JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)
Vol. 09 No. 01, Maret 2023 (61-82) https://doi.org/10.23960/jge.v9i1.238

ANALISIS KUANTITATIF SEISMIK INVERSI IMPEDANSI AKUSTIK DAN POROSITAS PADA ZONA TARGET LAPANGAN "IL"

QUANTITATIVE SEISMIC ANALYSIS OF ACOUSTIC IMPEDANCE INVERSION AND POROSITY IN THE TARGET ZONE OF "IL" FIELD

Indah Lestari[1*], Gestin Mey Ekawati[2], Ruhul Firdaus[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera; Jl. Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Jati Agung, Lampung Selatan, Lampung, Indonesia, 35365; (0721) 8030188

Received: 2022, September 13th
Accepted: 2023, February 3rd

Keywords:
Acoustic impedance;
Model based;
Recursive;
Seismic inversion;
Sparse spike.

Corespondent Email:
indahhllestari13@gmail.com

How to cite this article:

Lestari, I., Ekawati, G.M., Firdaus, R. (2023). Analisis Kuantitatif Perbandingan Hasil Seismik Inversi (Rekursif, *Model Based*, dan *Sparse Spike*) Terhadap Parameter Impedansi Akustik dan Porositas Pada Zona Target Lapangan "IL", Cekungan Bonaparte. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 09(01), 61-82.

Abstrak. Daerah penelitian ini terletak di Cekungan Bonaparte, Australia. Dalam memodelkan bawah permukaan dengan metode seismik inversi impedansi akustik, peneliti kebanyakan hanya menggunakan seismik inversi berbasis *model based.* Pada penelitian ini, penulis telah melakukan pemodelan impedansi akustik (IA) bawah permukaan dengan menggunakan metode seismik *post-stack* berbasis rekursif, *model based,* dan *sparse spike.* Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui model impedansi akustik serta persebaran porositas dari hubungan *log* porositas dan impedansi akustik (IA) hasil inversi pada zona target daerah penelitian. Penelitian ini dilakukan menggunakan data seismik 3D *post stack* dan 4 data sumur yaitu MKS-1, MKS-2, MKS-3 dan MKS-4. Berdasarkan hasil pengolahan diperoleh bahwa persebaran impedansi akustik pada area target dengan seismik inversi berbasis rekursif, *model based*, dan *sparse spike* memiliki rentang IA sekitar 10000 ((ft/s)*(g/cc)) – 50000 ((ft/s)*(g/cc)) yang merupakan kisaran impedansi akustik untuk litologi *sand* berfluida – *clean sand*, serta memiliki persebaran porositas prediksi dari hasil seismik inversi memiliki rentang sekitar 0,037 – 0,176. Berdasarkan analisis kuantitatif terlihat bahwa seismik inversi *sparse spike* paling cocok dalam memodelkan parameter impedansi akustik dan porositas prediksi daerah penelitian dengan standar deviasi *error* sebesar 1867,167 untuk impedansi akustik prediksi dan 0,010 untuk porositas prediksi.

Abstract. *The research area is located in the Bonaparte Basin, Australia. In modeling the subsurface using the acoustic impedance inversion seismic method, researchers mostly only use model-based seismic inversion. In this study, the authors have modeled the subsurface acoustic impedance (IA) using post-stack based on the*

recursive, model-based, and sparse spike. This study aims to determine the acoustic impedance (IA) model and the distribution of porosity from the relationship between logs and acoustic impedance (IA) inversion in the target zone of the study area. Seismic data post-stack and four well data, namely MKS-1, MKS-2, MKS-3, and MKS-4. Based on the processing results, it is found that the distribution of acoustic impedance in the target area with recursive, model-based, and sparse spike has an IA range of 10000 ((ft/s)(g/cc)) – 50000 ((ft/s)* (g/cc)) which is the acoustic impedance range for sand – clean sand, and has a predicted porosity distribution from seismic inversion results in a range of 0.037 – 0.176. Based on the quantitative analysis, it can be seen that the seismic sparse spike is the most suitable in modeling the acoustic impedance and porosity prediction parameters of the study area, with a standard deviation of 1867.167 for the predicted acoustic impedance and 0.010 for the predicted porosity.*

© 2023 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

1. PENDAHULUAN

Cekungan Bonaparte adalah cekungan sedimen besar yang terletak di tepi barat laut Australia dengan luas 270.000 km^2. Cekungan ini dibatasi oleh unsur tektonik di Indonesia bagian Timur dan Barat-Utara Australia. Batas sebelah utara cekungan adalah Palung Tanimbar, batas utara-barat adalah Paparan Sahul dan Palung Timor, sedangkan pada timur-barat dibatasi oleh sub-cekungan Masela yang merupakan bagian timur laut dari Graben Calder dan Malita (Bishop, 1999). Cekungan Bonaparte termasuk cekungan penghasil hidrokarbon terbesar di Australia, karena mengandung sekitar 15 km endapan Fanerozoikum, samudera, sungai, silisiklastik dan karbonat (Barrett dkk., 2004).

Endapan bawah permukaan bumi dapat dimodelkan dengan metode geofisika yaitu metode seismik. Metode seismik merupakan metode geofisika yang memanfaatkan gelombang menjalar ke dalam bumi untuk mencitrakan bawah permukaan. Adapun metode seismik yang digunakan untuk pemodelan antara lain seismik inversi. Seismik inversi merupakan teknik pencitraan bawah permukaan dengan menggunakan data seismik sebagai input dan data *log* sebagai pengontrol (Sukmono, 2000). Metode seismik inversi dapat digunakan untuk pemetaan persebaran reservoir dengan menurunkan nilai impedansi akustik tiap lapisan. Impedansi akustik diperoleh dengan mengalikan densitas dengan kecepatan kompresi pada suatu lapisan sehingga dapat memberikan batasan tiap lapisan. Oleh karena itu, seismik inversi merupakan teknik yang efektif dan efisien untuk memodelkan bawah permukaan bumi (Wibowo dkk., 2020a). Pada ilmu geofisika, beradasarkan data seismik yng digunakan seismik inversi terdiri dari seismik inversi *pre-stack* dan *post-stack*. Metode seismik inversi *post-stack* cenderung lebih efisien dibandingkan metode seismik inversi *pre-stack* serta mampu memberikan gambar bawah permukaan beresolusi tinggi (Wibowo dkk., 2020b).

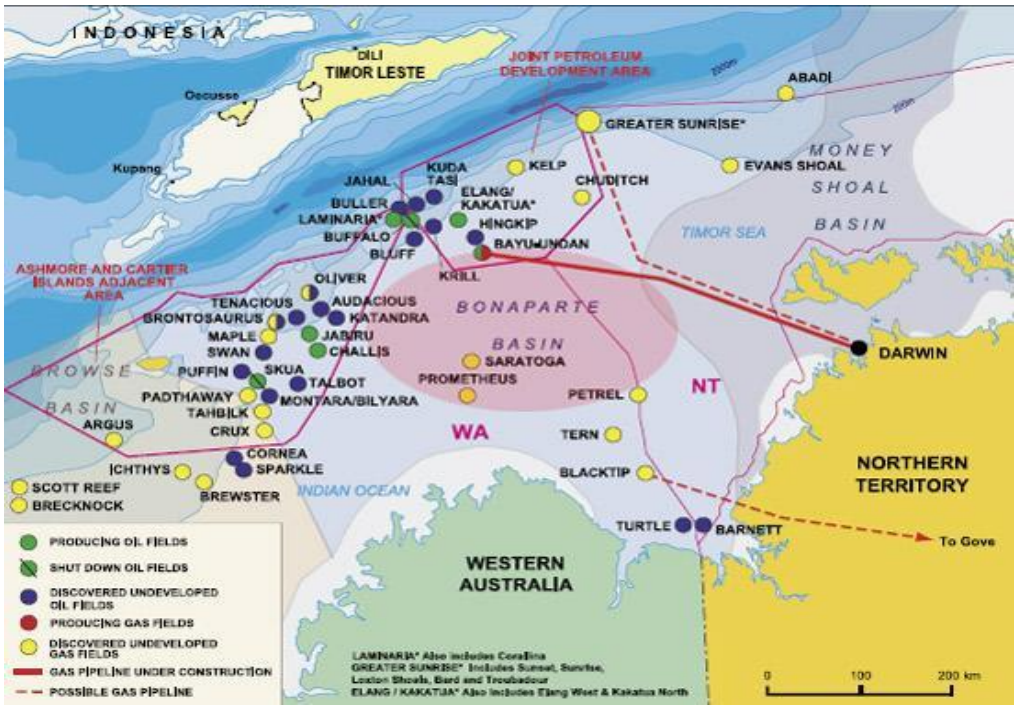
Pada saat melakukan seismik inversi *post-stack* terdapat tiga teknik yang dapat gunakan yaitu rekursif, *model based*, dan *sparse spike*. Ketiga teknik ini memiliki tujuan yang sama yaitu memodelkan bawah permukaan bumi, hanya saja algoritma penyelesaian yang berbeda. Seismik inversi rekursif adalah teknik inversi yang memperlakukan *trace* seismik sebagai kumpulan koefisien refleksi sehingga mengabaikan efek *wavelet*. Seismik inversi *model based* merupakan algoritma inversi yang tidak menginversi langsung dari seismik tetapi menginversi model geologi (Ariyanto, 2011). Sedangkan seismik inversi *sparse spike* merupakan teknik inversi yang memperlakukan reflektivitas tersusun atas seri dari *spike-spike* besar yang bertumpukan dengan *spike-spike* yang kecil sebagai *background*. Ketiga teknik seismik inversi ini memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing.

Penelitian pada daerah ini pernah dilakukan oleh beberapa peneliti serta mahasiswa yang menjadikan bahan untuk penelitian tugas akhir. Penelitian tersebut dilakukan untuk mengkarakterisasi reservoir batu pasir pada daerah penelitian. Kebanyakan dari peneliti terdahulu seperti yang dilakukan oleh Barlian (2017) dan Puspitasari (2020) yaitu melakukan karakterisasi reservoir dengan menerapkan metode seismik inversi impedansi akustik dan multiatribut. Metode seismik inversi yang digunakan hanya menggunakan seismik inversi berbasis *model based*. Untuk melengkapi penelitian sebelumnya, penulis akan melakukan pemodelan impedansi akustik bawah permukaan daerah penelitian dengan menggunakan metode seismik *post-stack* berbasis tiga teknik yaitu rekursif, *model based,* dan *sparse spike*. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh persebaran model impedansi akustik di seluruh penampang seismik dengan menggunakan ketiga metode seismik inversi yang berbeda (rekursif, *model based*, dan *sparse spike*), memperoleh persebaran porositas prediksi dari hubungan impedansi akustik dan porositas, dan mengetahui sesimik inversi mana yang paling cocok dalam memberikan model impedansi akustik dan porositas prediksi pada daerah penelitian berdasarkan analisis kuantitatif dari hasil persebaran model impedansi akustik dan porositas prediksi daerah penelitian dengan ketiga seismik inversi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Regional

