

Prinsip Inversi Seismik

Oleh:

Suprayitno Munadi

I. PENDAHULUAN

Inversi seismik (*seismic inversion*) menjadi sangat populer akhir-akhir ini sehubungan dengan pekerjaan karakterisasi reservoir dan perkiraan besar cadangan migas dari lapangan yang jumlah sumurnya masih sedikit. Pada kedua jenis pekerjaan ini diperlukan peta distribusi porositas di luar sumur-sumur yang ada, dan hal ini didapat dari lintasan-lintasan seismik yang melingkupi lapangan yang bersangkutan.

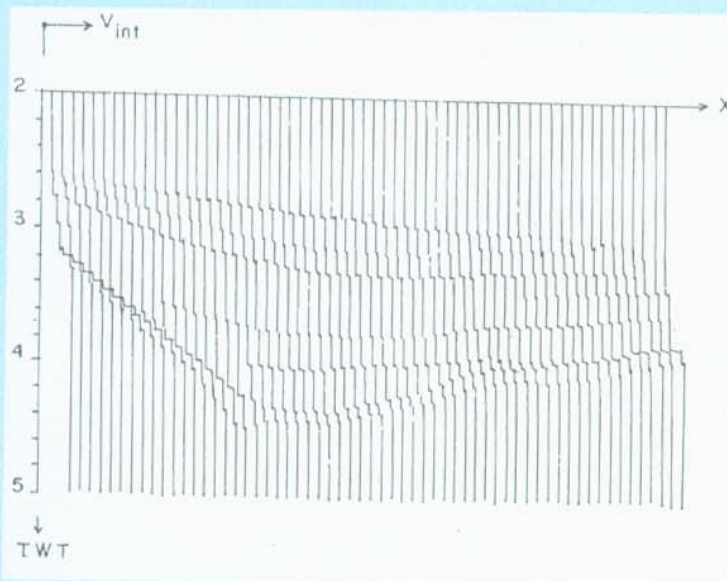
Data seismik adalah data amplitudo gelombang seismik sewaktu menjalar ke dalam lapisan-lapisan batuan bawah permukaan, data amplitudo ini perlu diubah menjadi data kecepatan. Apabila yang dimanfaatkan adalah amplitudo-amplitudo yang relatif kuat yang membentuk horizon seismik, maka akan diperoleh distribusi lateral dari kecepatan interval yang bentuknya kurang lebih seperti contoh pada Gambar 1.

Contoh yang diperlihatkan pada Gambar 1 masih dianggap tidak teliti dan kurang rinci. Untuk keperluan karakterisasi reservoir dibutuhkan variasi pada arah vertikal (sumbu waktu/kedalaman) yang lebih rinci dari pada itu. Semenjak 1976 (Becquey dkk., 1976 ; Lindseth, 1977) mulai diperkenalkan metode inversi seismik yang kemampuannya terus dikembangkan dari tahun ke tahun. Idealnya adalah: dari data seismik dapat diubah menjadi data kecepatan yang mendekati log sonik.

Dengan demikian inversi seismik ibarat mengebor sumur di setiap titik tembak pada lintasan

seismik dan melakukan perekaman gelombang sonik di situ.

Inversi seismik tidak hanya menghasilkan kurva-kurva yang menyerupai log sonik, inversi seismik juga mengubah kandungan informasi data seismik dari informasi yang berkaitan dengan bidang batas antar-lapisan menjadi informasi yang berkaitan dengan lapisan. Kandungan informasi yang berkaitan dengan lapisan ini yakni impedansi akustik (AI) dapat dihubungkan dengan porositas batuan reservoir. Karena AI merupakan perkalian antara densitas dengan kecepatan maka secara logika semakin besar AI, semakin rendah porositasnya. Hubungan yang lebih jelas dapat diperoleh dengan melakukan korelasi antara log porositas dan log densitas/sonik dalam interval reservoir dari suatu sumur pengeboran.



Gambar 1
Kecepatan interval di setiap 4 titik tembak pada suatu lintasan seismik (dari Lavergne dan Willm, 1976)

Makalah ini berusaha mengupas seluk beluk teori inversi seismik secara prinsipil agar dapat dijadikan dasar yang memadai bagi para praktisi yang ingin memanfaatkan impedansi akustik untuk karakterisasi reservoir migas. Diagram skematik dari inversi seismik diberikan pada Gambar 2.

