

BANDWIDTH EXTENSION SEISMIK DENGAN METODE BERBASIS GABOR DECONVOLUTION UNTUK PENINGKATAN RESOLUSI SEISMIK PADA LAPANGAN PENOBSCOT

M.Irvan ^[1], Ruhul Firdaus, S.T., M.T. ^[1]

^[1] Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera

E-mail: mirvan1000@gmail.com

Abstrak : Semakin tinggi resolusi data seismik, semakin detail informasi yang dapat diekstrak untuk kebutuhan analisis dan karakteristik reservoir, analisis stratigrafi, perhitungan cadangan, hingga pemodelan statik. Ada beragam metode untuk meningkatkan resolusi data seismik namun banyak yang mengalami kesulitan memodelkan propagasi *wavelet* yang berubah seiring dengan waktu. Dekonvolusi non-stasioner diperlukan untuk mengatasi masalah ini. Penulis melakukan dua pendekatan dalam penelitian ini. Pertama, penulis melakukan dekomposisi spektral menjadi tiga rentang *band* frekuensi pada data seismik, kemudian dilakukan dekonvolusi menggunakan masing-masing *wavelet*-nya. *Wavelet* tahapan ini diestimasi secara statistik sehingga tidak membutuhkan data sumur. Proses *spectral whitening* ini dilakukan dengan sangat teliti dan berhati-hati agar tidak memunculkan artefak atau bahkan peningkatan energi dan *noise*. Hasil optimal memberikan peningkatan hingga 1.5x dari *bandwidth* awal tanpa terjadi peningkatan *noise* yang signifikan. Pendekatan kedua adalah dengan menggunakan teknik dekonvolusi non-stasioner yang dapat memodelkan propagasi *wavelet* murni berdasarkan kondisi data setiap *trace*. Teknik yang penulis gunakan disebut dekonvolusi Gabor non-stasioner. Teknik ini telah berhasil meningkatkan *bandwidth* seismik lebih baik dari metode pertama, dikatakan lebih baik karena peningkatan mencapai 2x dari *bandwidth* awal dan yang terpenting adalah seluruh analisis murni berdasarkan data. Pelebaran terjadi pada dua sisi baik di frekuensi tinggi maupun rendah dan terkonfirmasi dengan seismik sintetik di sekitar dua sumur yang tersedia (L-30 dan B-41). Akibat pelebaran *bandwidth* ini, resolusi *temporal* seismik meningkat dari 45.32 m menjadi 22.15 m yang dihitung menggunakan frekuensi tengah. Dengan demikian, dekonvolusi Gabor non-stasioner terbukti dapat meningkatkan resolusi data seismik dengan memanfaatkan pemodelan propagasi *wavelet* yang adaptif dan lebih menghargai data.

Kata kunci : Resolusi, dekonvolusi non-stasioner, dekonvolusi Gabor, propagasi *wavelet*, *bandwidth*.

Abstract : *The higher the resolution of the seismic data, the more detailed information that can be extracted for the needs of reservoir analysis and characteristics, stratigraphic analysis, reserve calculations, to static modeling. There are various methods for increasing the resolution of seismic data but many have difficulty modeling propagation wavelet that changes over time. Non-stationary deconvolution is needed to solve this problem. The author uses two approaches in this research. First, the authors performed a spectral decomposition into three ranges band frequency in the seismic data, then carried out a deconvolution using each wavelet. The wavelet of this stage is statistically estimated so that it does not require well data. This process spectral whitening is carried out with great care and care so as not to create artifacts or even increase energy and noise. Optimal results provide up to a 1.5x increase in bandwidth initial without increase in noise a significant. The second approach is to use a non-stationary deconvolution technique that can model propagation wavelet pure based on the data conditions of each trace. The technique I use is called non-stationary Gabor deconvolution. This technique has succeeded in increasing the bandwidth seismic better than the first method, it is said to be better because the increase is up to 2x the bandwidth initial and most importantly the whole analysis is purely based on data. Widening occurred on both sides at both high and low frequencies and was confirmed by synthetic seismic around the two available wells (L-30 and B-41). As a result of widening bandwidth this, the resolution temporal seismic increased from 45.32 m to 22.15 m which was calculated using the center frequency. Thus, non-stationary Gabor deconvolution has been shown to improve seismic data resolution by utilizing propagation modeling wavelet adaptive and respect for data.*

.
.

Keywords : *Resolution, non-stationary deconvolution, Gabor deconvolution, propagation wavelet, bandwidth.*

I. PENDAHULUAN

Dalam eksploitasi minyak dan gas bumi pada masa sekarang ini mengalami peningkatan target eksplorasi dari reservoir yang tebal menjadi reservoir tipis yang belum terdeteksi. Dengan target reservoir yang telah berubah menuntut teknik-teknik baru agar bisa mendeteksi lapisan reservoir yang tipis dengan cara meningkatkan resolusi pada data seismik.

Resolusi data seismik dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya efek pelemahan sinyal yang disebabkan oleh efek *lowpass filter* bumi, adanya pengaruh geologi yang berbeda-beda membuat respon dan energi yang tidak konsisten, sehingga sinyal pada data seismik bersifat *non-stationary*. Sifat *non-stationary* pada data seismik ini menyebabkan interpretasi menggunakan amplitudo seismik akan memberikan suatu masalah bagi seorang interpreter karena reflektor data seismik terlihat kabur sehingga akan memberi keraguan dalam penentuan batas-batas stratigrafi dan hasil pemetaan reservoir.

Masalah utama dalam interpretasi seismik yaitu sempitnya *bandwidth wavelet* yang mempengaruhi resolusi data seismik. Pengaruh *bandwidth wavelet* tersebut berhubungan dengan kemampuan suatu gelombang untuk memisahkan 2 reflektor yang berbeda, membuat adanya koefisien refleksi yang tersamarkan akibat *bandwidth RC* yang lebih lebar. Salah satu metode untuk meningkatkan resolusi pada data seismik dengan melakukan dekonvolusi. Dekonvolusi adalah suatu metode konvensional dalam proses menghilangkan efek *wavelet* sehingga akan meningkatkan resolusi temporal pada data seismik. Asumsi yang digunakan pada proses dekonvolusi konvensional ini menganggap bahwa *wavelet* yang ada adalah *stationary* hal ini tidak sesuai dengan keadaan data seismik yang *non-stationary* sehingga membuat ketidaktepatan dalam membuat *invers* filter dari *wavelet* yang hasilnya kurang representatif.

Untuk mengatasi masalah tersebut Gary F. Magrave dan Michael P. Lamoureux (2001) mengembang metode dekonvolusi Wiener dengan cara menambahkan faktor atenuasi pada proses dekonvolusi untuk mengkompensasi faktor *non-stationary* pada data seismik yang disebabkan oleh efek filter bumi. Dengan menggunakan metode ini, maka efek filter bumi tersebut dapat ditangkap dan dihilangkan dengan cara melakukan transformasi Gabor pada data seismik menggunakan prinsip dekomposisi spektral. Proses dekomposisi spektral ini digunakan untuk melakukan *windowing* pada data seismik lalu dilakukan transformasi Fourier untuk menghasilkan spektrum Gabor yang terlokalkan. Jika spektrum lokal ini dijumlahkan maka hasilnya berupa dekomposisi waktu-frekuensi dari seismik, dengan dilakukan proses *windowing* menggunakan Gaussian *window* ini diharapkan hasil yang didapatkan lebih baik dalam

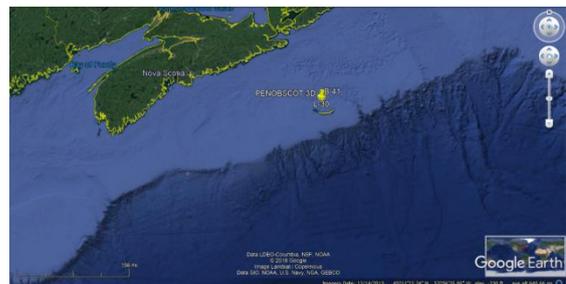
melakukan pembuatan *invers* filter dari *wavelet* agar mendapatkan *bandwidth* yang lebih lebar dan meningkatkan resolusi temporal data seismik.