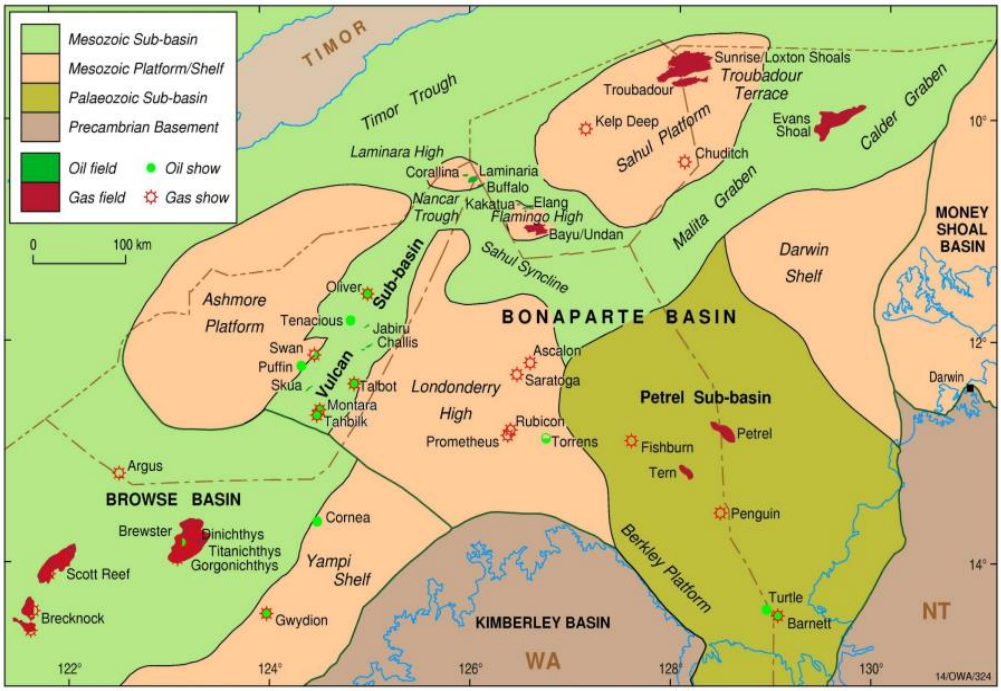
Daerah penelitian berada pada cekungan Bonaparte. Cekungan Bonaparte merupakan salah satu cekungan sedimen terbesar di Australia yang memiliki luasan ± 270.000 km^2 dengan ketebalan ± 15 km endapan Fanerozoikum, fluvial, silisiklastik, dan karbonat. Cekungan ini didominasi berada pada lepas pantai atau biasa dikenal dengan *offshore*, seperti yang terlihat pada **Gambar 1**. Secara kontinental, cekungan Bonaparte berada pada tiga negara besar yaitu Australia, Indonesia, dan Timor Leste. Sedangkan secara regional, Cekungan Bonaparte tepat berada di sebelah utara dari benua Australia, di sebelah selatan dari Nusa Tenggara Timur, dan di sebelah barat dari laut lepas Indonesia dan Australia (Barber dkk., 2003).



Gambar 1. Daerah Penelitian Ditunjukkan Oleh Area Yang Berwarna Merah (Earl, 2004).

Cekungan Bonaparte tersusun atas sesar ekstensional dan sedikit struktur kompresional. Sesar dan rekahan ini saling berhubungan sehingga membentuk sejumlah struktur sedimen, diantaranya adalah sub-cekungan Sahul dan sub-cekungan Petrel serta terdapat juga Sahul *Platform*, Malita *Graben*, dan Laminaria *High* (Chadman & Temple, 2004). Pada cekungan ini banyak ditemukan struktur tektonik yang sangat kompleks mulai dari Paleozoikum hingga Mesozoikum yang dipetakan secara regional oleh **Gambar 2** (Barrett dkk., 2004). Adapun peristiwa tektonik penting dalam evolusi cekungan ini yaitu:

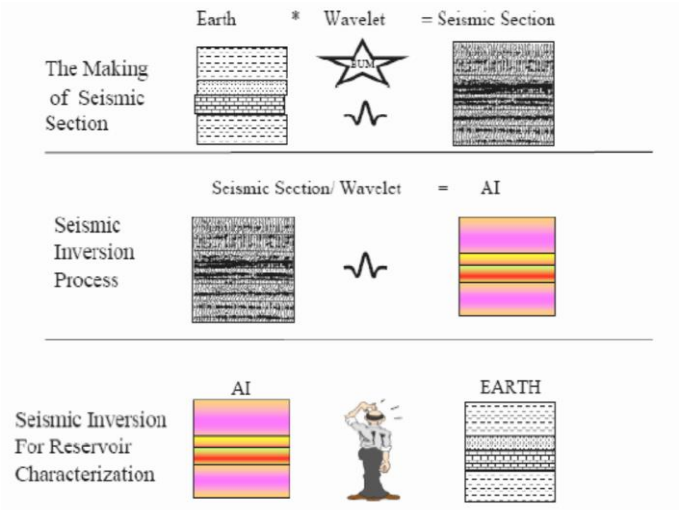
a. Pada Paleozoikum, terdiri dari dua tahap ekstensi yang berasal dari;
   - *Trend* ke arah *Northwest* saat zaman Devonian akhir - awal Carboniferous pada sistem pengangkatan sehingga membentuk Sub-cekungan Petrel.
   - *Trend* ke arah *Northeast* saat zaman Carboniferous akhir - awal Permian pada sistem pengangkatan sehingga membentuk Sub-cekungan Proto Vulca dan Proto Malita *Graben*.
b. Pada Trias akhir, terjadi kompresi Utara - Selatan yang mengakibatkan terbentuk struktur antiklin, pengangkatan, dan erosi di Londonderry *High*, Ashmore *Platform*, dan Sahul.
c. Pada Mesozoikum, terjadi perluasan yang mengakibatkan Sub-cekungan Proto Vulcan, Malita *Graben*, dan Sahul *Syncline* menjadi satu.
d. Pada akhir Miocene – Pliocene, terjadi penurunan Konvergen Lempeng Australia dan Eurasia pada Palung Timur yang mengakibatkan patahan aktif kembali serta meluas.



Gambar 2. Peta Geologi Regional Penelitian (Barrett dkk., 2004).

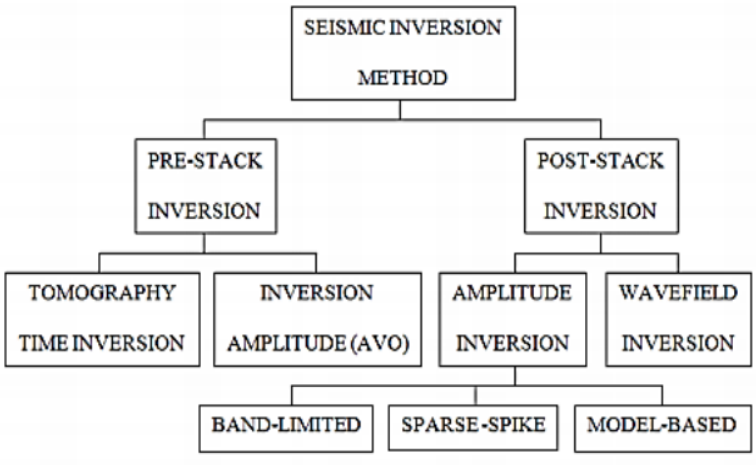
2.2. Seismik Inversi

Seismik inversi merupakan metode untuk mendapatkan model reservoir hidrokarbon berdasarkan parameter impedansi akustik serta dapat menentukan karakteristik fisis dari batuan dengan data seismik sebagai inputan. Secara umum, tahapan inversi impedansi akustik (IA) yaitu mengkonvolusi nilai *wavelet* dengan seismogram sintetik yang sudah disesuaikan dengan penampang seismik. Untuk ilustrasi terkait proses seismik inversi ditunjukkan oleh **Gambar 3.**

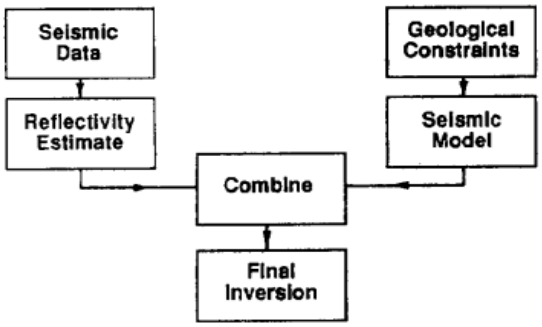


Gambar 3. Proses Seismik Inversi Secara Umum (Sukmono, 2000).

Berdasarkan data seismik, seismik inversi terdiri dari inversi *pre-stack* dan *post-stack* yang klasifikasinya dapat dilihat pada **Gambar 4.** Inversi *post-stack* mengasumsikan amplitudo seismik tidak memiliki informasi sudut reflektivitas atau sudut 0, sehingga hanya cocok digunakan untuk menentukan nilai akustik pada lapisan batuan, sedangkan pada inversi *pre-stack* mengasumsikan amplitudo seismik memiliki informasi sudut reflektivitas, sehingga cocok digunakan untuk menghasilkan parameter WI, Vp/Vs, dan LMR yang dapat melihat pengaruh fluida pada batuan. Secara umum, metode seismik inversi *post-stack* dapat diilustrasikan pada **Gambar 5.**



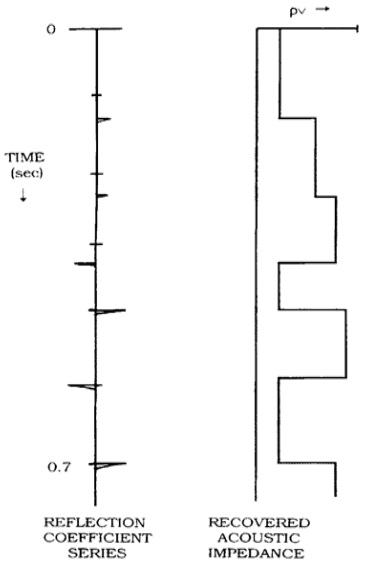
Gambar 4. Klasifikasi Metode Seismik Inversi (Russell, 1988).



Gambar 5. Tahapan Metode Seismik Inversi *Post-Stack* Secara Umum (Russell, 1988).

2.2.1. Seismik Inversi Rekursif

Inversi seismik rekursif atau juga dikenal dengan inversi *bandlimited* merupakan inversi yang paling sederhana, karena pada dasarnya data seismik bersifat *bandlimited* yaitu menghasilkan *wiggle* hitam selama proses inversi atau tidak ada *trend*. Inversi rekursif akan mengubah data seismik *post-stack* menjadi impedansi, densitas, dan kecepatan gelombang-P. Pada inversi rekursif mengasumsikan amplitudo seismik sebanding dengan reflektif bumi san mengubah *trace* seismik menjadi AI sehingga pemodelan menggunakan teknik inversi rekursif pada dasarnya tidak melakukan tahapan inversi. Berikut contoh penerapan inversi rekursif pada kondisi ideal yang dapat dilihat pada **Gambar 6.**



Gambar 6. Ilustrasi Seismik Inversi Rekursif (Russell, 1988).