II. INVERSI DATA SEISMIK

Inversi adalah kebalikan dari pemodelan numerik. Dalam seismik eksplorasi pemodelan numerik merupakan suatu usaha untuk menirukan proses alam yang menghasilkan *trace* seismik. Sehingga inversi berusaha mendapatkan keadaan alam yang menyebabkan proses tersebut.

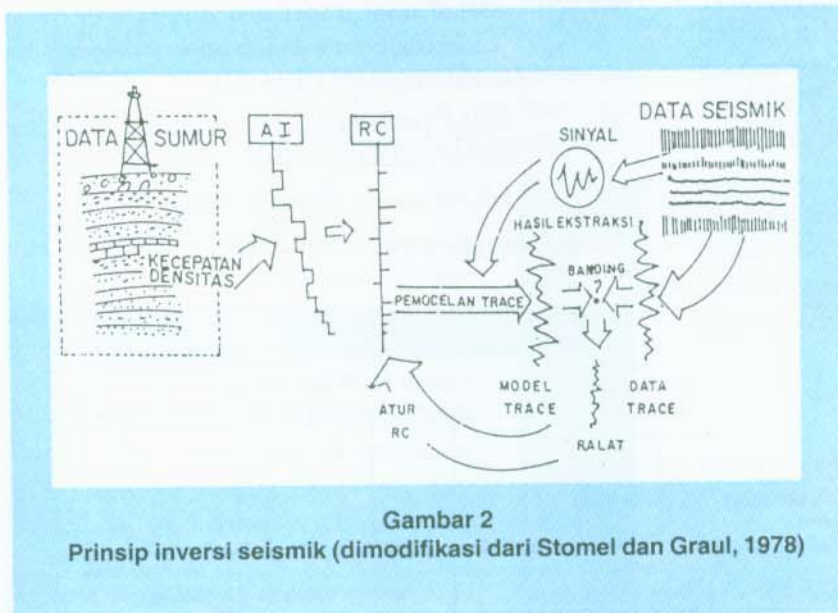
Pada Gambar 2 data geologi sumur yang diwakili oleh kecepatan dan densitas batuan diterjemahkan menjadi impedansi akustik (AI) yang darinya dapat dihitung deret koefisien refleksi (RC) yang mencerminkan perlapisan batuan bawah permukaan. Deret koefisien refleksi ini bila dikonvolusikan dengan sinyal seismik (*wavelet*) akan menghasilkan model *trace*, atau *trace* seismik yang tidak diperoleh dari pengukuran di lapangan akan tetapi hanya dengan melakukan perhitungan numerik.

Kebalikan dari proses pemodelan yang menghasilkan *trace* seismik dari AI (lihat lagi gambar 2), maka inversi dirancang untuk mendapatkan AI dari *trace* seismik. Dalam bentuk diagram kotak perbedaan prinsip antara keduanya dapat diterangkan sebagai berikut:

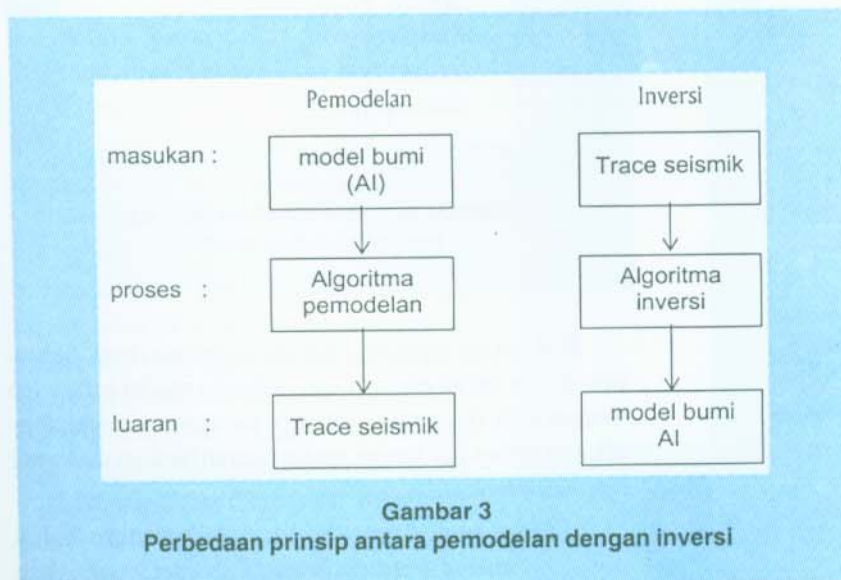
Bagian tengah (proses) dari diagram Gambar 3 merupakan suatu tahap yang rumit, kecuali bila dilakukan penyederhanaan-penyederhanaan yang banyak. Dalam hal pemodelan, maka teori tentang penjalaran gelombang seismik di dalam media bawah permukaan harus dirumuskan terlebih dahulu sebelum prosesnya diterjemahkan dalam bentuk instruksi-instruksi komputer yang kompleks dan terpadu yang disebut sebagai algoritma.