II. TUJUAN PENELITIAN

1. Mengaplikasikan dekonvolusi *non-stationary* dengan teknik *bandpass* untuk meningkatkan *bandwidth* data seismik.
2. Mengaplikasikan metode dekonvolusi Gabor pada data sintetik dan *real* untuk meningkatkan *bandwidth* data seismik.
3. Membandingkan hasil analisis resolusi data seismik *real* setelah dan sebelum dilakukan dekonvolusi Gabor yang divalidasi dengan data sumur.

III. LOKASI PENELITIAN

Lokasi penelitian tugas akhir ini berada di Negara Kanada, tepatnya di offshore Nova Scotia di lapangan Penobscot, dengan koordinat 44°07'46" N / 60°06'00" W. Pada daerah ini dilakukan survei dan akuisisi pada tahun 1992.



Lapangan Penobscot berada dibagian atas cekungan Scotia, pada lapangan ini setengah cekungannya berada di *continental shelf* dan sebagian lagi berada di *continental slope*. Cekungan Scotia terbentuk pada daerah *passive continental margin* yang berkembang setelah periode *rifting* saat Amerika Utara terpisah dengan Afrika selama periode pecahnya Pangea.

IV. METODE

SEISMIK

Seismic trace didapatkan dari hasil konvolusi (*) antara *wavelet* dengan koefisien refleksi (RC) ditambah dengan *noise*. Dalam bentuk persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$s(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (1)$$

Dimana : $s(t)$ = Trace seismik

$$w(t) = \text{Wavelet}$$

$$r(t) = \text{Koefisien refleksi}$$

$$n(t) = \text{Noise}$$

RESOLUSI SEISMIK

Resolusi merupakan jarak minimum gelombang seismik untuk memisahkan dua objek yang berdekatan hal ini

berkaitan dengan terjadinya interferensi gelombang seismik. Resolusi seismik terbagi atas dua yaitu resolusi vertikal dan resolusi horizontal, dimana pada penelitian ini lebih ditekankan pada resolusi vertikal.

Resolusi vertikal merupakan jarak minimum gelombang seismik untuk memisahkan dua objek yang berdekatan, kemampuan memisahkan dua obyek atau reflektor batuan tersebut tergantung pada ketebalan dan panjang gelombang. Ketebalan minimum yang masih bisa dibedakan disebut dengan ketebalan *tuning* (*tuning thickness*). Besarnya ketebalan minimum suatu objek untuk dapat memberikan refleksi sendiri bervariasi mulai dari $1/8\lambda$ sampai $1/30\lambda$, hanya saja karena keterdapatannya *noise* pada data seismik membuat besarnya ketebalan *tuning* yang dapat dipisahkan adalah $1/4\lambda$, dimana λ panjang gelombang seismik yang bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2)$$

Dimana: v = Kecepatan gelombang seismik

f = Frekuensi

DEKOMPOSISI SPEKTRAL

Dekomposisi spektral adalah suatu metode pemrosesan sinyal seismik berbasis analisis spektrum waktu-frekuensi, hal ini disebabkan oleh data seismik yang bersifat *non-stationary* atau frekuensinya berubah terhadap waktu yang diakibatkan oleh absorpsi gelombang oleh medium yang dilalui. Dalam melakukan analisis waktu-frekuensi pada data seismik, perlu dilakukan transformasi data seismik dari domain waktu menjadi domain frekuensi dengan cara melakukan *Fast Fourier Transform* (FFT).

Dekomposisi spektral ini dilakukan karena suatu refleksi dari lapisan tipis mempunyai karakteristik tertentu dalam domain frekuensi yang karakteristik tersebut biasanya tidak dapat terlihat dalam domain waktu.

TRANSFORMASI GABOR

Transformasi Gabor ini mengadopsi prinsip *Short Time Fourier Transform* (STFT) dengan menggunakan *window* dengan lebar yang konstan yang digeser-geser terhadap waktu. Transformasi Gabor merupakan transformasi Fourier pada sinyal seismik yang telah dilakukan dekomposisi spektral dengan menggunakan *window* Gaussian yang membuat sinyal seismik menjadi terlokalkan.

Secara matematis transformasi Gabor dapat diekspresikan sebagai berikut (Mertins, 1999):

$$V_g s(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) g(t - \tau) e^{-2\pi i f t} dt \quad (3)$$

Dimana $s(t)$ adalah sinyal dan $g(t)$ adalah *window* analisis Gabor dengan τ adalah lokasi pusat *window*. Sinyal yang telah ditransformasi ke domain frekuensi dapat dikembalikan ke dalam domain waktu dengan melakukan *invers* transformasi Gabor yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$s(t) = \iint_{-\infty}^{\infty} V_g s(\tau, f) \gamma(t - \tau) e^{2\pi i f t} df dt \quad (4)$$

DEKONVOLUSI GABOR

Berawal dari sifat *non-stationary* pada data seismik yang selalu berubah terhadap waktu, dengan anggapan bawah permukaan bumi bukanlah medium elastis sempurna dan gelombang seismik mengalami pelemahan saat menjalar dibawah permukaan. Pelemahan gelombang seismik ini terjadi karena penyerapan gelombang oleh setiap medium yang dilaluinya ditandai dengan bentuk *wavelet* yang berubah. Model yang paling sederhana dari atenuasi ini adalah berupa model Q-konstan dari Kjartansson (1979), dimana Q-konstan mengacu pada Q yang tidak bergantung pada frekuensi melainkan bergantung pada ruang dan waktu tempuh. Margrave (2001) menggunakan Q-konstan sebagai fungsi atenuasi yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\alpha(\tau, f) = e^{-\frac{\pi f \tau}{Q} + iH\left(\frac{\pi f \tau}{Q}\right)} \quad (5)$$

Dimana Q adalah faktor kualitas dari medium atenuasi, dan H adalah Transformasi Hilbert.

Dekonvolusi Gabor merupakan perluasan dari proses dekonvolusi Wiener yang dilakukan dalam domain frekuensi pada data yang telah dilakukan transformasi Gabor. Pada dekonvolusi Gabor ini mengkompensasi faktor atenuasi pada data seismik yang disebabkan oleh efek filter bumi, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V_g s(\tau, f) \approx W(f) \alpha_Q(\tau, f) V_g r(\tau, f) \quad (6)$$

Dimana :

$V_g s(\tau, f)$ = Sinyal hasil transformasi Gabor

$W(f)$ = *Wavelet* sumber dalam domain frekuensi

$\alpha_Q(\tau, f)$ = Faktor atenuasi pada sinyal

$V_g r(\tau, f)$ = Reflektivitas Gabor

Dari persamaan diatas, dapat disederhana agar mendapatkan koefisien refleksi dari sinyal seismik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_g r(\tau, f) = V_g s(\tau, f) D(\tau, f) \quad (7)$$

Dimana,

$$W(f) \alpha_Q(\tau, f) \approx |V_g s(\tau, f)|_{sm} \quad (8)$$

Dengan $|V_g s(\tau, f)|_{sm}$ adalah hasil *smoothing* sinyal hasil transformasi Gabor yang dilakukan untuk estimasi dari propagasi *wavelet*, *smoothing* bisa dilakukan dengan konvolusi antara hasil transformasi gabor dengan 2D *boxcar*, *gaussians*, *triangles* dan *hyperbolic smoothing*.