Metode ini didefinisikan oleh hubungan antara jejak seismik dan impedansi seismik (Russell, 1988) yang secara matematis dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$r_i = \frac{\rho_{i+1}.V_{i+1} - \rho_i.V_i}{\rho_{i+1}.V_i + \rho_i.V_i} \quad (1)$$

Secara sederhana dapat ditulis oleh persamaan:

$$r_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (2)$$

Persamaan (2) dikenal dengan rumus refleksi kejadian normal, sehingga

persamaan ini dapat ditulis dengan persamaan:

$$\boldsymbol{Z_{i+1}r_i + Z_ir_i - Z_{i+1} + Z_i = 0} \quad (3)$$

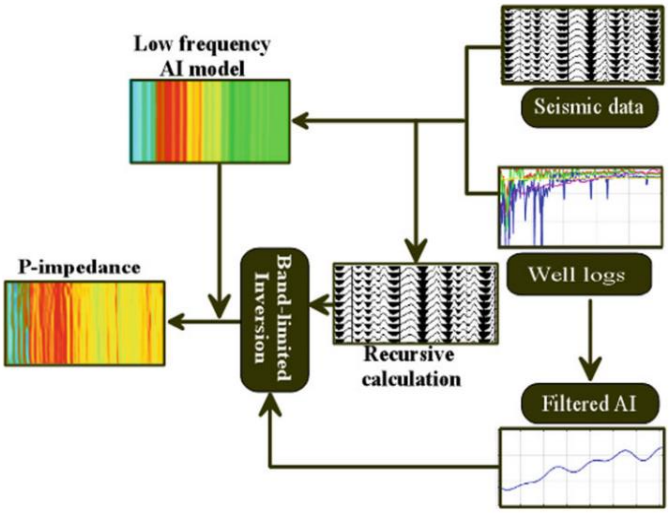
atau,

$$\boldsymbol{Z_{i+1} = Z_i\left[\frac{1+r_i}{1-r_i}\right]} \quad (4)$$

dimana, ri merupakan koefisien refleksi ke-i, z_i merupakan impedansi akustik ke-i, ρ_i merupakan densitas ke-i, dan v_i merupakan kecepatan gelombang P ke-i. Jika i = 1, 2, 3,...n maka Persamaan (4) dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$\boldsymbol{Z_n = Z_1\left[\frac{1+r_1}{1-r_1}\right]\left[\frac{1+r_2}{1-r_2}\right]\ldots\left[\frac{1+r_{n-1}}{1-r_{n-1}}\right]} \quad (5)$$

Adapun alur inversi rekursif untuk mendapatkan model impedansi secara umum dapat dilihat pada **Gambar 7.**



Gambar 7. Alur Seismik Inversi Rekursif (Maurya dkk., 2020).

Metode seismik inversi rekursif dalam menghasilkan model impedansi memiliki kelebihan dan kekurangan antara lain termasuk metode inversi yang sederhana dan dapat memberikan hasil dengan resolusi cukup baik yaitu adanya kesesuaian antara *bandwidth* data seismik dengan hasil inversi, sementara kekurangan dari metode inversi ini yaitu dapat menghasilkan lapisan yang semu karena terlalu sensitif terhadap *noise.*

2.2.2. Seismik Inversi Model Based

Inversi *model based* merupakan metode inversi seismik yang menghasilkan model impedansi akustik yang paling *fit* dengan data hasil pengukuran (Russell, 1988). Inversi seismik *model based* merupakan inversi seismik yang telah dikembangkan untuk memecahkan masalah yang muncul pada metode rekursif diantaranya yaitu pengaruh akumulasi *noise, bad amplitude*, dan *bandlimited* seismik data (Sukmono, 2000). Dalam melakukan inversi *model based,* diperlukan model frekuensi rendah dari impedansi atau biasa dikenal dengan model tebakan awal karena data seismik bersifat *bandlimited* (tidak memiliki frekuensi rendah atau tinggi). Inversi berbasis *model based* pada prinsipnya didasarkan pada teori konvolusi yang ditulis dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{S(t) = W(t) * r(t) + n(t)} \quad (6)$$

dimana, S(t) adalah seismik trace, W(t) adalah wavelet seismik, r(t) adalah reflektivitas bumi, n(t) adalah *noise*, dan * adalah simbol dari operasi konvolusi.

Pada metode ini yang perlu diperhatikan yaitu mengetahui hubungan matematis antara model dan data seismik serta cara memperbarui model tebakan, sehingga mempertimbangkan dua pendekatan yang berbeda yaitu metode *generalized linier inversion* (GLI). Metode GLI yang

dikembangkan oleh Coke & John (2010) sangat umum digunakan. Adapun alur matematis dari metode GLI sebagai berikut. Jika observasi ditulis dalam bentuk vektor, maka parameter model k dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{M} = (\boldsymbol{m_1}, \boldsymbol{m_2}, \ldots, \boldsymbol{m_k})^{\boldsymbol{T}} \quad (7)$$

dan observasi pada titik n dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{t_1}, \boldsymbol{t_2}, \ldots, \boldsymbol{t_n})^{\boldsymbol{T}} \quad (8)$$

sehingga hubungan antara parameter model dan observasi dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{ti} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{m_1}, \boldsymbol{m_2}, \ldots, \boldsymbol{m_k})^{\boldsymbol{T}} \quad (9)$$

dimana, M merupakan model parameter bumi, $(m_1, m_2, \ldots, m_k)^T$ merupakan impedansi akustik pada titik, T merupakan trace seismik, $(t_1, t_2, \ldots, t_n)^T$ merupakan trace seismik pada titik, dan t_i merupakan hasil hubungan antara model parameter bumi dengan trace seismik.

Observasi dapat dituliskan dengan deret Taylor dari model *forward* yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\boldsymbol{F(M)} = \boldsymbol{F(M_0)} + \frac{\boldsymbol{\partial F(M_0)}}{\boldsymbol{\partial M_0}} \boldsymbol{\Delta M} + \frac{\boldsymbol{\partial^2 F(M_0)}}{\boldsymbol{\partial {M_0}^2}} \boldsymbol{\Delta M^2} + .. \quad (10)$$

dimana, M_0 adalah model tebakan awal (AI dan Z), M adalah model bawah permukaan sebenarnya, ΔM adalah perubahan parameter model (AI dan Z), F(M) adalah observasi, $F(M_0)$ adalah nilai fungsi dari model tebakan awal dan $\frac{\partial F(M_0)}{\partial M_0}$ adalah perubahan nilai atau matriks sensitivitas (Russell, 1988) Secara linier Persamaan (10) dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{F(M)} = \boldsymbol{F(M_0)} + \frac{\boldsymbol{\partial F(M_0)}}{\boldsymbol{\partial M_0}} \boldsymbol{\Delta M} \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan di atas *error* yang dihasilkan antara observasi dengan perhitungan dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{\Delta F} = \boldsymbol{F(M)} - \boldsymbol{F(M_0)} \quad (12)$$

dimana, persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk matriks yang ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\boldsymbol{\Delta F} = \boldsymbol{G \Delta M} \quad (13)$$

dengan G adalah turunan matriks yang memiliki n jumlah baris dan k jumlah kolom. Sehingga, solusi persamaan di atas dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

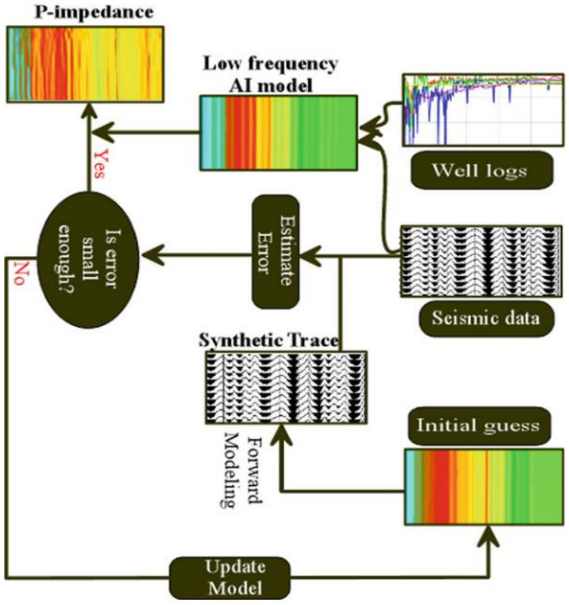
$$\boldsymbol{\Delta M} = \left(\boldsymbol{G^T G}\right)^{-1} \boldsymbol{G^T \Delta F} \quad (14)$$

Adapun fungsi objektif dari metode seismik inversi *model based* dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{W_1} \times (\boldsymbol{Sr} - \boldsymbol{Sc})^{\boldsymbol{2}} + \boldsymbol{W_2} \times (\boldsymbol{AIr} - \boldsymbol{AIc})^{\boldsymbol{2}} \quad (15)$$

dimana, J merupakan fungsi objektif yang menghubungkan total *error* (selisih *trace* sebenarnya dengan *trace* perhitungan), W merupakan pembobotan, S_r merupakan seismik *trace* sebenarnya, S_c merupakan seismik sintetik perhitungan, AI_r merupakan impedansi akustik sebenarnya, dan AI_c merupakan impedansi akustik perhitungan.

Adapun ilustrasi dan alur dari penerapan inversi *model based* dapat dilihat pada **Gambar 8.** Adapun keuntungan dari inversi metode *model based* yaitu memiliki kontrol yang baik karena terhindar inversi secara langsung dari data seismik, sementara kekurangan dari metode inversi seismik ini yaitu sering terjadi ambiguitas karena memiliki ketidak-unikan, dua *wavelet* yang berbeda dapat menghasilkan *trace* seismik yang sama.



Gambar 8. Ilustrasi dan Alur Seismik Inversi *Model Based* (Maurya, 2020).

2.2.3. Seismik Inversi Sparse Spike

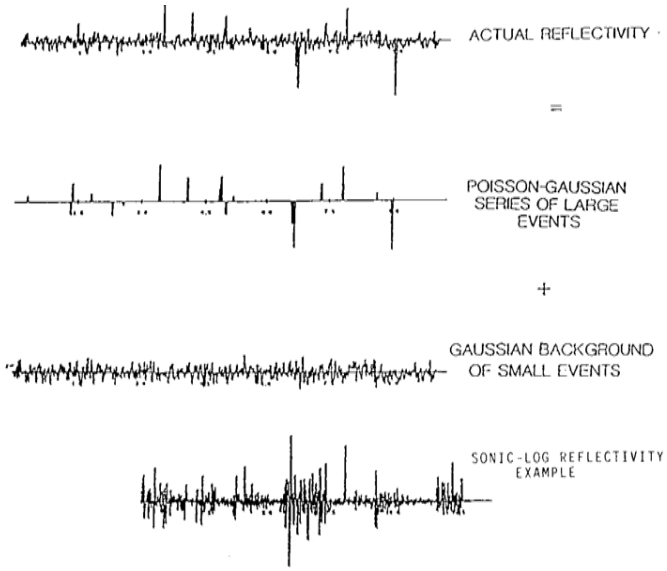
Inversi seismik *sparse spike* merupakan metode inversi seismik yang menganggap reflektivitas bawah permukaan bumi sebagai reflektivitas - reflektivitas kecil atau yang dikenal dengan deret Gaussian, tersimpan di dalam deretan reflektivitas yang lebih besar atau yang dikenal dengan deret Poisson-Gaussian dengan tujuan untuk mendapatkan impedansi akustik beresolusi tinggi yang secara ilustrasi dapat dilihat pada **Gambar 9.**

Keberadaan *spike* yang besar mengidentifikasikan bahwa adanya perbedaan nilai AI yang kontras sehingga keberadaanya sangat penting, sementara keberadaan *spike* yang kecil diabaikan karena hanya sebagai *background.* Adapaun parameter yang digunakan pada metode ini sama dengan metode inversi *model based.* Berdasarkan minimalisasi kesalahan, metode seismik inversi *sparse spike* terdiri *linear programming sparse spike inversion* yang menggunakan solusi L_1 *norm* dan *maximum likelihood inversion* yang menggunakan solusi L_2 *norm.* Pada penelitian ini menggunakan *maximum likelihood inversion* yang bergantung pada dekonvolusi *maximum likelihood* dengan memperoleh impedansi akustik yang memperlihatkan struktur *blocky* di permukaan serta meningkatkan interpretasi seismik. Adapun fungsi objektif dari metode seismik inversi *sparse spike* dengan teknik dekonvolusi *maximum-likelihood* yang secara matematis dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

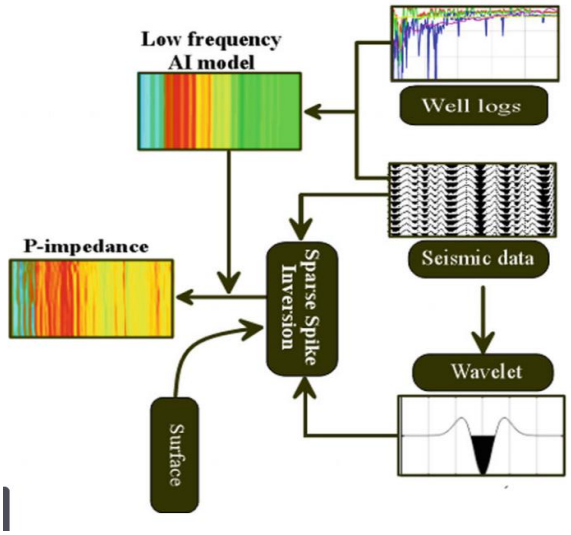
$$\boldsymbol{J = \sum_{k=1}^{L} \frac{r^2(k)}{R^2} + \sum_{k=1}^{L} \frac{n^2(k)}{N^2} - 2.m.\ln(\lambda) - 2(L-m)ln(1-\lambda)} \quad (16)$$

dimana, J merupakan fungsi objektif dari solusi optimum, r(k) merupakan koefisien refleksi, m merupakan jumlah refleksi, L merupakan jumlah total sampel, N merupakan akar kuadrat variasi *noise*, n(k) merupakan *noise* pada sampel ke-k, dan λ merupakan kemungkinan sampel tertentu memiliki refleksi.