Karena inversi merupakan kebalikan dari pemodelan, maka pengetahuan tentang penjalaran gelombang seismik di dalam media bawah permukaan juga diperlukan sewaktu merumuskan algoritma inversi.

Pemahaman dekonvolusi tak dapat dilepaskan dari konsep inversi, karena dalam hal setelah disederhanakan *trace* seismik dapat dianggap sebagai konvolusi antara sinyal seismik (*wavelet*) dan koefisien refleksi dari perlapisan batuan di bawah permukaan kemudian ditambah *noise*. Dekonvolusi adalah kebalikan dari konvolusi, dengan perkataan lain: usaha untuk meniadakan konvolusi. Koefisien refleksi yang seolah-olah tersembunyi di dalam *trace* seismik, menjadi tampak jelas



Gambar 2
Prinsip inversi seismik (dimodifikasi dari Stomel dan Graul, 1978)



Gambar 3
Perbedaan prinsip antara pemodelan dengan inversi

setelah dilakukan dekonvolusi. Hasil dekonvolusi ini berupa paku-paku (*spikes*) yang mencerminkan kontras kecepatan dan densitas di setiap bidang batas antarlapisan bawah permukaan.

Antara tinggi paku (*spike size*) dengan nilai impedansi ada korelasi kuat yang umumnya dinyatakan oleh persamaan rekursif sbb.:

$$Z_{i+1} = Z_i \left[\frac{1+r_i}{1-r_i} \right] \dots\dots\dots(2.1)$$

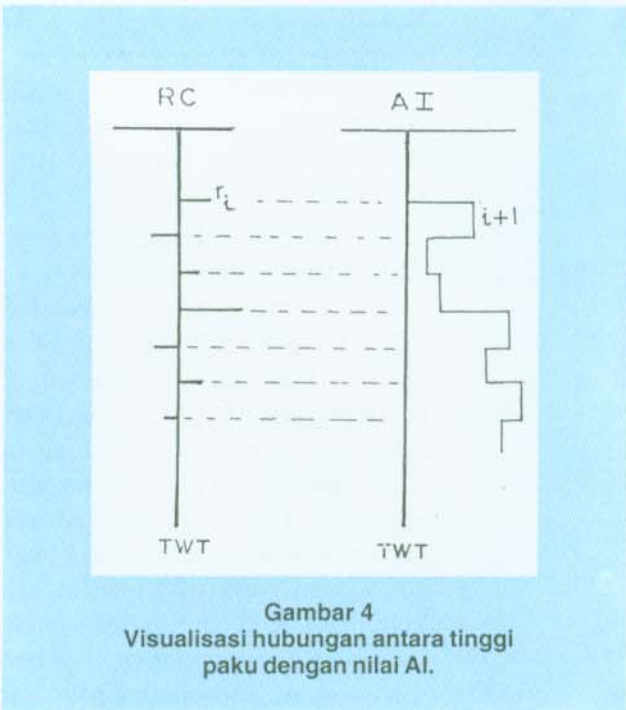
Dalam hal ini Z_i adalah nilai impedansi akustik pada lapisan ke- i , sementara r_i adalah besarnya nilai koefisien refleksi pada lapisan ke- i , atau tinggi paku pada lapisan ke- i .

Perumusan (2.1) tersebut di atas memungkinkan dihitungnya nilai AI pada suatu lapisan bertolak dari nilai AI dari lapisan di atasnya dan nilai koefisien refleksi (tinggi paku) antara kedua lapisan tersebut. Visualisasi persamaan rekursif (2.1) dapat dilihat pada gambar di bawah ini (Gambar 4).