Dengan demikian, spektrum amplitudo dari operator dekonvolusi menjadi:

$$D(\tau, f) = \left(|V_g s(\tau, f)|_{sm} + \mu A_{max} \right)^{-1} \quad (9)$$

Dimana A_{max} adalah nilai maksimum dari $|V_g s(\tau, f)|_{sm}$ dan μ adalah konstanta stabilisasi dengan dimensi yang kecil untuk perhitungan logaritmik yang valid.

Informasi fasa minimum pada *wavelet* yang dihitung dari spektrum amplitudo untuk operator dekonvolusi dengan bantuan transformasi Hilbert, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$D(\tau, f) = \frac{e^{-iH(\ln|D(\tau, f)|)}}{|V_g s(\tau, f)|_{sm} + \mu A_{max}} \quad (10)$$

Hasil yang didapatkan dalam dekonvolusi Gabor adalah berupa koefisien refleksi Gabor yang masih dalam domain frekuensi, untuk mengembalikannya ke dalam domain waktu perlu dilakukan inversi transformasi Gabor dengan menggunakan persamaan 4.

SMOOTHING HYPERBOLIC

Smoothing hyperbolic mengacu pada persamaan 5 dengan menganggap model Q-konstan yang merepresentasikan faktor atenuasi dalam bentuk τf konstan, dengan membagi peta waktu-frekuensi menjadi beberapa garis *hyperbolic* dan menghitung rata-rata dari masing-masing garis *hyperbolic* yang merepresentasikan amplitudo yang hilang akibat atenuasi. Secara garis besar efek atenuasi diperoleh dengan mengisi masing-masing garis *hyperbolic* dengan rata-rata dari peta waktu-frekuensi yang diinterpolasi. Dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$a_n = \text{mean}_{\tau f} (|V_g s(\tau, f)|_{I_n}(\tau, f)) \quad (11)$$

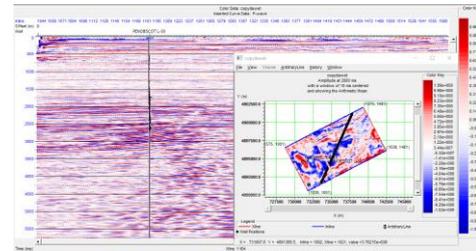
$$|\alpha(\tau, f)|_{est} = \sum_{n=1}^N a_n I_n(\tau, f) \quad (12)$$

Dimana $I_n(\tau, f)$ merupakan indikator fungsi dari n^{th} garis *hyperbolic* misalnya I_n akan bernilai nol kecuali pada titik garis *hyperbolic* n^{th} . N merupakan jumlah total dari garis-garis *hyperbolic*, sehingga didapatkan estimasi dari $|\alpha(\tau, f)|$. Untuk mengestimasi $|W(f)|$ dapat didekati dengan menghilangkan estimasi atenuasi dan menjalankan sedikit *smoothing* kearah frekuensi, hal ini sesuai dengan melakukan konvolusi *smoothing b(f)*.

V. DATA DAN PENGOLAHAN

Data Seismik

Pada daerah penelitian di lapangan Penobscot, Kanada terdapat data seismik 3D *prestack time migration* (PSTM) dalam bentuk CDP *gather* yang sudah dilakukan proses NMO. Data ini direkam selama 6 detik, tetapi data diatas 3 detik (sekitar 5 km) mengalami penurunan kualitas. Pada data penelitian ini mempunyai jumlah inline 601 (1000-1600) dengan spasi 12.5 m dan xline 482 (1000-1481) dengan spasi 25 m. Pada penelitian ini dilakukan pada data *arbitrary line* yang memotong sumur yang dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 5. 1 Pembuatan *arbitrary line* dari data 3D seismik yang memotong struktur.

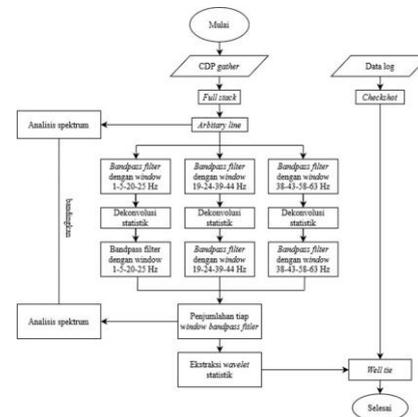
Data Sumur

Pada daerah penelitian ini terdapat 2 sumur yaitu sumur B-41 dan sumur L-30. ketersediaan data log pada tiap sumur dirangkum pada table 5.1.

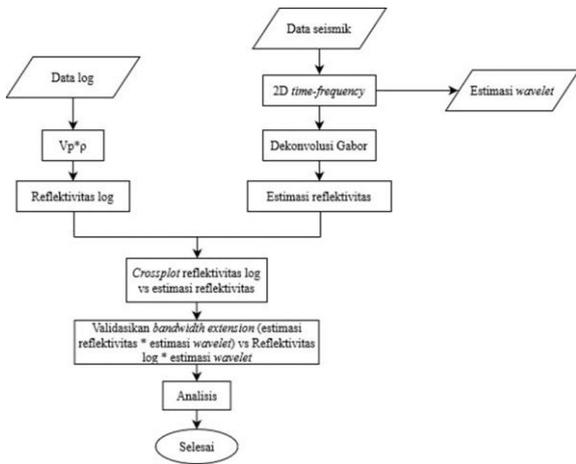
Tabel 5. 1 Ketersediaan data log masing-masing sumur.

data log	B-41	L-30
1	Depth	√
2	CALD	√
3	CALD	√
4	DHRO	√
5	DT	√
6	GRD	√
7	GRS	√
8	ILD	√
9	ILM	√
10	LLS	√
11	NPHLS	√
12	NPHSS	√
13	RHOBH	√
14	SP	√

Diagram Alir Penelitian



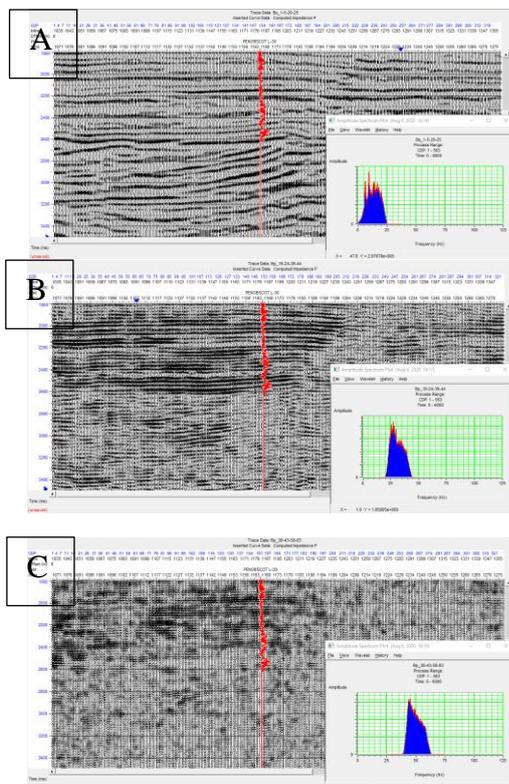
Gambar 5. 2 Diagram alir *bandwidth extension* seismik.



Gambar 5. 3 Diagram alir penelitian.