Adapun keuntungan dari metode inversi *sparse spike* yaitu dapat menghasilkan inversi secara geologi. Kekurangan dari metode inversi ini yaitu menghasilkan persebaran yang kurang detail secara horizontal karena yang diinversikan hanya komponen *blocky* serta tidak bisa digunakan untuk data yang tidak mempunyai *noise.* Adapun alur dari penerapan inversi sparse spike dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 9. Ilustrasi Seismik Inversi *Sparse Spike* (Russell, 1988).



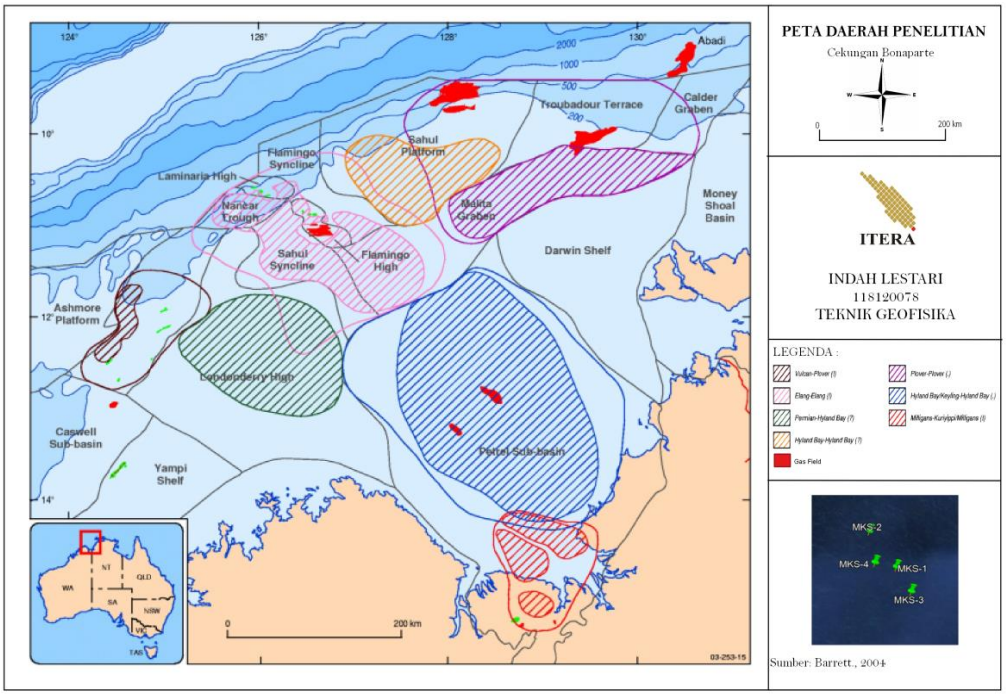
Gambar 10. Alur Seismik Inversi *Sparse Spike* (Maurya, 2020).

3. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian yang dilakukan berupa pengukuran tidak langsung. Adapun lokasi daerah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 11.**

Adapun tahapan dari penelitian ini antara lain analisis data seismik, analisis petrofisika, *well to seismic tie*, interpretasi struktur, *time* dan *depth structure map,* analisis sensitivitas, seismik inversi, validasi seismik inversi, persebaran porositas dan analisis kuantitatif. Pada tahapan analisis data seismik bertujuan untuk memahami data seismik pada daerah penelitian, yang nantinya akan membantu menginterpretasi hasil penelitian. Pada tahapan analisis petrofisika bertujuan untuk mengetahui interval target berdasarkan analisis data log. Pada tahapan *well to seismic tie* bertujuan untuk mengikat data sumur dengan data seismik. Pada tahapan interpretasi struktur bertujuan untuk mengetahui keadaan struktur dan kemenerusan lapisan bawah permukaan daerah penelitian berdasarkan data *marker*. Pada tahapan *time and depth structure map*

bertujuan untuk memberikan peta struktur dalam domain waktu serta melihat kualitas dari hasil *picking horizon.* Pada tahapan analisis sensitivitas bertujuan untuk menguji serta mengetahui hubungan porositas terhadap impedansi akustik. Pada tahapan seismik inversi bertujuan untuk mendapatkan model persebaran impedansi akustik zona target daerah penelitian. Pada tahapan validasi seismik inversi bertujuan untuk mengetahui kualitas seismik inversi yang telah dilakukan. Dimana tahapan ini sangat penting karena sebagai kontrol kualitas (QC) sebuah data. Pada tahapan persebaran porositas bertujuan untuk mendapatkan model persebaran porositas prediksi dari hasil seismik inversi yang telah dilakukan sebelumnya. Pada tahapan analisis kuantitatif bertujuan untuk mengetahui seismik inversi mana yang paling cocok dalam memodelkan persebaran impedansi akustik (Wibowo & Mulyatno, 2012) dan porositas (Dinata dkk., 2020).



Gambar 11. Lokasi Daerah Penelitian (Barrett dkk., 2004).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Data Seismik

Data seismik daerah penelitian memiliki luas area 84,4 km^2 dengan interval *inline* 1100-1400 ms dan *xline* 1000-1800 ms. Adapun analisis ketebalan tuning pada data seismik dapat dilihat pada **Tabel 1.** Berdasarkan **Tabel 1**, diketahui bahwa ketebalan dari lapisan reservoir pada daerah penelitian yang meliputi sumur MKS-1, MKS-2, MKS-3, dan MKS-4 lebih besar dibandingkan ketebalan tuningnya, sehinggga dapat disimpulkan bahwa data seismik beresolusi baik.

4.2. Analisis Petrofisika

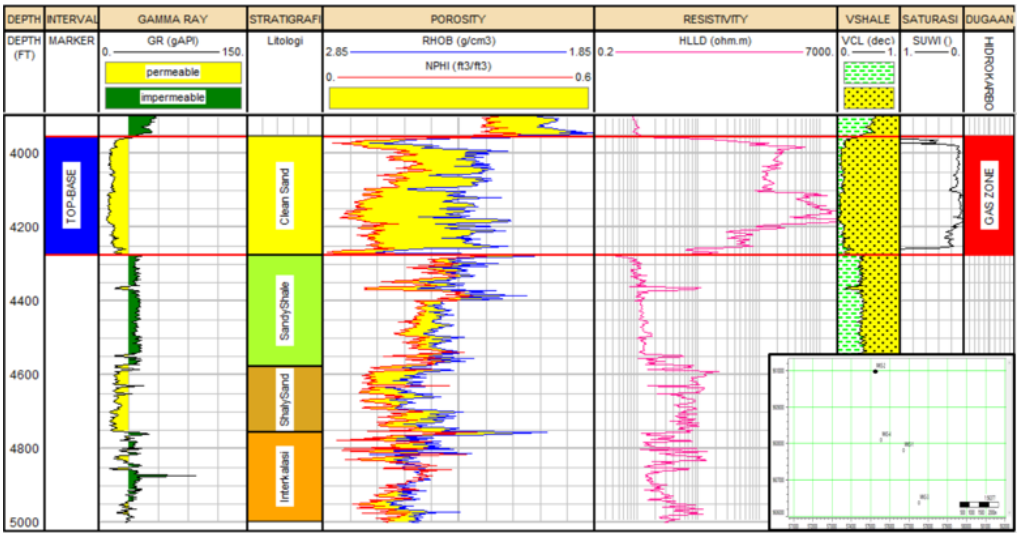
Berdasarkan *log gamma ray* setiap sumur, diketahui *shale line* berada pada 80 API dan *sand line* berada pada 20 API sehingga *cut-off* GR untuk setiap sumur bernilai 50 API. Berdasarkan **Gambar 12**, terlihat bahwa sumur MKS-1 dengan kedalaman 3900 – 5000 ft memiliki interval target pada batas *marker* (*Top - Base*) atau sekitar pada kedalaman 3955 – 4275 ft dengan litologi *clean sand* dan hidrokarbon berupa gas. Berdasarkan **Gambar 13**, terlihat bahwa sumur MKS-2 dengan kedalaman 4386,5–5475,5 ft tidak memiliki interval target baik pada batas *marker* (*Top-Base*) ataupun diluar batas *marker.*

Berdasarkan **Gambar 14**, terlihat bahwa sumur MKS-3 dengan kedalaman 4150 – 4950 ft memiliki interval target pada batas *marker* (*Top* - *Base*) atau sekitar pada kedalaman 4150 – 4453 ft dengan litologi *shaly sand* dan hidrokarbon berupa gas.

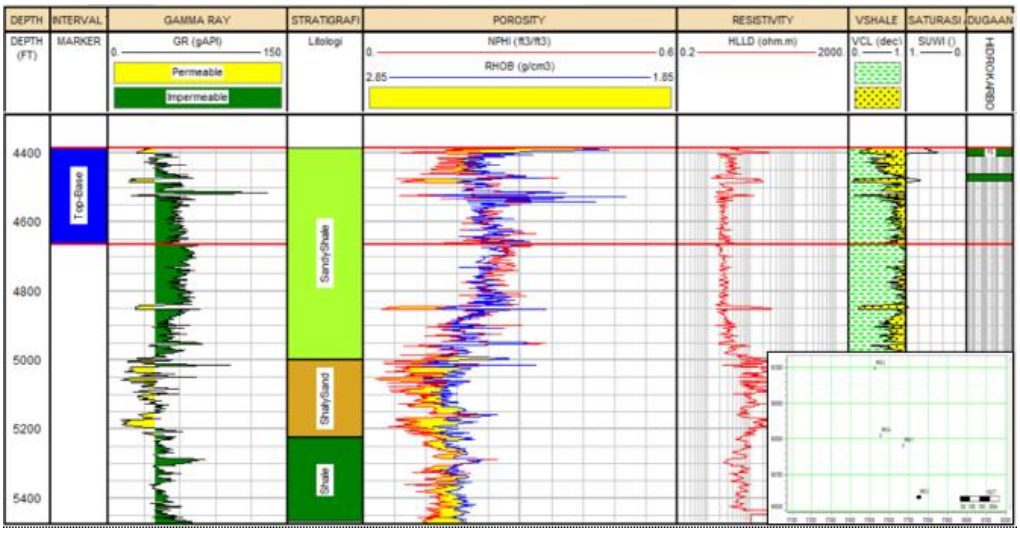
Berdasarkan **Gambar 15**, terlihat bahwa sumur MKS-4 dengan kedalaman 4130 – 5280 ft memiliki interval target pada batas *marker* (*Top* - *Base*) atau sekitar pada kedalaman 4220 – 4541 ft dengan litologi *shaly sand* dan hidrokarbon berupa gas.