Berikut ini akan diutarakan prinsip-prinsip teknis/ilmiah dari beberapa metode inversi seismik yang umum dipakai di industri saat ini yakni inversi berbasis model, inversi *sparte spike* berkendala dan inversi dengan dekonvolusi pita terbatas.

A. Inversi Berbasis Model

Inversi berbasis model (*model based inversion*) sering disebut juga dengan nama "*blocky inversion*".



Impedansi akustik (AI) pada dasarnya adalah kumpulan dari blok-blok yang saling menumpuk

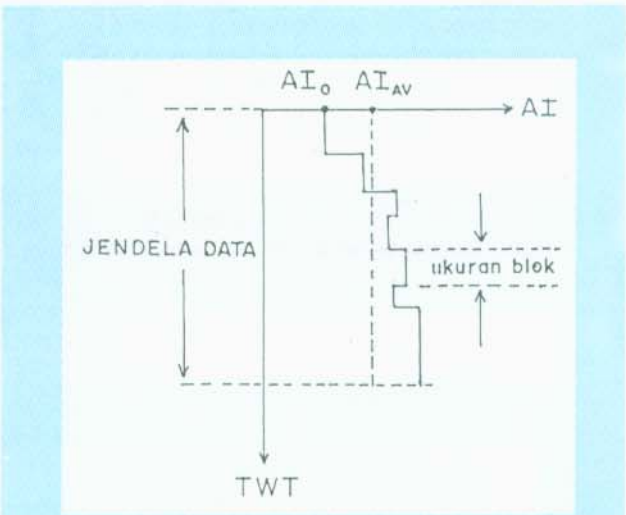
Pada prinsipnya inversi ini bertolak dari model awal yang berasal dari beberapa horizon seismik yang sudah ditentukan, kemudian setelah itu membuat penyempurnaan/penghalusan secara iteratif, setapak demi setapak. Proses iterasinya berdasar pada rumus sederhana sebagai berikut:

$$AI(i) = AI_0(i) \pm \alpha AI_{av}(i) \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan ketentuan:

- $AI_0(i)$ adalah nilai impedansi akustik awal pada interval/lapisan ke- i .
- $AI_{av}(i)$ adalah nilai impedansi rata-rata di dalam jendela data yang dipilih (inversi dioperasikan di dalam jendela data ini).
- α adalah penambahan nilai impedansi setiap kali iterasi, nilainya berkisar antara 2% - 25%.
- i adalah nomor interval atau nomor lapisan.

Untuk lebih jelasnya perhatikanlah gambar berikut ini:



Gambar 5
Visualisasi prinsip matematika dari inversi berbasis model

Hal yang penting untuk diperhatikan dalam pemilihan parameter inversi berbasis model ini adalah ukuran blok (*block size*). Bila α mengatur penambahan nilai AI setiap kali iterasi, maka ukuran blok ini mengatur resolusi vertikal.

Ukuran blok dapat dipilih demikian tipis/halus, misalnya setebal 4 milidetik atau 8 milidetik pada skala

waktu seismik (TWT). Apabila interval sampling data seismik adalah 2 milidetik, maka 4 milidetik identik dengan 2 sampel saja. Dengan begini proses *fitting* (pengepasan) dengan AI standar dapat dilaksanakan secara saksama.

Tepat di sepanjang kedalaman sumur ada AI sumur, maka dari sini dapat diturunkan koefisien refleksi (RC) dari sumur. RC ini kemudian dikonvolusikan dengan sinyal seismik (hasil ekstraksi) untuk membentuk model *trace* seismik. Selain AI sumur, di situ ada *trace* seismik. *Trace* ini dipakai sebagai data *trace* (lihat Gambar 2).

Langkah selanjutnya adalah membandingkan model *trace* dengan data *trace*, apabila ralatnya masih besar maka model impedansi (AI) diubah lagi mengikuti formulasi (2.1).

Diagram alir dari algoritma inversi berbasis model diperlihatkan pada Gambar 6. Diagram yang lebih rinci dari inversi jenis ini dapat dilihat pada Hidayat (2003).

B. Constraint Sparse Spike Inversion (CSSI)

C.S.S.I. adalah singkatan dari *Constraint Sparse Spike Inversion* sering juga disebut sebagai *broad-band inversion*. Postulat yang diberlakukan dalam pendekatan ini adalah bahwa koefisien refleksi (RC) bentuknya tak beraturan dan jaraknya jarang (*sparse*), dan karena RC ini berwujud sebagai suatu deret yang terdiri atas paku (*spikes*) maka RC dikatakan *sparse spike*.