Bandpass filter

bandpass filter merupakan proses penyaringan frekuensi pada data seismik tergantung rentang frekuensi yang akan dipilih. *Bandpass* filter ini hanya dapat meloloskan rentang frekuensi diatas batas *low cut* dan dibawah batas frekuensi *high cut*. Secara tidak langsung dapat membagi spektrum amplitudo menjadi beberapa bagian sesuai dengan rentang frekuensi yang akan dipilih. Pada tahapan ini sangat perlu dilakukannya pemilihan parameter *bandpass* filter yang baik agar tidak ada data yang hilang. Hal ini dilakukan karena supaya informasi lokal yang tidak dapat terlihat pada rentang frekuensi *wavelet*, dapat memperlihatkan informasi lapisan-lapisan yang lebih detail serta dapat melihat lapisan yang tipis pada data seismik.



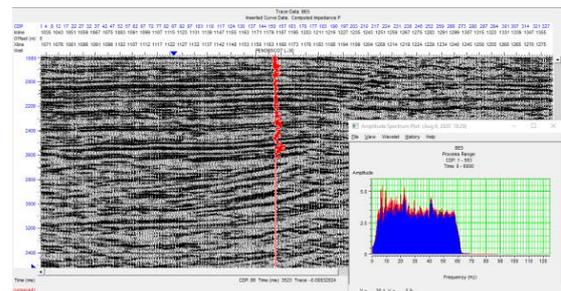
Gambar 5. 4 (A) Tampilan *bandpass* filter 1-5-20-25 Hz, (B) 19-24-39-44 Hz, (C) 38-43-56-63 Hz pada *arbitrary line* yang terdapat sumur L-30.

Dekonvolusi dan Bandpass Filter

Data hasil *windowing* dengan menggunakan *bandpass* filter menjadi beberapa bagian, selanjutnya dilakukan tahapan dekonvolusi. Tahapan dekonvolusi ini digunakan untuk mengompres *wavelet* bahkan menghilangkan efek *wavelet* pada data seismik. Untuk mempertahankan spektrum amplitudo seismik hasil dekonvolusi tidak mengalami peningkatan bahkan mirip dengan bentuk spektrum seismik sebelum dilakukan dekonvolusi, maka perlu dilakukan *bandpass* filter kembali dengan rentang frekuensi yang sama dengan rentang frekuensi hasil *windowing*.

Penjumlahan window bandpass filter dan Analisis Spektrum

Pada tahapan ini dilakukan penjumlahan kembali masing-masing *windowing* pada *arbitrary line* diurutkan sesuai urutan frekuensi hasil *bandpass* filter. Selanjutnya tahapan analisis spektrum amplitudo ini dilakukan untuk melihat apakah terjadi perluasan *bandwidth* dari data seismik serta dilakukan validasi dengan informasi sumur.



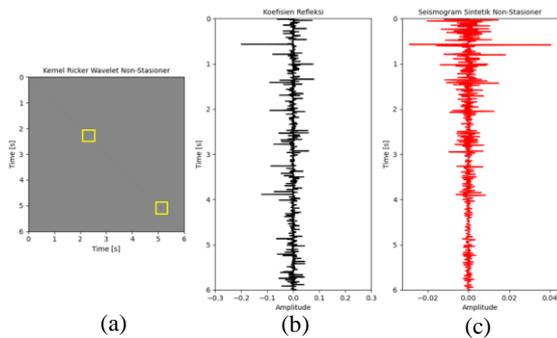
Gambar 5. 5 Hasil data *arbitrary line* setelah dilakukan dekonvolusi.

Well to Seismic Tie

Untuk melakukan hasil analisis dan validasi data seismik hasil *bandwidth extension* pada data sumur, maka dibutuhkan data sumur yang sudah dilakukan pengikatan data sumur dengan data seismik yang disebut dengan *well to seismic tie*.

Bandwidth Extension Seismik Menggunakan Metode Dekonvolusi Gabor

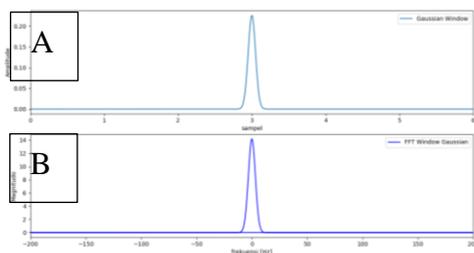
Untuk menguji algoritma dekonvolusi Gabor, dilakukan uji coba dengan menggunakan data sintetik *non-stationary* dengan fasa minimum seperti gambar dibawah.



Gambar 5.6 (a) Kernel *wavelet non-stationary*, (b) dilakukan perkalian matriks dengan koefisien refleksi *random*, (c) sehingga menghasilkan seismik sintetik *non-stationary*.

Pembuatan *Window Gaussian*

Window Gaussian ini dibuat untuk melakukan proses pemotongan *trace* seismik menjadi beberapa bagian, proses *windowing* ini dilakukan dengan menggeser *window Gaussian* pada *trace* seismik dengan *increment* tertentu lalu dilakukan *multiply* antara *window Gaussian* dengan *trace* seismik sehingga akan menghasilkan *trace* seismik yang terlokalkan.

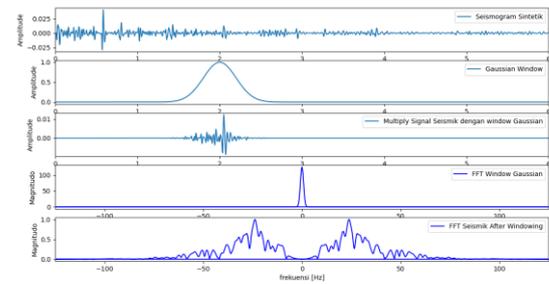


Gambar 5.7 (a) *Window Gaussian* domain waktu, (b) domain frekuensi.

Dari gambar diatas bisa dilihat bahwa *window Gaussian* memiliki beberapa kelebihan diantaranya hasil transformasi *Fourier* dari *window Gaussian* akan membentuk *Gaussian* juga, serta amplitudonya terkonsentrasi dipuncak, jika masing-masing *window Gaussian* dijumlahkan kembali tidak mengalami perubahan drastis karena bentuk *window* yang semakin keujung akan menghalus. Perlu dilakukan pemilihan parameter lebar *window* dan *increment* yang cocok dengan *trace* seismik karena berhubungan langsung pada resolusi data yang dihasilkan.

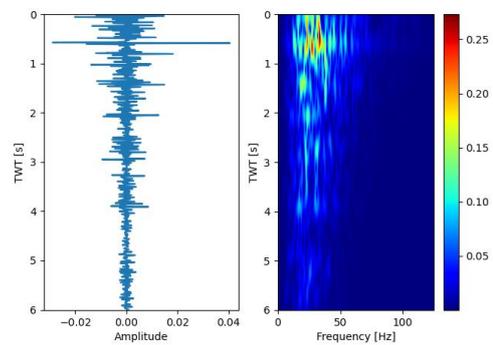
Transformasi Gabor

Transformasi Gabor adalah tahapan dekomposisi *signal* menjadi beberapa bagian dengan menggunakan *window Gaussian* dengan lebar *window* dan *increment* sesuai keadaan data seismik. Pada kasus ini dilakukan uji coba dengan *window* sebesar 0.2 s dan *increment* 0.05 s. Hasil dekomposisi *signal* yang sudah terlokalkan, selanjutnya dilakukan transformasi *Fourier* pada masing-masing *trace* seismik yang sudah terlokalkan.



Gambar 5.8 Tampilan hasil *multiply window Gaussian* dengan *trace* seismik *non-stationary* serta hasil transformasi *Fourier trace* yang terlokalkan.

Setelah dilakukan transformasi *Fourier* pada setiap *trace* seismik, lakukan penyusunan masing-masing *trace* sesuai koordinat dari *window* sehingga didapatkan hasil berupa peta 2D waktu-frekuensi.