Tabel 1. Ketebalan Tuning Pada Setiap Sumur.

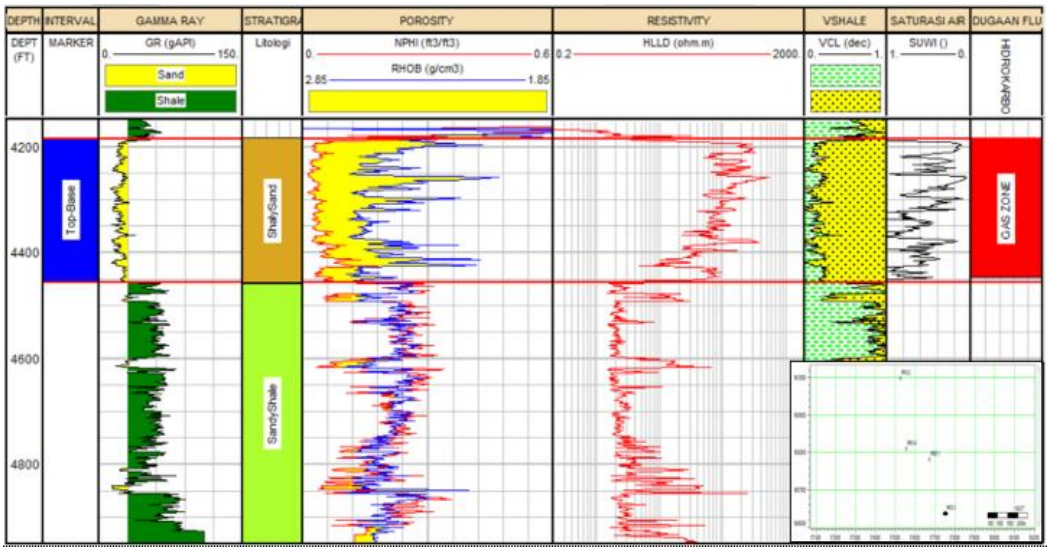
Sumur	V (ft/ms)	*f* (Hz)	λ (m)	Tebal Reservoir (m)	¼ λ (m)
MKS-1	9402,3	16	179	97,5	44,7
MKS-2	10868,5	16	207	82	51,7
MKS-3	13747,2	16	261	85	65,2
MKS-4	15487,8	16	295	97,5	73,7



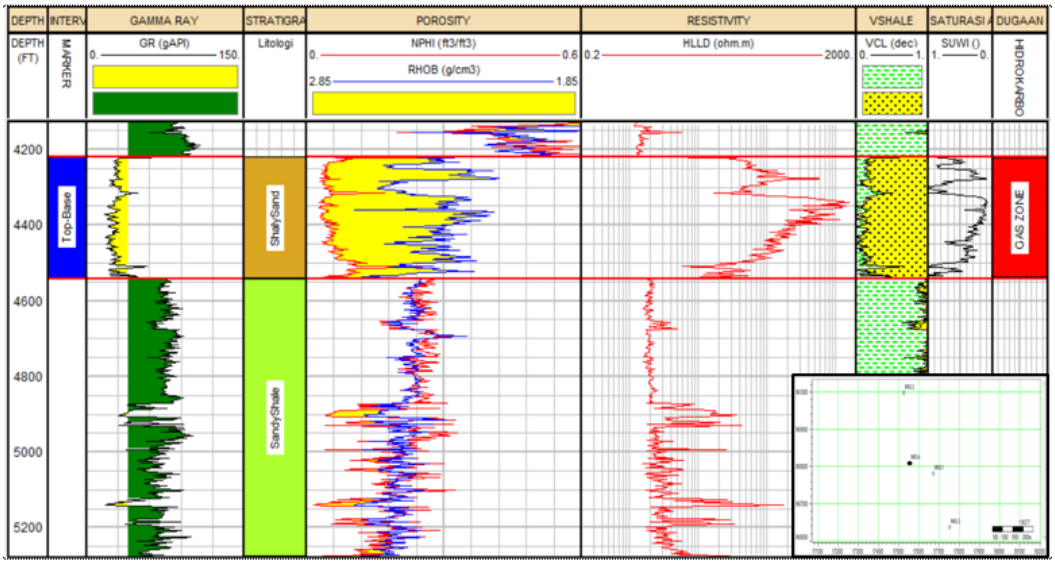
Gambar 12. Analisis Petrofisika Terkait Interval Target dan Litologi Sumur MKS-1.



Gambar 13. Analisis Petrofisika Terkait Interval Target dan Litologi Sumur MKS-2.



Gambar 14. Analisis Petrofisika Terkait Interval Target dan Litologi Sumur MKS-3.



Gambar 15. Analisis Petrofisika Terkait Interval Target dan Litologi Sumur MKS-4.

4.3. Well to Seismic Tie

Berdasarkan **Gambar 16**, terlihat bahwa hasil *well to seismic tie* pada sumur MKS-1, MKS-2, MKS-3, dan MKS-4 memiliki nilai korelasi dan *time shift* yang dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Berdasarkan **Tabel 2,** terlihat bahwa *wavelet statistical* memberikan rata-rata korelasi yang tinggi sehingga nantinya akan digunakan pada tahapan inversi. Adapun parameter yang digunakan interval *inline* 1100-1400 ms, *xline* 1000-1800 ms, *time* target 1111 – 1263 ms, dan *wavelength* 320 ms.

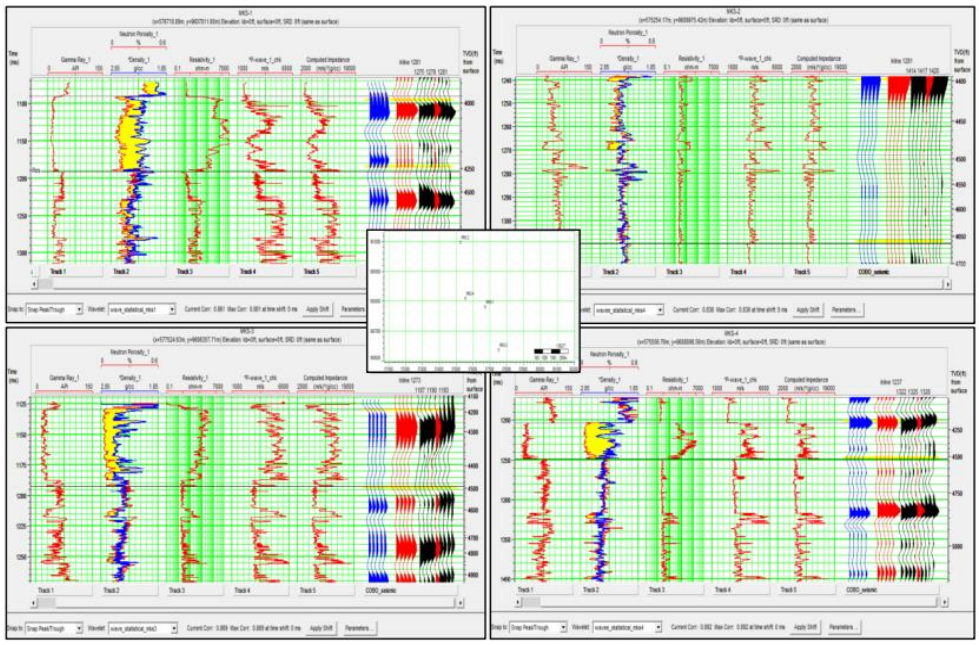
4.4. Interpretasi Struktur

Berdasarkan **Gambar 17**, terlihat bahwa adanya dugaan patahan besar yang ditandai dengan garis biru yang terletak antara sumur MKS-1 dan MKS-4, batas kiri sumur MKS-2 dan batas kanan sumur MKS-3 serta banyak patahan kecil di sekitar patahan besar yang tidak ditandai karena cukup banyak. Patahan besar diduga sebagai perangkap hidrokarbon pada lapangan "IL" dikarenakan sistem perangkap petroleum dari cekungan Bonaparte berupa patahan. Berdasarkan **Gambar 18**, horizon pada daerah penelitian terdiri dari *top* (warna

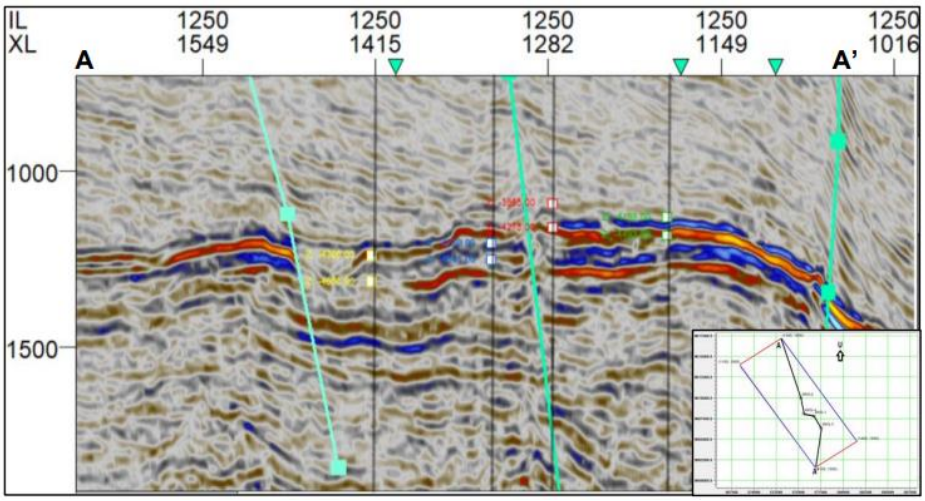
kuning) dan *base* (warna hijau) yang sudah disesuaikan dengan data *marker*. Diduga kedua horizon ini terletak pada satu formasi yang sama yaitu formasi plover dikarenakan ketebalan sekitar 39 ms dan berdekatan antara *peak* dan *trough.*

Tabel 2. Hasil *Well to Seismic Tie* Pada Setiap Sumur.