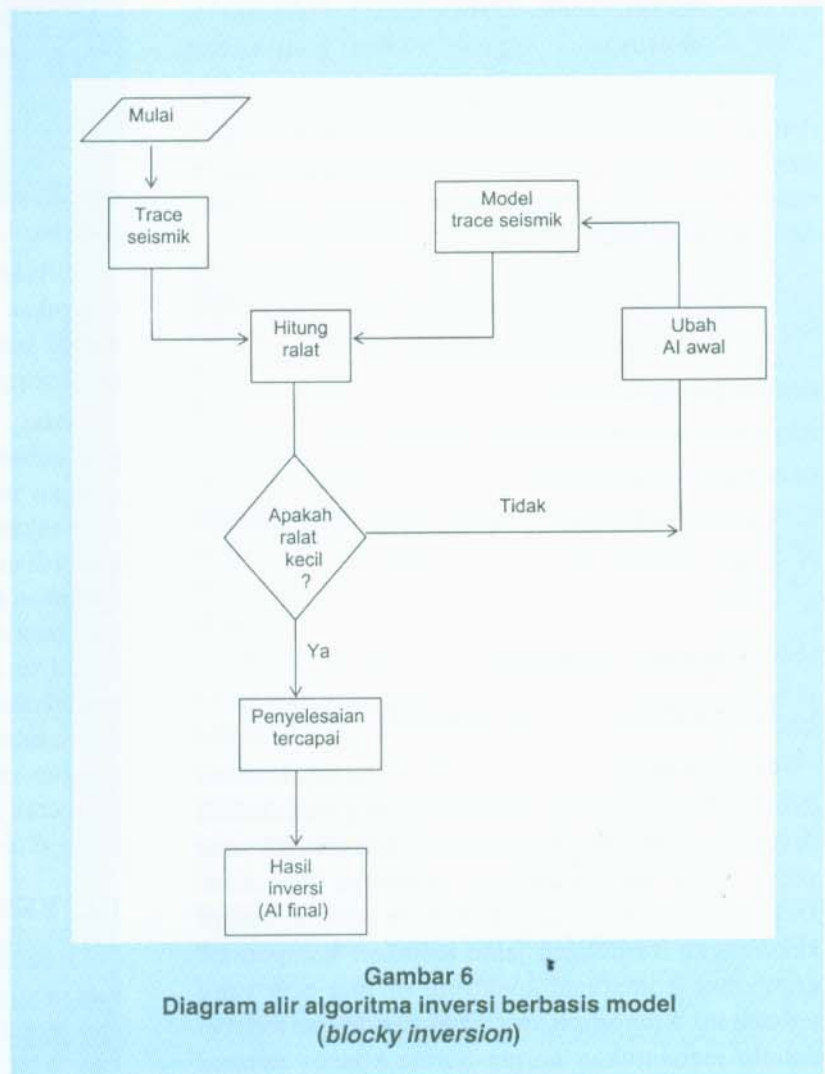
Batas litologi yang kontras akan diwakili oleh paku-paku yang tinggi, sementara paku-paku yang rendah menyatakan perlapisan yang kontrasnya lebih lemah. Bising (*noise*) termasuk juga di antara paku-paku yang rendah ini. Agar distribusi paku ini mempunyai arti geologis maka diperlukan kendala (*constraint*).

Salah satu proses numerik yang secara efektif mampu menghasilkan paku-paku yang jarang (*sparse spikes*) adalah dekonvolusi dengan norma L1. Dekonvolusi jenis ini dapat menangani spektrum koefisien refleksi secara penuh (*full bandwidth*). Claerbout menamai dekonvolusi jenis ini dengan kata *parsimonious* (Gray & Claerbout, 1979),

sementara dengan prinsip yang mirip, Wiggins (1977) memakai kata *minimum entropy*. Selain itu Stone (1976, 1977, 1979) juga mengembangkan metode dekonvolusi khusus yang berdasar pada estimasi entropi spektral maksimum yang di dalamnya mengandung komponen *sparse spike*. Dari ilustrasi Gambar 2 dapat ditarik kesimpulan bahwa semua metode dekonvolusi ini pada intinya bertujuan untuk mengatur RC agar ralat yang ada antara model *trace* dan data *trace* kecil sekali adanya atau berada di bawah batas nilai ambang yang ditetapkan.

