 Hz memiliki resolusi vertikal yang lebih kecil daripada penampang seismik frekuensi 10 Hz. Pada penampang seismik frekuensi 25 Hz dan 30 Hz, anomali yang berada pada zona target sudah tidak muncul (Gambar 5e dan 5f).

Pada penampang atribut AVF (Gambar 6b) yang dihitung dari data seismic post-stack 2D, nilai tertinggi atribut AVF muncul pada posisi rentang TWT dan CDP yang sama dengan zona target reservoir batuan pasir yang memiliki pola pengendapan batuan sedimen dengan bentuk aggradasi pada data seismic post-stack (Gambar 5a). Nilai atribut AVF yang tinggi disebabkan karena frekuensi dominan yang rendah dan peluruhan komponen frekuensi tinggi pada spectrum amplitudo karena atenuasi gelombang seismik.



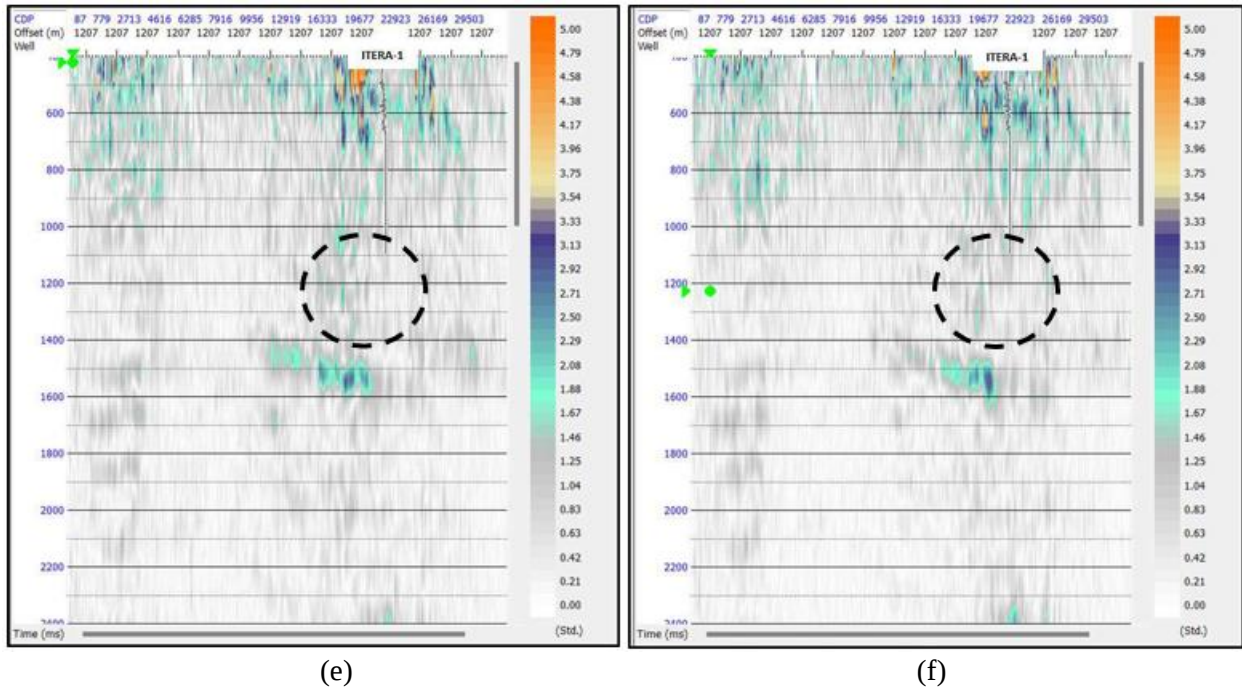
(a)

(b)