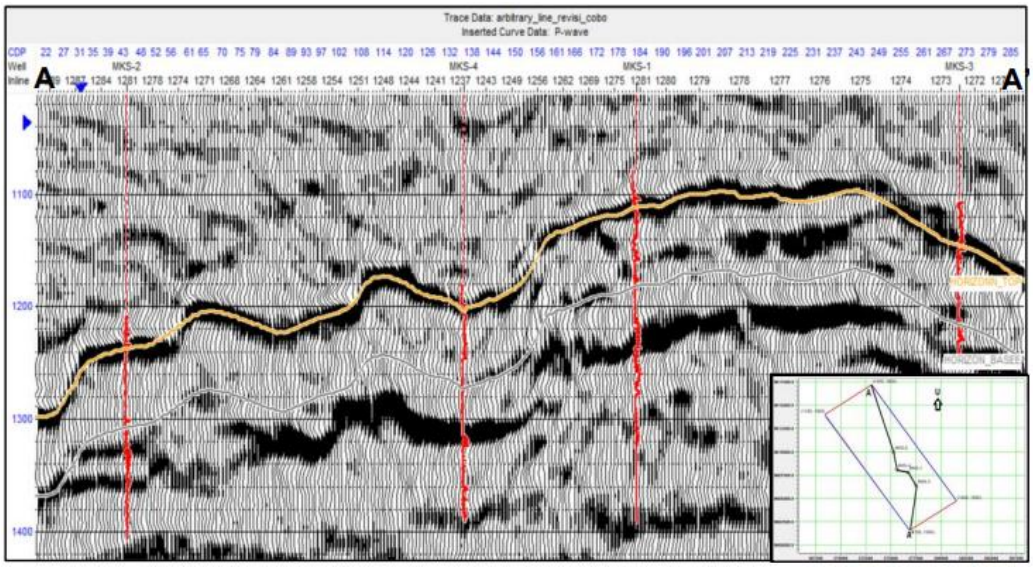
Wavelet	MKS-1		MKS-2		MKS-3		MKS-4		Mean
	Corr	TS	Corr	TS	Corr	TS	Corr	TS	
Use Well	0,82	0	0,70	0	-	-	0,71	0	0,748
Statistical	0,86	0	0,83	0	0,86	0	0,89	0	0,864
Ricker	0,87	0	0,83	0	0,89	0	0,84	0	0,861
Bandpass	0,91	0	0,48	0	0,78	0	0,95	0	0,784



Gambar 16. *Well To Seismic Tie* Pada Sumur MKS-1, MKS-2, MKS-3, dan MKS-4.



Gambar 17. Picking Fault Pada Atribut *Structural Smoothing.*



Gambar 18. *Picking horizon.*

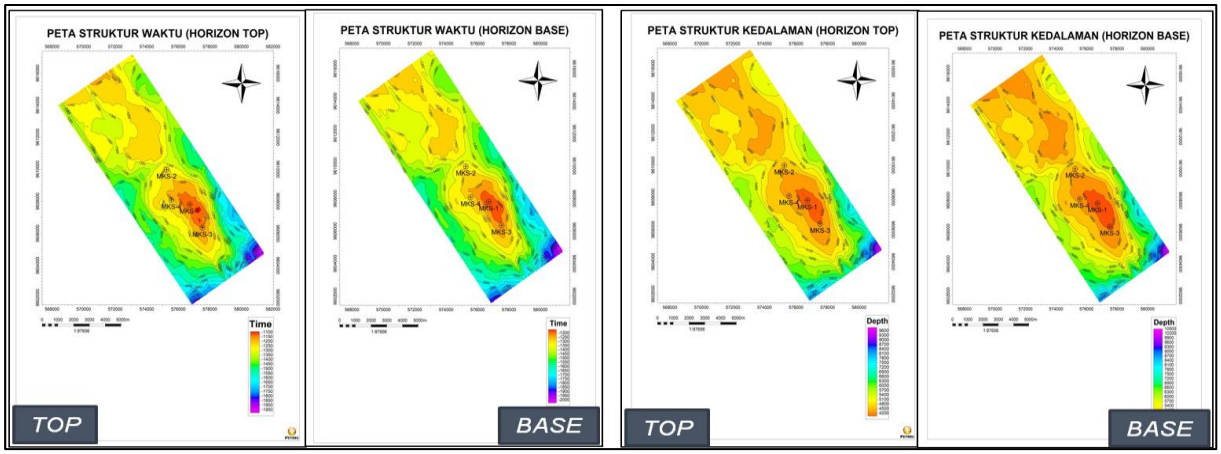
4.5. Time dan Depth Structure Map

Berdasarkan **Gambar 19**, terlihat bahwa daerah penelitian memiliki 2 area *closure*, dimana sumur MKS-1 berada paling tinggi atau dekat dengan permukaan dan disusul MKS-3, MKS-4, dan MKS-2.

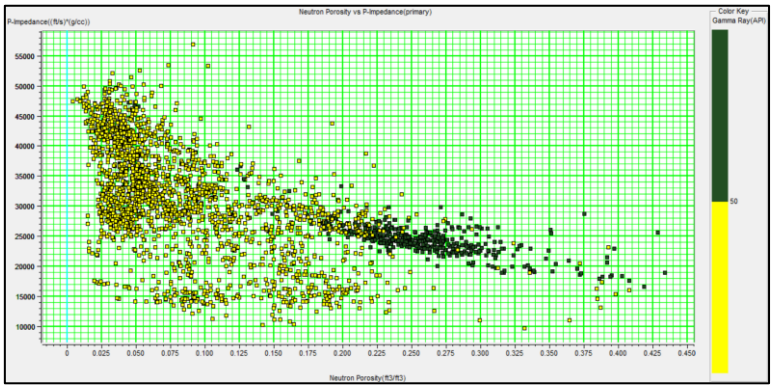
4.6. Analisis Sensitivitas

Berdasarkan hasil *crossplot* area target sumur MKS-1, MKS-2, MKS-3, dan MKS-4 yang ditunjukkan oleh **Gambar 20,** terlihat bahwa atribut impedansi akustik dan porositas dapat memisahkan litologi batu pasir dan batu lempung dengan baik, serta hubungan impedansi akustik yang berbanding terbalik dengan porositas.

Hubungan ini disebabkan nilai impedansi akustik tinggi menandakan bahwa adanya batuan yang keras atau sangat kompak sehingga menyebabkan porositas kecil serta memungkinkan pada batu pasir diisi oleh fluida yang menyebabkan porositasnya semakin kecil.



Gambar 19. *Time* dan *Depth Structure Maps.*



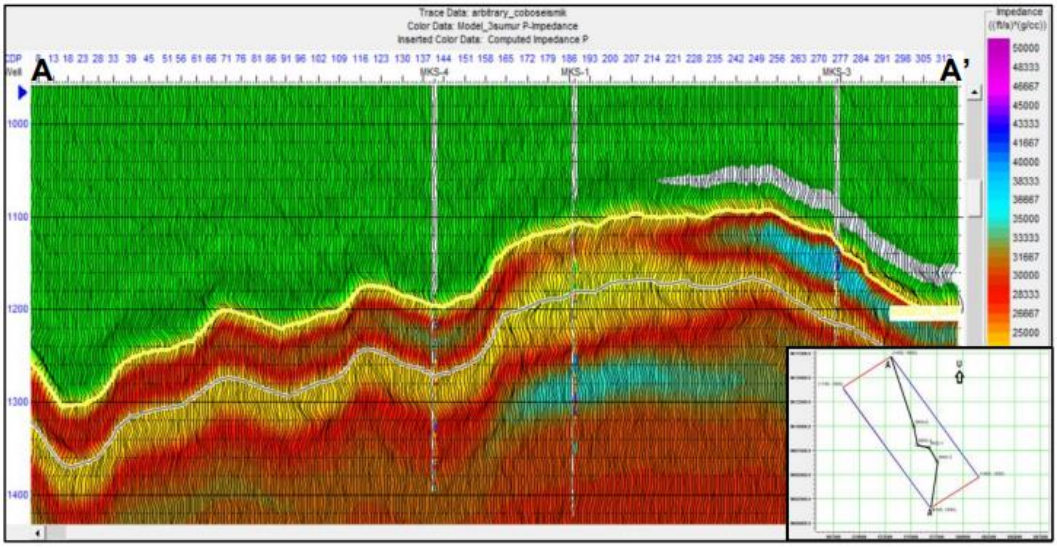
Gambar 20. *Crossplot* Porositas vs Impedansi Akustik Pada Sumur MKS-1, MKS-2, MKS-3 dan MKS-4 (Skala Warna Gamma Ray).

4.7. Seismik Inversi

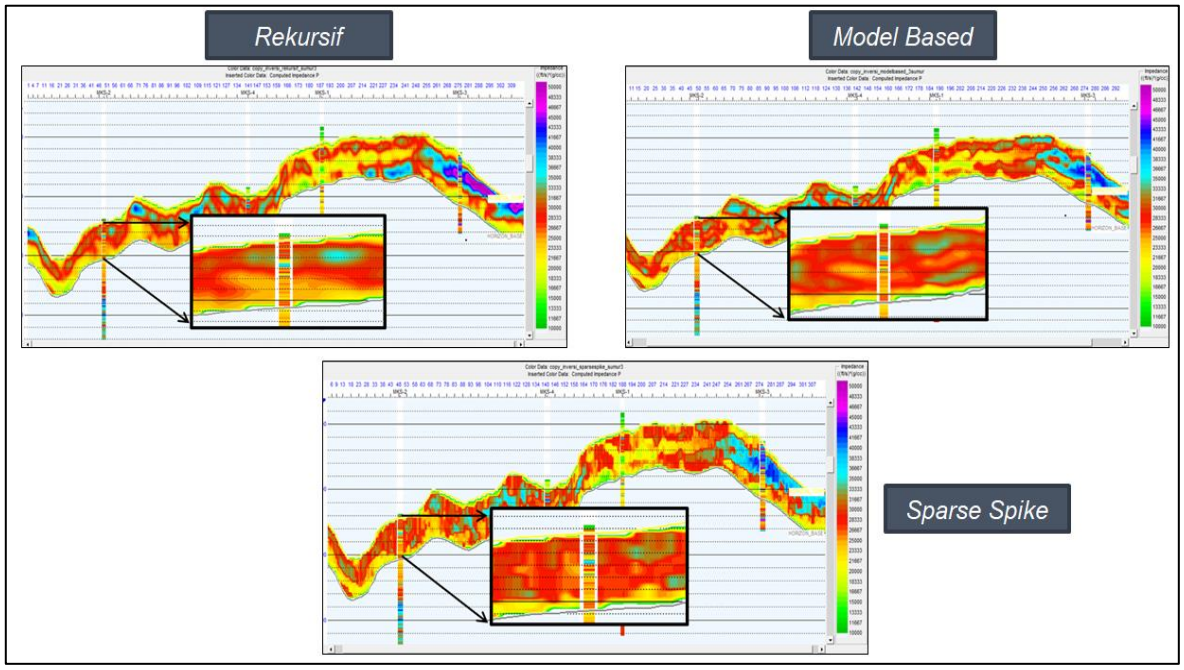
Seismik inversi dilakukan dengan menggunakan ketiga teknik seismik inversi yang meliputi inversi rekursif, *model based*, dan *sparse spike*. Adapun model inisial pada area target daerah penelitian ditunjukkan oleh **Gambar 21**, terlihat bahwa hasil inversi model inisial pada daerah penelitian memiliki rentang 10000-50000 ((ft/s)*(g/cc)) yang menandakan area target tersusun atas litologi batu pasir. Adapun hasil penampang persebaran impedansi akustik prediksi dengan seismik inversi rekursif, *model based, sparse spike* ditunjukkan oleh **Gambar 22** dengan keterangan rentang impedansi akustik dapat dilihat pada **Tabel 3.** Secara vertikal hasil seismik inversi *sparse spike* lebih baik dibandingkan hasil inversi lainnya, dan secara horizontal tampilan *sparse spike* mirip dengan hasil seismik inversi *model based.*

Tabel 3. Hasil persebaran impedansi akustik seismik inversi.

Inversi	Rentang IA ((ft/s)*(g/cc))	
	25000 - 35000	> 35000
Rekursif	✓	✓
Model Based	✓	✓
Sparse Spike	✓	✓



Gambar 21. Model inisial.



Gambar 22. Validasi seimik inversi pada sumur MKS-2.