Gambar 5.9 Tampilan hasil transformasi Gabor dari *trace* seismik.

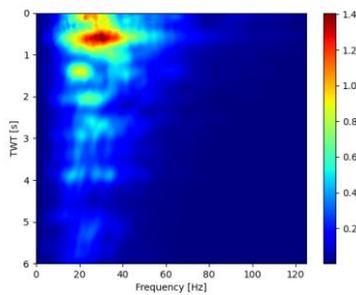
Invers Transformasi Gabor

Pada tahapan ini bertujuan untuk merekonstruksi kembali *trace* seismik yang sudah dilakukan transformasi Gabor dalam bentuk peta 2D waktu-frekuensi menjadi *trace* seismik dalam domain waktu menggunakan *invers* transformasi Gabor. Prinsip yang digunakan dalam tahapan ini adalah dengan melakukan *invers* transformasi *Fourier* dari masing-masing spektrum Gabor tiap koordinat *window*, setelah itu rekonstruksi kembali *trace* seismik dalam domain waktu dengan melakukan penjumlahan dari masing-masing koordinat *window*.

Smoothing Hyperbolic

Tahapan selanjutnya dilakukan *smoothing hyperbolic* pada data yang sudah dilakukan transformasi Gabor. *Smoothing hyperbolic* ini bertujuan untuk melakukan estimasi propagasi *wavelet* yang sudah ditambahkan faktor atenuasi. Proses *smoothing hyperbolic* dihitung langsung dengan mengambil nilai rata-rata pada peta 2D waktu-frekuensi disepanjang *strips hyperbolic*. Parameter yang harus diperhatikan dalam melakukan *smoothing hyperbolic* yaitu besarnya waktu dan frekuensi yang akan di *smoothing* pada peta 2D waktu-frekuensi. Untuk mendapatkan hasil estimasi propagasi *wavelet* yang baik serta sesuai dengan *trace* seismik dibutuhkan hasil peta 2D waktu-frekuensi yang dapat

merepresentasikan seluruh informasi lokal dari *trace* seismik

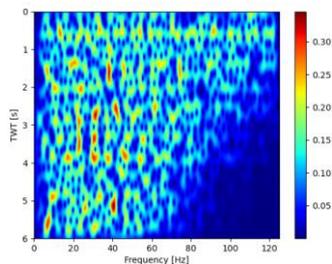


Gambar 5.10 Tampilan hasil *smoothing* dari spektrum Gabor yang merepresentasikan propagasi *wavelet*.

Dekonvolusi Gabor

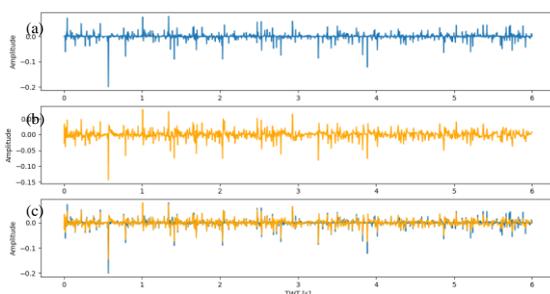
Dalam tahapan melakukan proses dekonvolusi Gabor peta 2D waktu-frekuensi pada proses sebelumnya dijadikan sebagai input. Pada tahapan ini dilakukan transformasi Hilbert dan logaritma natural dari spektrum hasil *smoothing hyperbolic* karena pada tahapan ini mengasumsikan propagasi *wavelet (source wavelet dan efek atenuasi)* adalah fasa minimum.

Tahapan selanjutnya yang akan dilakukan adalah menghapus dua faktor yang sudah dihitung diatas pada *trace* seismik sintetik dengan membaginya kedalam spektrum Gabor sehingga didapatkan hasil estimasi koefisien refleksi Gabor dalam peta 2D waktu-frekuensi yang bisa dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 5.11 Tampilan hasil spektrum estimasi koefisien refleksi Gabor.

Tahapan selanjutnya dalam dekonvolusi Gabor ini adalah melakukan *invers* transformasi Gabor pada data spektrum estimasi koefisien refleksi Gabor yang masih dalam peta 2D waktu-frekuensi diubah menjadi domain waktu, sehingga didapatkan hasil estimasi koefisien refleksi domain waktu seperti gambar dibawah.



Gambar 5.12 Tampilan hasil koefisien refleksi sintetik (a)

estimasi koefisien refleksi Gabor (*b*) dan *overlay* antara koefisien refleksi sintetik dengan hasil estimasi dari dekonvolusi Gabor (*c*).

Dekonvolusi Gabor dengan Data Seismik Sintetik + Noise 10%

Tahapan ini bertujuan untuk melihat apakah dekonvolusi Gabor dapat mengestimasi koefisien refleksi dengan baik jika terdapat *noise* pada data.

Dekonvolusi Gabor dengan Data Seismik Sintetik dengan Fasa zero

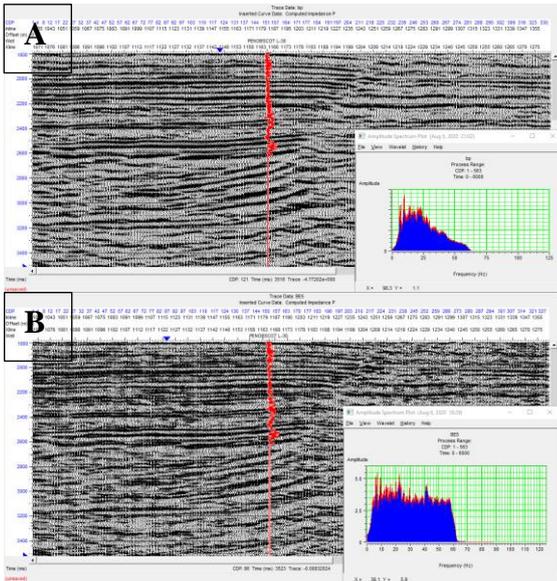
Dalam dekonvolusi Gabor asumsi propagasi *wavelet* yang digunakan adalah fasa minimum sehingga perlu dilakukannya pengujian pada data sintetik dengan fasa *zero*. Hal ini bertujuan untuk melihat dampak yang dihasilkan apakah metode dekonvolusi Gabor dapat mengestimasi koefisien refleksi dengan baik apa tidak.

Untuk mendapatkan hasil yang baik, perlu dilakukan pengujian masing-masing parameter yang cocok dengan keadaan data sintetik dan data *real*. Dalam dekonvolusi Gabor terdapat berbagai parameter yang akan digunakan diantaranya lebar *window* Gaussian, *increment*, *time smoothing*, *frekuensi smoothing*, konstanta stabilitas. parameter yang optimum dapat dilihat dari hasil *rms error* dan koefisien korelasi antara koefisien refleksi sintetik terhadap estimasi koefisien korelasi Gabor.