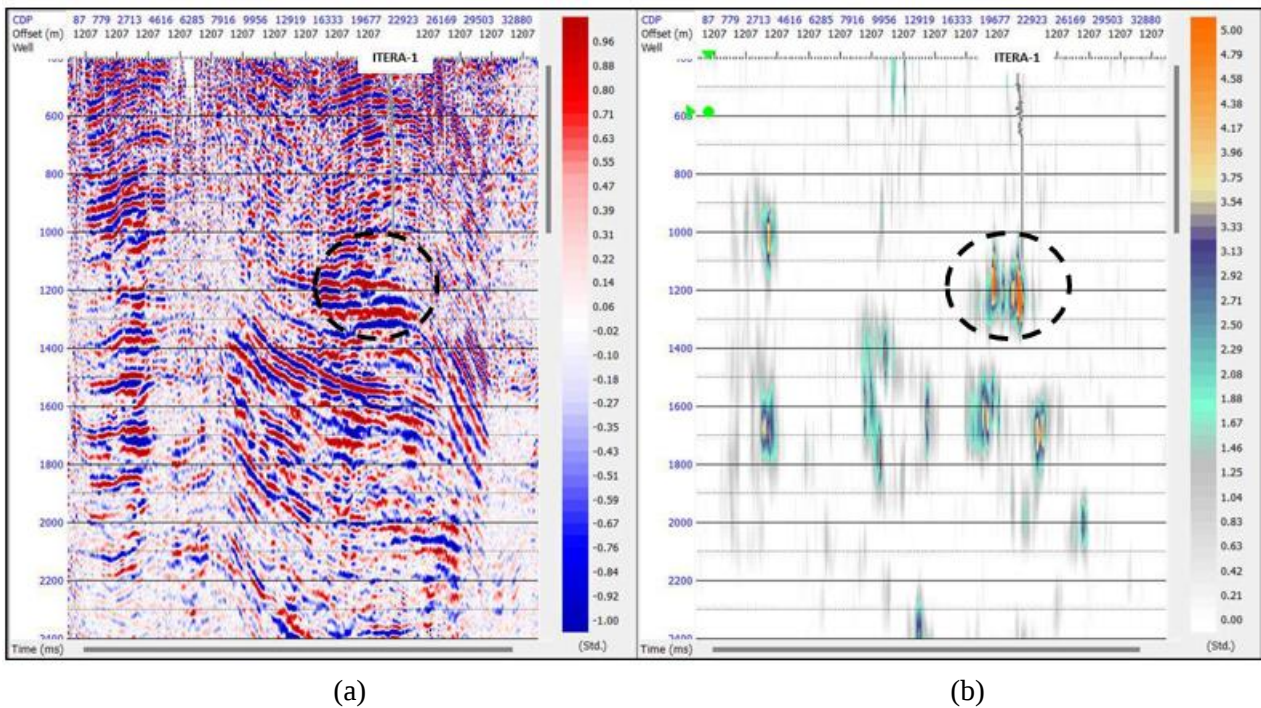


(c)

(d)



Gambar 5. (a) Data seismik post-stack 2D lapangan X dan hasil dekomposisi spektralnya pada frekuensi (b) 10 Hz, (c) 15 Hz, (d) 20 Hz, (e) 25 Hz, dan (f) 30 Hz



Gambar 6. (a) Data seismik post-stack 2D lapangan X dan (b) atribut AVF

PENUTUP

Simpulan

Atribut AVF (Amplitude Variation with Frequency) dan atribut anomali frekuensi rendah merupakan atribut yang dapat digunakan untuk melihat keberadaan gas yang tersaturasi di dalam pori batuan pasir. Saturasi gas yang tinggi di dalam pori batuan menyebabkan terjadinya peluruhan komponen amplitudo frekuensi tinggi pada gelombang seismik, sehingga hal tersebut dapat mengakibatkan adanya penurunan frekuensi dominan dan kenaikan gradien dari kurva amplitudo gelombang seismik terhadap frekuensi (spektrum amplitudo).