4.8. Validasi Seismik Inversi

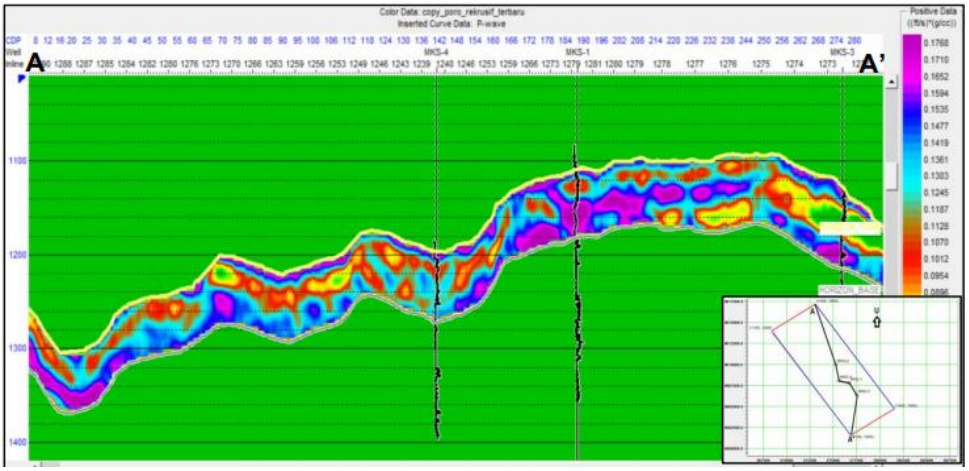
Validasi seismik inversi ini dilakukan dengan melihat kecocokan antara impedansi akustik dari sumur MKS-2 dengan hasil seismik inversi, dimana sumur MKS-2 ini tidak dilibatkan pada tahapan inversi. Berdasarkan **Gambar 22**, terlihat bahwa korelasi impedansi akustik hasil inversi dengan sumur MKS-2 cukup baik karena kemenerusan yang dihasilkan hampir sama. Impedansi akustik dari sumur tentunya akan lebih detail secara vertikal dibandingkan impedansi akustik hasil inversi dikarenakan seismik inversi melibatkan data seismik yang resolusi vertikalnya tidak sebaik sumur, namun secara *horizontal* sangat baik. Tidak hanya itu, hasil seismik inversi dapat dikatakan cukup berhasil dikarenakan memiliki nilai korelasi rata- rata 0,9.

4.9. Persebaran Porositas

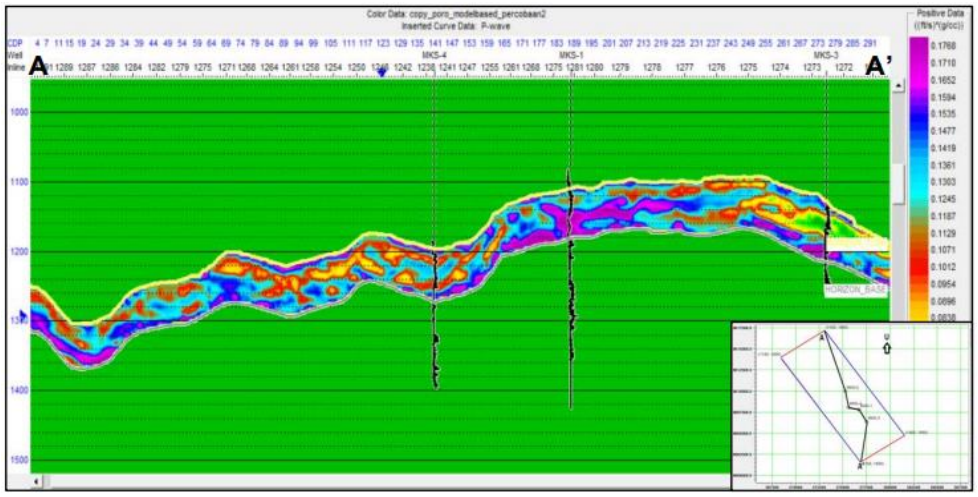
Persebaran porositas ini dilakukan dengan melihat hubungan antara impedansi akustik dengan porositas yang dilakukan pada analisis sensitivitas yaitu impedansi akustik berbanding terbalik dengan porositas karena impedansi akustik dipengaruhi oleh kecepatan, dan kecepatan dipengaruhi oleh porositas (berbanding terbalik) dengan persamaan berikut:

$$y = -0{,}00000565698x + 0{,}28397 \quad (17)$$

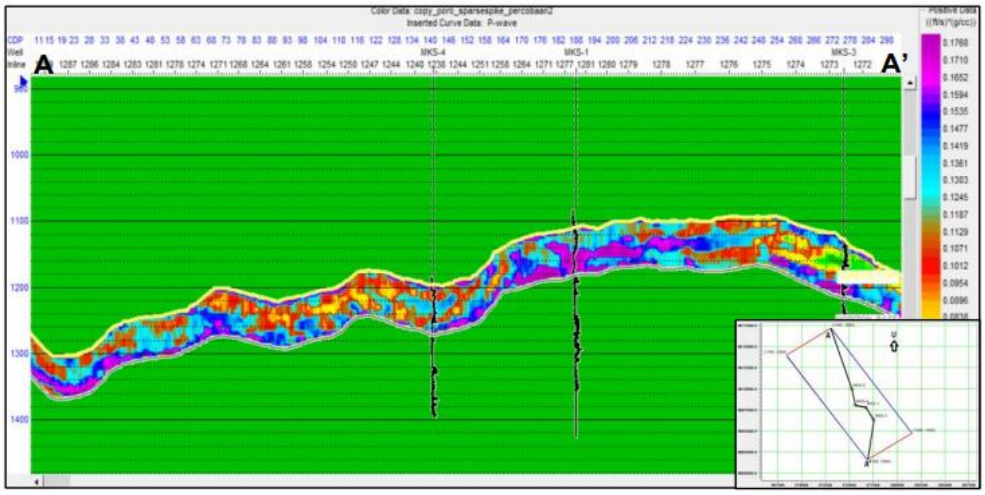
dimana, x merupakan hasil seismik inversi dan y adalah hasil porositas prediksi. Pemodelan ini dilakukan untuk mengetahui secara umum terkait persebaran porositas prediksi dari hasil pemodelan impedansi akustik yang telah dilakukan sebelumnya. Hasil model persebaran porositas berdasarkan hasil ketiga seismik inversi yang ditunjukkan oleh **Gambar 23- 25**, dengan rentang sekitar 0,037 – 0,176. Berdasarkan **Gambar 23 -25**, terlihat bahwa sumur MKS-1 dan MKS-4 dominan tersusun atas batuan berpori lebih tinggi dibandingkan persebaran porositas pada sumur lainnya dengan rentang sekitar 0,101 – 0,176, sedangkan pada sumur MKS-3 dominan tersusun atas batuan berpori rendah dengan rentang antara 0,037 – 0,101.



Gambar 23. Model persebaran porositas prediksi dengan seismik inversi rekursif.



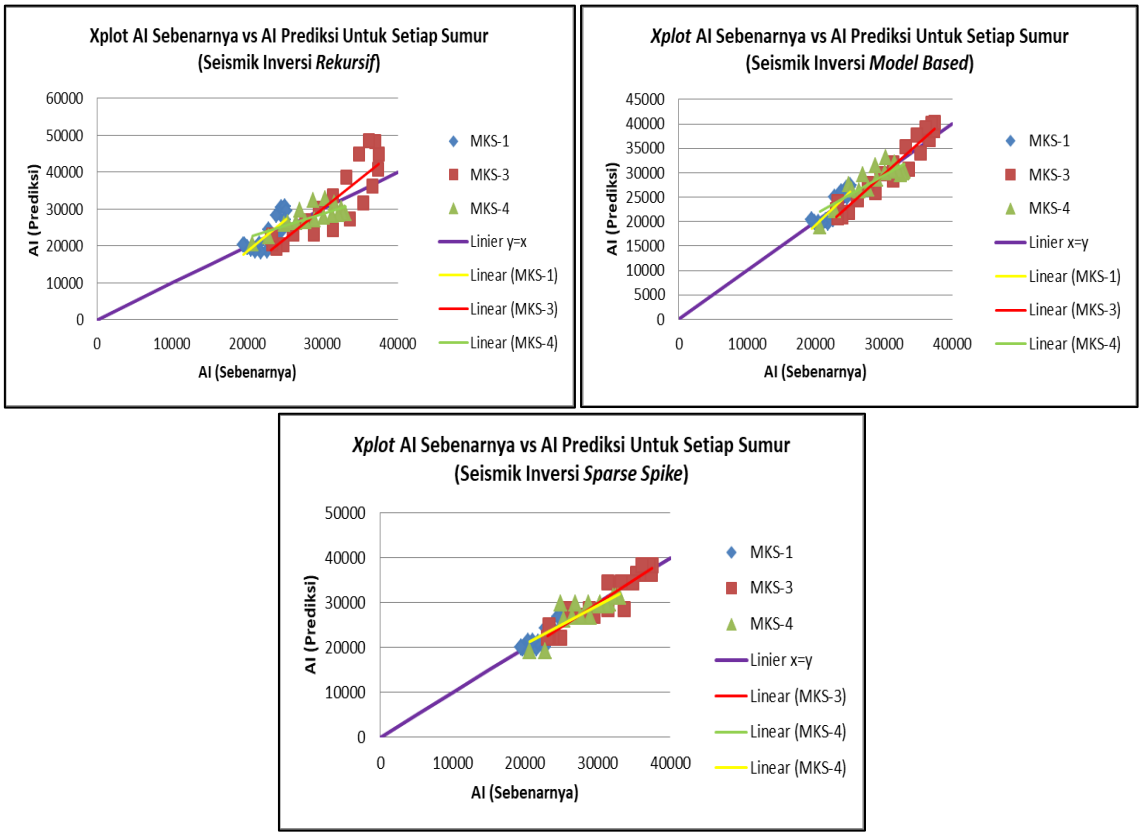
Gambar 24. Model persebaran porositas prediksi dengan seismik inversi *model based.*



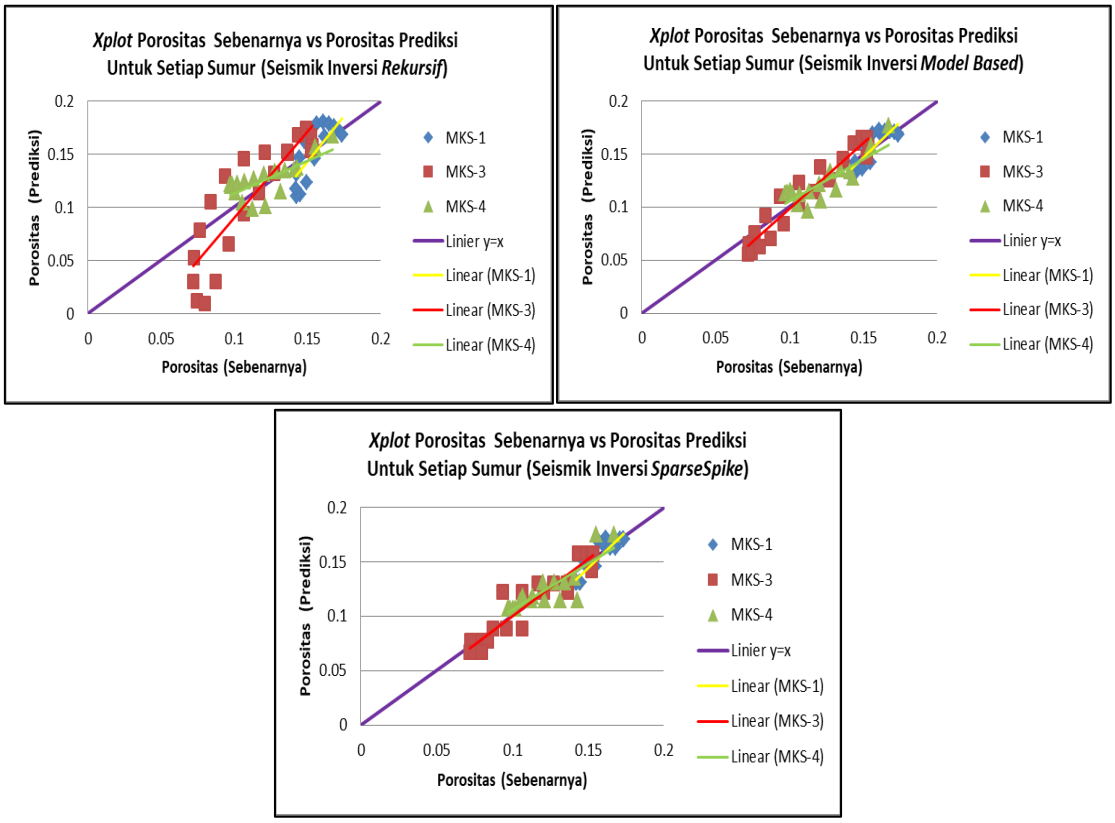
Gambar 25. Model persebaran porositas prediksi dengan seismik inversi *sparse spike.*