CSSI ini sendiri secara teoritis penuh dengan formula matematis dan statistik, oleh karena itu tidak akan dikupas secara lebih mendalam pada paper ini. Hanya saja perlu dicatat bahwa ada tiga parameter penting dalam penerapan CSSI. Ketiga parameter tersebut adalah:

1. Jumlah paku maksimum (*maximum number of spikes*).



Gambar 6
Diagram alir algoritma inversi berbasis model
(*blocky inversion*)

Secara teoretis jumlah paku maksimum adalah sesuai dengan jumlah sampel data seismik di dalam jendela data.

2. Nilai ambang pendeteksian paku (*spike detection threshold*).

Parameter ini mengatur penempatan *spike* menggunakan algoritma SMLA (*Single Most Likely Addition*) agar didapat *spike* dengan ketinggian dan posisi yang tepat.

3. Kejarangan (*sparsness*).

Kejarangan () didefinisikan sebagai banyaknya paku yang diharapkan muncul dibagi dengan jumlah paku maksimum (di dalam jendela data).

Nilai-nilai ekstrim dari adalah :

= 0 artinya tidak ada paku

= 1 artinya deret RC mempunyai populasi yang mengikuti hukum Gauss. Parameter ini sering diganti dengan densitas paku (*spike density*).

Pada saat proses perbandingan antara data *trace* dengan model *trace* yang kemudian diikuti dengan iterasi agar didapat ralat minimum, sebagai pengganti ralat Russell (1988) mendefinisikan fungsi obyektif yang akan diminimumkan menjadi sebagai berikut

$$0 = \sum_{k=1}^L \frac{r^2(k)}{R^2} + \sum_{k=1}^L \frac{n^2(k)}{N^2} - 2m \ln(\lambda) - 2(L-m) \ln(1-\lambda) \dots (2.2)$$

dengan ketentuan:

$r(k)$ = koefisien refleksi pada sampel ke-k

m = banyaknya refleksi

L = jumlah paku maksimum (di dalam jendela data)

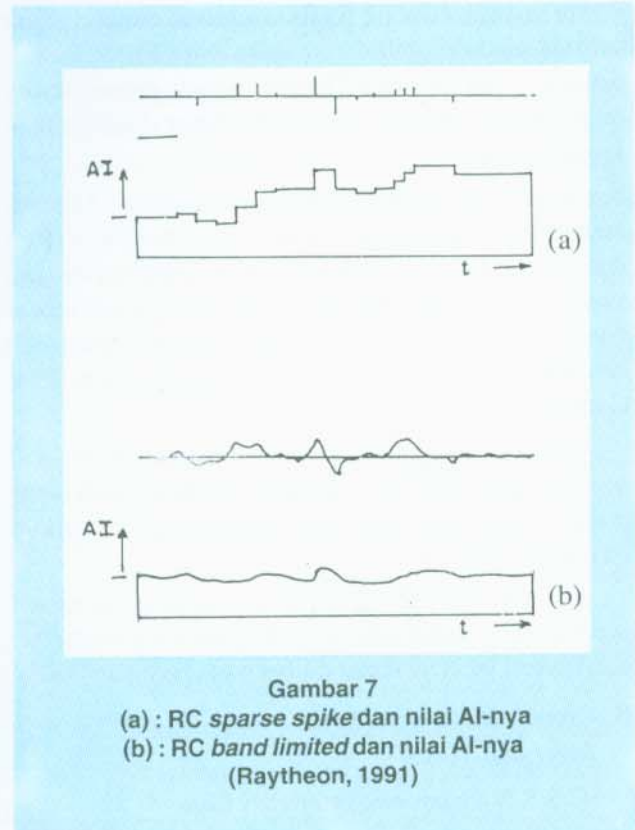
N = akar kuadrat dari varians *noise*

n = tinggi *noise* pada sampel ke-k

λ = kejarangan (*sparsness*)

C. Inversi dengan Dekonvolusi Pita Terbatas

Dekonvolusi pita terbatas (*band limited deconvolution*) tidak berarti langsung melakukan dekonvolusi bertolak dari spektrum data seismik yang secara alamiah memang lebarnya terbatas. Dekonvolusi jenis ini justru berusaha menutupi kekurangan itu dengan jalan memberi kompensasi komponen-komponen spektrum di luar pita yang terbatas itu. Kompensasinya dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan norma-norma khusus sebagai



ukuran untuk mendapatkan bentuk paku (*spikeness*) pada hasil dekonvolusinya.