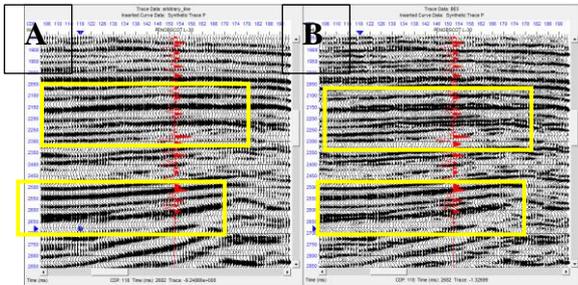
VI. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *Bandwidth Extension* Menggunakan *Bandpass Filter* dan *Dekonvolusi*

Bisa dilihat pada gambar 5.4 terlihat bahwa saat melakukan *windowing* pada frekuensi yang lebih kecil akan memperlihatkan terminasi lapisan dengan ketebalan *tuning* yang lebih besar serta *trace* seismik yang dominan memperlihatkan terminasi lapisan pada waktu yang lebih dalam dan sebaliknya. Hal ini selaras dengan analisis *signal* dimana jika spektrum amplitudo dominan pada frekuensi rendah maka estimasi *wavelet* yang dihasilkan akan semakin lebar dalam domain waktu begitu juga sebaliknya. Melakukan tahapan *windowing* dalam domain frekuensi ini berguna untuk mengestimasi *wavelet* tiap *windowing* dari data seismik, yang secara tidak langsung penulis sudah mengkompensasi efek atenuasi pada data karena *wavelet* yang didapatkan selalu berubah terhadap waktu. Dengan informasi *wavelet* yang sudah diketahui, sehingga penulis bisa membentuk *invers filter* dari masing-masing *wavelet* yang dibutuhkan pada tahapan dekonvolusi.



Gambar 6.1 (a) Hasil spektrum *before bandwidth extension* seismik menggunakan *window bandpass filter*, (b) hasil *after* dilakukan *bandwidth extension* seismik menggunakan *window bandpass filter* dan dekonvolusi *statistical*.

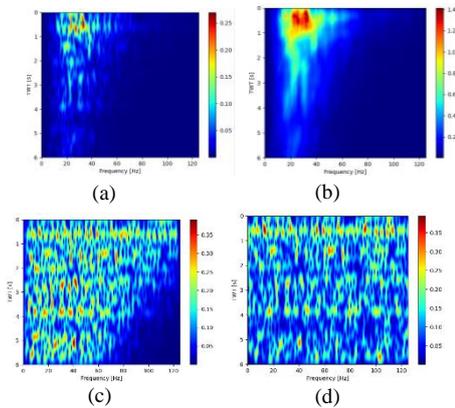


Gambar 6.2 (a) Hasil Korelasi data arbitrary line *before bandwidth extension* (BE), (b) *after bandwidth extension* (BE) yang divalidasi dengan data sumur L-30.

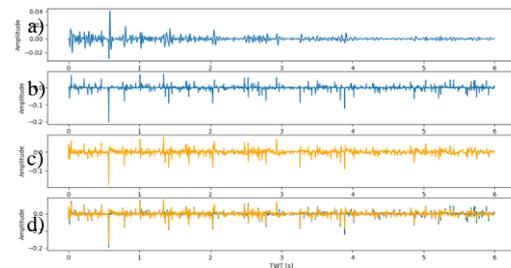
Dari hasil yang didapatkan diatas bisa dilihat pada spektrum amplitudo *bandwidth* dari data seismik mengalami perluasan yang sangat drastis dan energi yang relatif seimbang pada data setelah dilakukan *bandpass filter* serta dekonvolusi. Perluasan *bandwidth* dari data seismik tercermin pada resolusi temporal seismik yang bisa dilihat pada gambar diatas yang berwarna kotak kuning. Pada gambar memperlihatkan penambahan jumlah lapisan-lapisan tipis pada lapisan yang mengalami *tuning* serta menunjukkan kontinuitas dari reflektor pada data seismik setelah dilakukan BE. Jika dilakukan validasi dengan *trace* sintetik pada sumur L-30 bahwa kemunculan reflektor tipis tersebut merupakan reflektor tipis yang ada kemenerusannya pada data seismik. Dapat disimpulkan dengan menggunakan teknik *bandpass* bisa menjawab keterbatasan *bandwidth* seismik karena dapat merecover seluruh informasi *signal* dengan energi yang lebih seimbang. Hanya saja metode ini tidak disarankan karena *wavelet* yang digunakan tidak adaptif dan jumlahnya terbatas karena dianalisis secara manual dalam hal ini hanya ada tiga *wavelet*. Selain itu kualitas hasil yang didapatkan sangat bergantung pada ketelitian yang bersifat subjektif.

Analisis *Bandwidth Extension* Menggunakan Metode Dekonvolusi Gabor Pada Data Sintetik

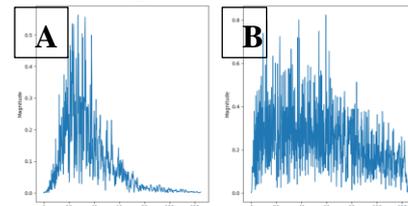
Dari hasil uji coba yang sudah dilakukan bisa dilihat pada gambar diatas, bahwa peningkatan lebar *window* dan *increment* dari *window* akan menghasilkan respon peta waktu-frekuensi yang berbeda-beda. Meningkatkan lebar *window* Gaussian maka akan meningkatkan resolusi frekuensi dan mengurangi *increment* dari *window* akan meningkatkan resolusi temporal dari *signal*. Memperbesar lebar *window* Gaussian akan berpengaruh pada terjadi interferensi (destruktif / konstruktif) *signal* pada peta waktu-frekuensi. Lebar *window* yang lebih sempit akan menampung model yang lebih tepat tetapi jendela tidak boleh lebih sempit dari pada *wavelet*.



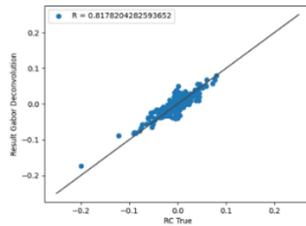
Gambar 6.3 Hasil algoritma dekonvolusi Gabor, (a) Spektrum Gabor dari *trace* seismik, (b) estimasi propagasi *wavelet* dari data spektrum Gabor yang di smoothing dalam waktu-frekuensi, (c) estimasi koefisien refleksi Gabor dalam waktu-frekuensi, (d) koefisien refleksi sintetik dalam waktu-frekuensi.



Gambar 6.4 (a) Tampilan hasil seismik sintetik *non-stationary* dengan *wavelet zero phase*, (b) koefisien refleksi sintetik, (c) hasil estimasi koefisien refleksi dekonvolusi Gabor, (d) *Overlay* antara koefisien refleksi sintetik dengan hasil dekonvolusi Gabor.



Gambar 6.5 (a) Hasil spektrum amplitudo dari seismik sintetik *non-stationary*, (b) spektrum amplitudo setelah dilakukan dekonvolusi Gabor.



Gambar 6.6 *crossplot* antara koefisien refleksi *true* dengan hasil dekonvolusi Gabor.

Dilakukannya analisis estimasi koefisien refleksi pada gambar 6.4 (c), jika dibandingkan dengan koefisien refleksi sebenarnya memiliki korelasi yang sangat kuat antara keduanya yang ditunjukkan pada *crossplot* pada gambar diatas. Hal ini akan tercermin juga dalam bentuk spektrum amplitudo data yang mengalami pelebaran *bandwidth* yang hampir mendekati spektrum amplitudo koefisien refleksi sintetik. Dengan desain parameter-parameter yang cocok maka efek *wavelet* pada data seismik bisa dihilangkan secara maksimal. Dari gambar *crossplot* diatas dan estimasi koefisien refleksi terlihat bahwa dengan keadaan sintetik yang sudah diketahui parameter *wavelet*nya saja sangat sulit untuk mendapatkan kembali bentuk koefisien refleksi dengan sepenuhnya karna pengaruh kompleksitas parameter-parameter yang banyak dan saling berhubungan satu sama lain. Hanya saja parameter-parameter diatas sudah mendapatkan hasil estimasi koefisien refleksi yang maksimal sekitar 0.823 yang sudah dikatakan sangat benar dan sesuai dengan bentuk koefisien refleksi sebenarnya, tetapi masih dominan *underestimated* koefisien refleksi. *underestimated* yang terlihat pada hasil *crossplot* diatas bisa disebabkan oleh estimasi propagasi *wavelet* yang tidak begitu sesuai dengan *wavelet* sebenarnya, serta asumsi fasa minimum yang dihitung dengan melakukan transformasi Hilbert dan logaritma natural dari spektrum propagasi *wavelet* terbatas pita frekuensi seismik yang tidak sepenuhnya benar karena masih terdapat kesalahan fasa setelah dilakukan dekonvolusi Gabor.