Berdasarkan gambar 5b dan 6b, zona yang berada di dalam lingkaran menunjukkan anomali frekuensi rendah dan nilai AVF yang tinggi dibandingkan dengan zona lainnya. Zona dengan anomali frekuensi rendah dan nilai AVF tertinggi tersebut estimasi berada pada rentang TWT 1000 ms hingga 1400 ms dan rentang CDP 11912 hingga CDP 25179. Berdasarkan nilai atribut AVF pada zona tersebut, kemungkinan terdapat saturasi gas pada reservoir batuan pasir. Batuan pasir tersebut berasal pengendapan batuan sedimen dengan pola agradasi. Pola penumpukan agradasi akan terbentuk jika ada kenaikan muka air laut relatif sebanding dengan jumlah suplai sedimen. Pola penumpukan ini tidak menunjukkan pola menipis atau menebal melainkan menunjukkan pola yang relatif sama (gambar 1).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatra untuk dukungan finansialnya dalam melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chapman M, Liu E, and Li X Y. (2005), "The influence of abnormally high reservoir attenuation on the AVO signature", *The Leading Edge*, 24, 1120–1125.
- Chen S, Chapman M, Wu X, and Li X Y. (2015), "The application of quantitative gas saturation estimation based on the seismic wave dispersion inversion", *Journal of Applied Geophysics*, 120, 81-95.
- Chen R, Chen X, Li J, Wang Z, Wang B, and Xu Y. (2016), "A new hydrocarbon indicator derived from FAVO inversion", *Conf. Paper of 86th Annual Int. Meeting SEG (Dallas), USA: Society of Exploration Geophysicists*, 516-520.
- Erlangga, M.P., Triyoso, W., Sukmono, S., Fatkhan, Wardaya, P., Septama, E. (2024), "The Application of Amplitude Variation with Frequency (AVF) Seismic Attribute to Map Gas Saturation Values in Low Impedance Sandstone Reservoirs", *First Break*, vol. 42, issue 9, 95-105. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2024080>.
- Jin, H., Liu, C., Guo, Z., Zhang, Y., Niu, C., Wang, D., dan Ling, Y. (2021), "Rock Physical Modelling and Seismic Dispersion Attribute Inversion for the Characterization of a Tight Gas Sandstone Reservoir", *Frontiers in Earth Science*, 9:641651, doi: 10.3389/feart.2021.641651.
- Liu L, Cao S, and Wang, L. (2011), "Poroeleastic Analysis of Frequency-dependent Amplitude-versus-offset Variations", *Geophysics*, 76 (3).
- Mandong, A.F., Bakti, R.P.A., and Saputra, R.L.A. (2021), "Amplitude Variation with Frequency as Direct Hydrocarbon Indicator for Quick Look and Different Insight of Hydrocarbon Delineation", *Jurnal Geofisika*, vol. 19, no. 02, pp. 62-68. <http://dx.doi.org/10.36435/jgf.v20i2.517>.
- Maultzsch, S., Chapman, M., Liu, E., Li, X.Y. (2003), "Modeling frequency dependent seismic anisotropy in fluid-saturated rock with aligned fractures: implication of fracture size estimation from anisotropic measurements", *Geophys. Prospect*, 51, 381–392.
- Pringgoprawiro, H. (1983), "Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara, Suatu Pendekatan Baru", *Desertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung*.
- Stockwell, R. G., L. Mansinha, and R. P. Lowe, 1996, Localization of the complex spectrum: The S-Transform, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(4), 998-1001.
- Smith, G.C. and Gidlow, P.M. (1987), "Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas",

Geophys. Prosp., 35, 993-1014.

Wilson, A., M. Chapman, and X. Y. Li. (2009), "Frequency-dependent AVO inversion", 79th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 341–345, <http://dx.doi.org/10.1190/1.3255572>.

Wu X, Chapman M, Wilson A, and Li X Y. (2010), "Estimating seismic dispersion from pre-stack data using frequency-dependent AVO inversion", Proc. of 80th Annual Int. Meeting SEG (Denver), USA: Society of Exploration Geophysicists, 425-429.