Bila kompensasi kehilangan spektrum tersebut tidak dilakukan dengan benar, akibatnya paku yang didapat sangat jauh dari bentuk ideal dan hasil AI-nya tidak akan sempurna. Perhatikanlah Gambar 7.

Pusey (1990) memperkenalkan dekonvolusi paku pita terbatas (*band limited spikeness deconvolution*) dengan merancang *filter* prediksi kompleks yang dikenakan pada pita terbatas tersebut. Filter ini kemudian dipakai untuk memprediksi nilai-nilai spektrum di luar lebar pita frekuensi yang ada. Untuk itu dibuat ukuran bagi tingkat kepakuan yang diinginkan (*band limited spikeness measure*). Kelebihan dari pendekatan ini adalah bahwa tingkat kepakuannya tidak dipaksakan secara ideal-teoretis, akan tetapi ditentukan dengan melihat realitas yang ada di dalam data (bergerak di dalam pita spektrum di mana S/N masih dapat dipercaya).

III. EKSTRAKSI SINYAL

Bentuk sinyal seismik (*wavelet*) sangat mempengaruhi keberhasilan proses perbandingan antara model *trace* dan data *trace*. Hal ini disebabkan karena bagaimanapun presisinya RC, akan tetapi kalau

sinyalnya salah akan mengakibatkan kesalahan bentuk dan amplitudo model *trace*-nya. Oleh karena itu sinyal yang dikandung di dalam gelombang seismik harus dapat diekstraksi dengan benar. Proses ini dinamakan *wavelet extraction*.

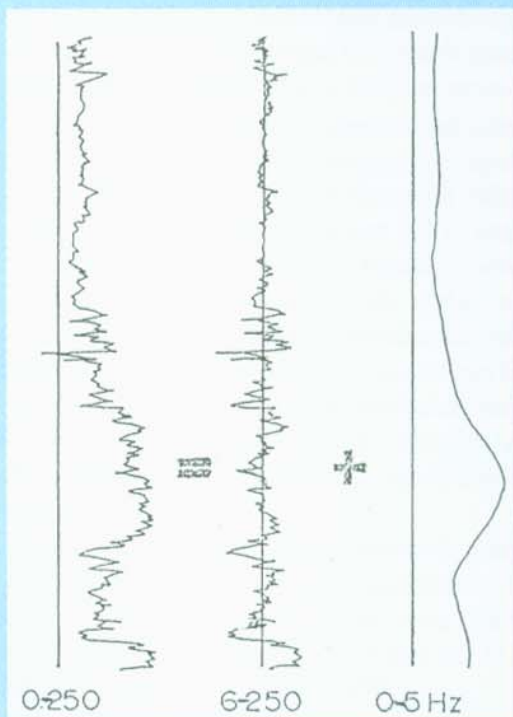
Ada 2 cara ekstraksi sinyal seismik (Prastianto, 1991):

1. Ekstraksi sinyal tanpa informasi sumur

Dalam keadaan seperti ini diberlakukan anggapan bahwa RC betul-betul acak (*random*) sehingga perkalian sesama spektrum amplitudo sinyal sama dengan perkalian sesama amplitudo *trace* seismik, sebagai akibatnya korelasi diri dari spektrum sinyal sama dengan korelasi diri dari spektrum *trace* seismik, sehingga akhirnya sampai kepada kesimpulan bahwa spektrum amplitudo sinyal sebanding dengan spektrum amplitudo dari *trace* seismik. Dari spektrum amplitudo ini bentuk sinyal dapat diperoleh dengan melakukan transformasi Fourier balik.

2. Ekstraksi sinyal dengan tersedianya data sumur

Dalam hal ini ada data densitas dan kecepatan di sumur tersebut, sehingga dapat dihitung AI sumur.