4.10. Analisis Kuantitatif

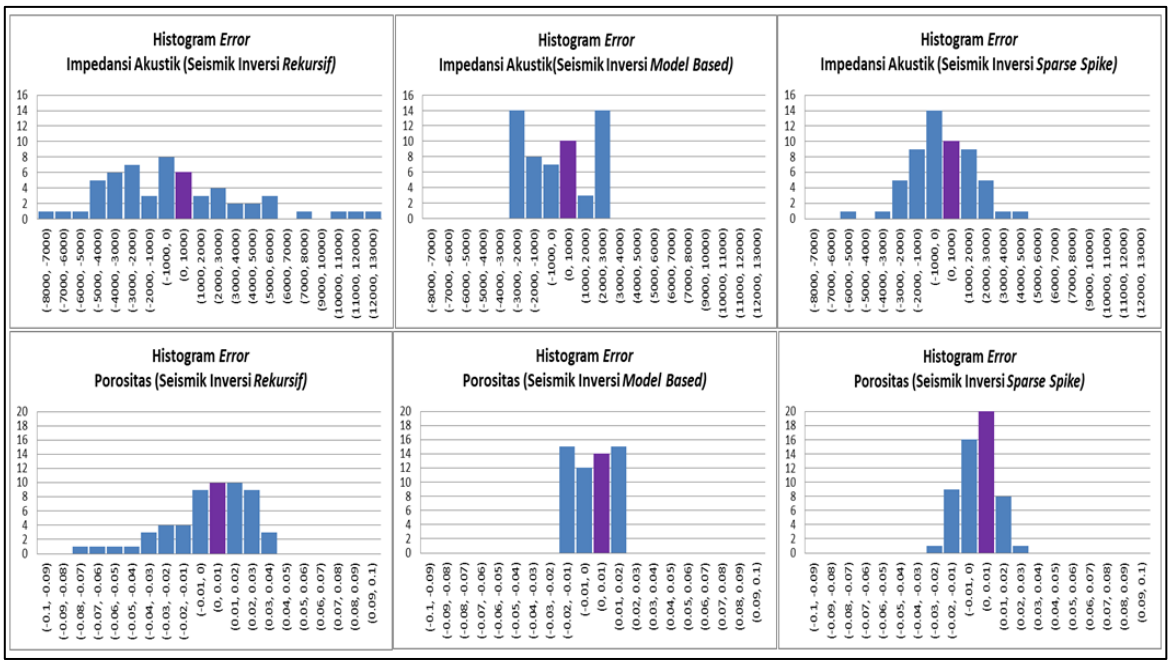
Berdasarkan **Gambar 26**, terlihat bahwa impedansi akustik hasil seismik inversi *sparse spike* lebih akurat dibandingkan hasil seismik inversi lainnya, yang ditandai dengan garis linier antar sumur hampir berhimpit dengan garis gradien (y = x) atau dengan kata lain *offset overestimate* dan *underestimate* tidak terlalu jauh. Dilakukan juga analisis kuantitatif pada persebaran porositas prediksi dari ketiga hasil seismik inversi. Berdasarkan **Gambar 27** terlihat bahwa porositas prediksi dengan seismik inversi *sparse spike* juga lebih akurat dibandingkan persebaran porositas dari seismik inversi lainnya karena *trendline* antara setiap sumur hampir berhimpit dengan garis y=x. Tidak hanya itu, berdasarkan analisis *error* yang ditunjukkan oleh **Gambar 28**, terlihat bahwa seismik inversi *sparse spike* lebih memberikan distribusi *error* terkecil baik dalam mengestimasi impedansi akustik maupun porositas. Hal ini juga didukung dengan **Tabel 4,** terlihat bahwa standar deviasi untuk *sparse spike* paling kecil dengan nilai 1867,167 untuk impedansi akustik prediksi dan 0,010 untuk porositas prediksi, sehingga sudah terbukti jika seismik inversi lebih memberikan model persebaran impedansi akustik dan porositas prediksi paling akurat dibandingkan seismik inversi lainnya.



Gambar 26. *Crossplot* AI sebenarnya vs AI prediksi untuk setiap sumur (seismik inversi rekursif, *model based*, dan *sparse spike*).



Gambar 27. *Crossplot* porositas sebenarnya vs porositas prediksi untuk setiap sumur (seismik inversi rekursif, *model based*, dan *sparse spike*).



Gambar 28. Histogram *error* estimasi impedansi akustik dan porositas setiap inversi.

Tabel 4. Nilai standar deviasi *error* impedansi akustik dan porosias pada setiap seismik inversi.

Seismik Inversi	Standar Deviasi		Keterangan
	Impedansi Akustik	Porositas	
Rekursif	4211,330648	0,023815357	Paling Tidak Akurat
Model Based	2013,063437	0,011383333	Cukup Akurat
Sparse Spike	1867,167972	0,010558123	Paling Akurat

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis hasil pengolahan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

a. Berdasarkan ketiga seismik inversi yang dilakukan menghasilkan persebaran model impedansi akustik cukup baik dengan korelasi rata-rata 0,9 serta validasi antara AI sumur dan hasil inversi yang cukup mirip. Dimana rentang AI yang diperoleh berkisar sekitar 10000 ((ft/s)*(g/cc)) – 50000 ((ft/s)*(g/cc)).
b. Berdasarkan hasil persebaran porositas prediksi yang dilakukan dari hasil seismik inversi impedansi akustik dapat diketahui bahwa rentang porositas prediksi berkisar sekitar 0,037 – 0,176. Secara umum terlihat bahwa hubungan porositas dan impedansi akustik berkorelasi negatif.
c. Berdasarkan analisis kuantitatif persebaran impedansi akustik dan porositas prediksi dengan ketiga seismik inversi dapat diketahui bahwa hasil seismik inversi *sparse spike* paling cocok dalam memodelkan parameter impedansi akustik dan porositas prediksi daerah penelitian dengan standar deviasi *error* sebesar 1867,167 untuk impedansi akustik prediksi dan 0,0105 untuk porositas prediksi.
d. Adapun kelemahan seismik inversi rekursif dan *model based* dibandingkan *sparse spike* antara lain tidak memodelkan bawah permukaan lebih detail secara lateral yang dibuktikan hasil analisis kuantitatif persebaran impedansi akustik dan persebaran porositas untuk setiap sumurnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sumatera dan pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan dan saran terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ariyanto, Y. (2011). Pemodelan Acoustic Impedance Untuk Karakterisasi Reservoir Pada Daerah "X" Sumatera Selatan. Universitas Indonesia.

Barlian, R. R., Fatkhan, P. I., & Firdaus, R. (2017). Karakterisasi Reservoir Batu Pasir Menggunakan Seismik Multi Atribut Dan Seismik Inversi Pada Lapangan "Barlian" , Cekungan Bonaparte. Institut Teknologi Sumatera.

Barber, P., Carter, P., Fraser, T., Bailie, P., & Myers, K. (2003). Paleozoic and Mesozoic Petroleum Systems in the Timor and Arafura Seas, Eastern Indonesia, in: Indonesian Petroleum Association Twenty-Ninth Annual Convention & Exhibition, October 2003. Indonesian Petroleum Association, Jakarta. https://doi.org/10.29118/ipa.428.03.g.169

Barrett, A. G., Hinde, A.L. & Kennard, J. (2004). Undiscovered Resource Assessment Methodologies and Application to The Bonaparte Basin. Geoscience Australia.

Bishop, M.G. (1999). Total petroleum systems of the Bonaparte Gulf Basin area, Australia; Jurassic, Early Cretaceous-Mesozoic; Keyling, Hyland Bay-Permian; Milligans-Carboniferous, Permian, Open-File Report 99-50-P, U.S. Geological Survey, Reston, VA. https://doi.org/10.3133/ofr9950P

Cadman, S.J. & Temple, P.R. (2004). Bonaparte Basin, NT, WA, AC & JPDA, Australian Petroleum Accumulations Report 5, 2nd Edition. Canberra.

Cooke, D & John, C. (2010). Pemodelan Dengan Seismik Inversi: Perbandingan Pendekatan Metode Deterministik dan Probabilistik. Makaira Geotechnical.

Dinata, O., Mulyanto, B.S., Ramadian, R. dan R. Arief, D., 2020, Prediksi Porositas Menggunakan Metode Neural Network Pada Lapangan Ozza, Cekungan Sumatra Tengah,

Jurnal Geofisika Eksplorasi, 6 (1) p.77-86. doi: 10.23960/jge.v6i1.63

Earl, K. L. (2004). The Petroleum System of The Bonaparte Basin. Geoscience Australia.

Maurya. (2020). Seismic Inversion Methods: A Practical Approach. Springer Geophysics.

Puspitasari, M. (2020). Penerapan Metode Seismik Inversi Acoustic Impedance (AI) dan Multi-Atribut Untuk Karakterisasi Reservoir Pada Cekungan Bonaparte. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.

Russell, B. H. (1988). Introduction to Seismic Inversion Methods. Society of Exploration Geophysicists (SEG).

Sukmono, S. (2000). Seismik Inversi Untuk Karakteristik Reservoir. Institut Teknologi Bandung.

Wibowo, R.C., Arlinsky, D., Ariska, S., Wiranatanegara, B.W., & Riyadi, P. (2020a). Gas Saturated Sandstone Reservoir Modeling Using Bayesian Stochastic Seismic Inversion. J. Geosci. Eng. Environ. Technol. 05, 25–31. https://doi.org/10.25299/jgeet.2020.5.1.4503

Wibowo, R.C., Ariska, S., & Dewanto, O. (2020b). Inversi Geostatistik Menggunakan Analisa Multi-Atribut Stepwise Regression untuk Karakterisasi Reservoir. Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan. 30, 187-202. doi:10.14203/risetgeotam2020.v30.1088

Wibowo, R.C. & Mulyatno, B.S. (2012). Karakterisasi Reservoar Menggunakan Metode Inversi Impedansi Akustik dan Neural Network Pada Lapangan "ICL" Cekungan Sumatera Selatan, in: Proceedings PIT HAGI 2012. HAGI, Palembang, pp. 2–4.