Untuk keadaan data ditambah *noise*, setelah dilakukan uji coba untuk mendapatkan parameter yang paling optimal, keberadaan *noise* tidak sepenuhnya bisa dihilangkan sehingga saat melakukan dekonvolusi Gabor menganggap *noise* sebagai *signal* yang akan mempengaruhi hasil estimasi. Dapat disimpulkan bahwa dekonvolusi Gabor sangat sensitif terhadap keberadaan *noise*.

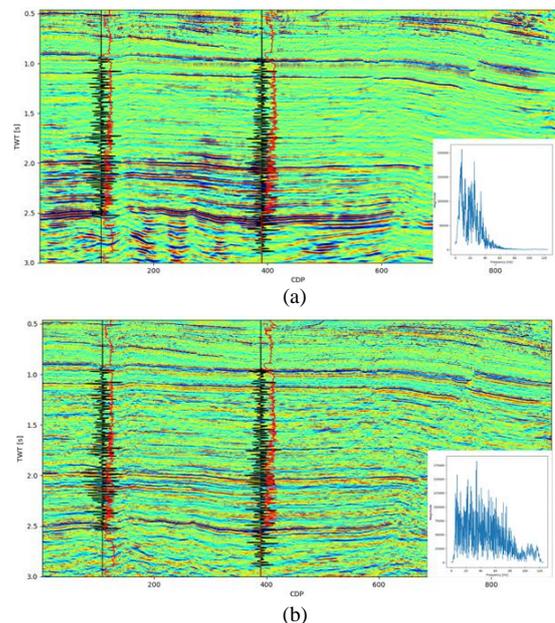
Untuk data dengan fasa *zero*, saat dilakukan uji coba metode dekonvolusi Gabor dengan asumsi fasa minimum mendapatkan hasil estimasi koefisien refleksi yang terlihat dipol. Untuk menghilangkan efek tersebut perlu dilakukan transformasi Hilbert pada data hasil estimasi lalu menghitung *trace* seismik dengan menggunakan persamaan euler dengan sudut -90 derajat. Setelah dilakukan hasil perhitungan seperti diatas didapatkan korelasi yang sangat bagus sebesar 0.8178, dapat disimpulkan bahwa dekonvolusi Gabor

dengan seismik fasa *zero* atau minimum dapat mengestimasi koefisien refleksi dengan tepat.

Dekonvolusi Gabor sangat efektif jika dilakukan pemilihan parameter-parameter yang sesuai dengan data seismik. Metode ini bisa menjawab keterbatasan resolusi seismik dengan terjadi pelebaran *bandwidth* data yang tercermin pada resolusi *temporal* seismik sehingga dapat melakukan analisis stratigrafi bawah permukaan secara lebih detail.

Analisis *Bandwidth Extension* Menggunakan Metode Dekonvolusi Gabor Pada Data Sintetik

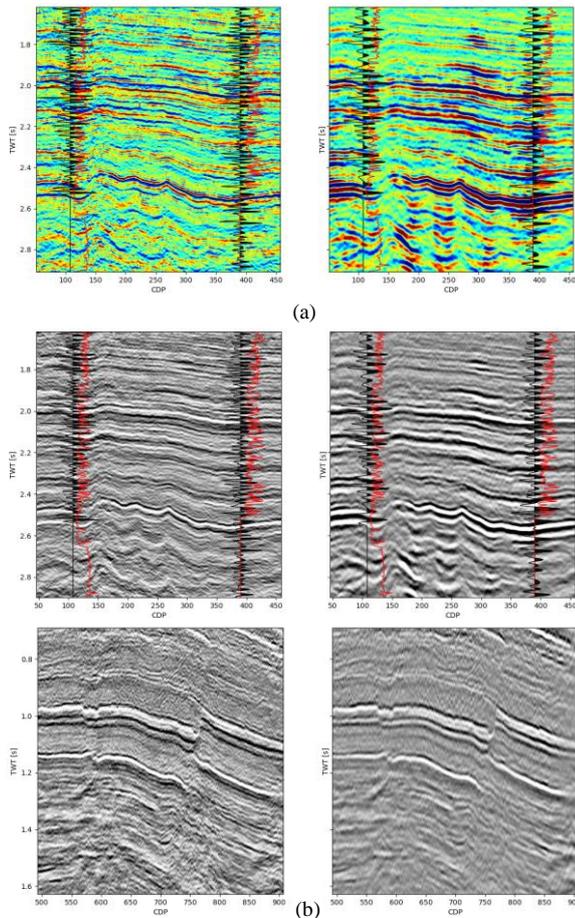
Untuk aplikasi pada data *real*, dilakukan analisis pemilihan parameter yang paling optimal pada *trace* masing-masing sumur dengan korelasi yang bagus diantara keduanya. Lalu dari hasil uji coba tersebut didapatkan parameter terbaik yang akan diaplikasi ke penampang 2D *arbitrary*.



Gambar 6.7 (a) 2D *arbitrary line original* dan spektrum amplitudo dengan well B-41, L-30 (*trace* berwarna hitam merupakan estimasi seismik sintetik & *trace* berwarna merah merupakan log gamma ray), (b) 2D *arbitrary line* dan spektrum amplitudo *after* dekonvolusi Gabor.

Pada gambar diatas memperlihatkan terjadinya pelebaran *bandwidth* data seismik serta pemulihan frekuensi tinggi yang hilang akibat atenuasi, karena dalam dekonvolusi Gabor efek propagasi *wavelet* pada data sudah dihilangkan. Terjadinya pelebaran spektrum *bandwidth* pada data seismik akan tercermin pada peningkatan resolusi temporal seismik sehingga kemampuan untuk memisahkan lapisan secara *temporal* akan meningkat. Setelah dilakukan pengecekan pada korelasi antara estimasi koefisien refleksi setelah dekonvolusi Gabor dengan well B-41 dan L-30 mendapatkan hasil korelasi sebesar 0.136 dan 0.1111. Dengan nilai korelasi yang sangat rendah tidak sepenuhnya akan menghasilkan estimasi yang salah karena proses dan tahapan yang dilakukan sudah sangat

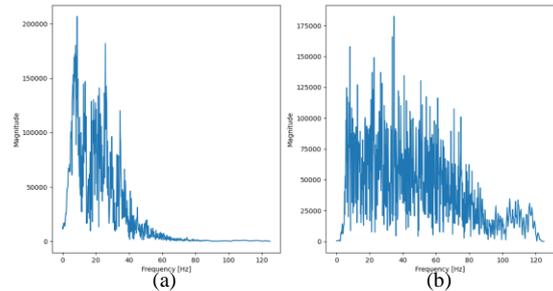
teliti dalam pemilihan parameter-parameter yang paling optimal. Hanya saja pada keadaan data *real* mengalami keterbatasan untuk mendapatkan estimasi koefisien refleksi bawah permukaan yang hasilnya tidak seperti pada data sintetik. Pada keadaan seismik *real* terdapat banyak faktor yang sulit untuk dihilangkan diantaranya estimasi propagasi *wavelet* yang diasumsikan fasa minimum jika dilihat pada keadaan dilapangan asumsi minimum tidak selalu konstan melainkan berubah-ubah tergantung kompleksitas bawah permukaan, estimasi efek atenuasi dengan waktu-frekuensi konstan disepanjang *strip hyperbolic* tidak begitu sesuai untuk data seismik *real*, dan keterdapat *noise*.