Gambar 8
Log sonik terdiri dari komponen frekuensi tinggi dan frekuensi rendah (dari Lindseth, 1979)

Dari AI sumur ini lalu diturunkan RC di sumur. RC di sumur ini ditransformasikan terlebih dahulu ke kawasan frekuensi dan hasilnya dipakai untuk membagi spektrum *trace* seismik yang melewati sumur. Untuk mendapatkan bentuk sinyal, maka dilakukan transformasi Fourier balik dari hasil pembagian spektrum ini

IV. KOMPONEN FREKUENSI RENDAH

Secara geologis kecepatan perambatan gelombang seismik bertambah dengan bertambahnya kedalaman. Oleh sebab itu log sonik selain berisi komponen-komponen frekuensi tinggi mengandung juga komponen frekuensi rendah (lihat Gambar 8), sementara *trace* seismik hanya mengandung komponen-komponen frekuensi yang di tengah (antara 10 – 100 Hz).

Setelah proses dekonvolusi dan rekursi yang dikupas pada subbab di muka dikerjakan, komponen frekuensi rendahnya masih belum ada, maka untuk menghasilkan AI yang benar, komponen frekuensi rendah ini ditambahkan belakangan dan diambilkan dari data AI sumur yang terdekat dengan lintasan seismik yang sedang diinversi. Data AI sumur adalah perkalian antara log densitas dengan kebalikan dari log sonik.

V. KESIMPULAN

Inversi seismik merupakan sarana yang ampuh untuk memperkirakan nilai porositas batuan di luar sumur pengeboran. Walaupun demikian perlu adanya data sumur (log sonik dan log densitas) untuk mengkalibrasi hasil inversi karena algoritma inversi seismik dapat menghasilkan lebih dari satu penyelesaian.

Syarat utama untuk dapat dilakukannya inversi seismik adalah bahwa data gelombang seismik yang akan di inversi harus terjaga amplitudonya (*preserved amplitude*) dari pengaruh-pengaruh yang merusak akibat proses yang berorientasi pada penampilan struktur.

Algoritma inversi seismik jenis berbasis model, CSSI dan dekonvolusi pita terbatas mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Algoritma inversi berbasis model baik dalam hal kurang sensitif terhadap *noise* akan tetapi hasil inversinya tidak begitu teliti dan sangat *blocky*. Algoritma CSSI baik dan teliti tetapi sangat sensitif terhadap *noise* sehingga dapat memunculkan AI semu yang secara geologis tidak mempunyai arti. Algoritma inversi dengan dekonvolusi pita terbatas menghasilkan AI yang jauh dari seharusnya bila pita tidak dapat diperlebar dengan baik.

KEPUSTAKAAN

1. Becquey, M., Lavergne, M dan Willm, C., 1976. Acoustic Impedance Log Computed from Seismic Traces, French Petroleum Institute, Paper pada 46th SEG Meeting, Houston.
2. Gray, R. J. dan Claerbout. J., 1979. Variable Norm Deconvolution, *disertasi* doktor, Universitas Stanford.
3. Hidayat, S., 2003. Estimasi Impedansi Akustik Menggunakan Metode Inversi Band Limited dan Sparse Spike, *Skripsi S 2* Geofisika, Program Pasca Sarjana UI.
4. Lavergne, M dan Willm, C., 1976. Inversion of seismograms and pseudo velocity logs, *Paper* pada 3th EAEG Meeting, Bergen.
5. Lindseth, R.O., 1979. Synthetic Sonic Logs-A Process for Stratigraphic Interpretation, *Geophysics*, Vol.44 No.1., hal 3-26.
6. Prastianto, T., 1999. Studi Komparasi Metode Inversi Seismik dan Penerapannya dalam Prediksi Litologi dan Heterogenitas Batuan di Daerah "TP", *Skripsi S 1* Fisika, FMIPA-UI, Depok.
7. Pusey, L. C., 1990. Band Limited Spikes Deconvolution, Chevron Oil Field Research Company.
8. Raytheon, Co., 1991. Seminar Notes on Understanding VSP
9. Russell, B. H., 1988. Introduction to Seismic Inversion Methods, S. E. G Continuing Education Short Course, Tulsa-Oklahoma
10. Stommel, H.E. dan Graul, J. M., 1978. Current trends in Geophysics, *Paper* pada 7th IPA Convention.
11. Stone, D. G., 1976. Robust wavelet estimation by structural deconvolution, *Paper* pada 46th SEG Meeting, Houston.
12. Stone, D. G., 1977. Estimation of reflection coefficients from seismic data, *Paper* pada 47th SEG Meeting, Calgary.
13. Stone, D. G., 1979. Decomposition of seismic traces, *Paper* pada 49th SEG Meeting, New Orleans.