Gambar 6.8 (a) plotting color jet after dan before dekonvolusi Gabor 2D arbitrary line, (b) plotting color greys density after dan before dekonvolusi Gabor.

Dari gambar diatas bisa dilihat detail lapisan yang berbeda-beda dengan plotting color yang berbeda, bisa dilihat pada kotak kuning pada gambar 6.8 memperlihatkan detail lapisan lebih jelas kemenerusannya secara lateral dan bisa divalidasi dengan log gamma ray rendah yang merepresentasikan litologi *sand* dan seismik sintetik dengan *event trough*. Sebagaimana pada gambar diatas hasil dekonvolusi dapat *meresolve* lapisan-lapisan tipis yang mengalami *tuning* yang tidak teresolusi dengan menggunakan plotting color greys density.

Dari hasil *plotting* dengan menggunakan greys density dapat memperlihatkan *low frequency* pada data seismik yang ditandai dengan terminasi yang lebih detail dan kontras antar batas lapisan lebih jelas yang dapat mengurangi ambiguitas dalam penentuan batas lapisan, sehingga sangat memungkinkan untuk melakukan analisis stratigrafi yang lebih detail dan presisi. Bisa dilihat bah pada TWT 2 - 2.1 s kontras lapisan yang sangat jelas untuk batas-batas formasi, jika diteruskan ke well maka pada daerah ini memperlihatkan perselingan lapisan *sand* yang tipis ditandai dengan log gamma ray yang rendah dan seismik sintetik rendah.



Gambar 6.9 (a) plotting color jet after dan before dekonvolusi Gabor 2D arbitrary line, (b) plotting color greys density after dan before dekonvolusi Gabor.

Dari gambar diatas bisa dihitung *tuning thickness* dari data seismik *before* dan *after* dekonvolusi Gabor, frekuensi dominan dari data seismik *before* dan *after* adalah 22 Hz, 45 Hz dengan rata-rata kecepatan 3988.75 m/s. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa *tuning thickness* yang dapat diresolusi seismik adalah 45.32 m atau 11.3 ms untuk data *before* dekonvolusi Gabor dan 22.15 m atau 5.5 ms untuk data *after* dekonvolusi Gabor. Dapat disimpulkan dengan bertambahnya lebar *bandwidth* data seismik maka *tuning thickness* dari data seismik akan semakin kecil sehingga kemampuan seismik untuk dapat meresolusi lapisan dibawah *tuning thickness* akan lebih bagus lagi yang serta daya pisah tiap lapisan secara temporal akan meningkat.

Untuk data hasil dekonvolusi Gabor perlu dilakukan pengecekan pada masing-masing spektrum *signal*, *low frequency*, hasil *enhancement* dan *high frequency* untuk memastikan apakah informasi yang terlihat adalah reflektor atau akibat dari *processing* sehingga perlu divalidasi dengan sumur yang sudah terkoreksi *checkshot*. Dari hasil analisis seluruh rentang spektral valid dengan data sumur yang memiliki kemenerusan, bisa diartikan bahwa dekonvolusi Gabor telah berhasil secara optimum merecover seluruh informasi reflektor dengan baik mulai dari 5-85 Hz.

VII. KESIMPULAN dan SARAN

KESIMPULAN

1. Analisis dekonvolusi *non-stationary* dengan teknik dekomposisi spektral (*bandpass*) pada data seismik harus dilakukan dengan sangat teliti agar mencegah artefak non geologis. Teknik ini mampu menghasilkan data seismik dengan energi yang

lebih seimbang dan memberikan peningkatan *bandwidth* data hingga 5-60 Hz (1.5x dari *bandwidth* awal) tanpa terjadi peningkatan *noise*.

2. Implementasi dekonvolusi *non-stationary* dengan teknik Gabor menggunakan *software* Python telah berhasil dilakukan. Analisis dekonvolusi *non-stationary* pada data sintetik dan *real* menggunakan teknik Gabor dalam melakukan *windowing* dan estimasi propagasi *wavelet*, berhasil memberikan peningkatan *bandwidth* pada frekuensi tinggi maupun rendah hingga 5-85 Hz (2x dari *bandwidth* awal).
3. Dekonvolusi *non-stationary* dengan teknik Gabor menunjukkan peningkatan resolusi yang signifikan dan telah divalidasi menggunakan informasi log sumur yang tersedia di semua rentang spektral. Secara kuantitatif terjadi peningkatan resolusi *temporal* seismik dengan *tuning thickness* 45.32 m atau 11.3 ms menjadi 22.15 atau 5.5 ms. Dengan teknik Gabor keterbatasan *bandwidth* data dapat teratasi sehingga mempermudah dalam melakukan interpretasi stratigrafi secara jelas dan detail.
4. Dari hasil analisis *bandwidth extension (bandpass)* dengan dekonvolusi Gabor, didapatkan bahwa dekonvolusi Gabor lebih baik dalam melakukan estimasi koefisien refleksi yang sudah divalidasi pada log sumur serta menghasilkan energi yang hampir mirip dengan *bandwidth extension (bandpass)*. Hanya saja pada dekonvolusi Gabor tidak sepenuhnya dapat menghilangkan efek atenuasi, tetapi pada metode ini lebih mempertimbangkan parameter fisis yang dihitung langsung dari data seismik itu sendiri.

SARAN

1. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dalam analisis teknik Gabor perlu dilakukan dari awal tahapan *processing* serta dibutuhkan data yang memiliki *S/N ratio* yang tinggi.
2. Untuk analisis resolusi dalam data sintetik, ada baiknya menggunakan model baji (*wedge*) sehingga dapat mengukur seberapa jauh peningkatan resolusi dalam penampang 2D.
3. Keterbatasan metode dekonvolusi Gabor pada estimasi propagasi *wavelet* yang selalu dianggap minimum fasa perlu dilakukan perbaikan dengan menggunakan algoritma *maximization* kurtosis lokal yang diregularisasi untuk mengkompensasi efek perubahan fasa pada keadaan *real*.
4. Hasil dekonvolusi Gabor tidak menjamin keseimbangan energi frekuensi sehingga efek *wavelet* pada seismik yang dihasilkan masih cukup kuat. Untuk menghilangkan efek *wavelet* lebih jauh lagi, seismik *after* dekonvolusi Gabor dapat dilakukan analisis dekonvolusi *non-stationary* dengan dekomposisi spektral sebagaimana yang telah didemonstrasikan dibagian awal tugas akhir.

REFERENSI

[1] Canada- Nova Scotia *Offshore Petroleum Board*, 2013. *Content Regional Geoscience Overview*. <http://callforbird.cnsopb.ns.ca>. Diakses pada 28 desember 2019. Pukul 16.20 WIB.

[2] G. kidston, A. D., *The Upper Jurassic Abenaki Formation Offshore Nova Scotia A Seismic and*

Geologic Perspective, Offshore Petroleum Canada, Kanada, 2005.

[3] Siahaan, V, *Aplikasi Probabilistic Neural Network untuk Menentukan Parameter Fisis Batuan Pada Lapangan Penobscot, Canada-Nova Scotia*, Depok : Universitas Indonesia, 2012.

[4] Widess, M.B., 1973, *How thin is a thin bed. Geophysics*, Vol 38, no.6, 1176-1180.

[5] Partyka, G. A., J. Gridley, and J. Lopez. 1999. *Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization : The Leading Edge*, 18, 353-360.

[6] Jenner, Edward et al, 2016, *Extending the usable bandwidth of seismic data with tensor-guide, frequency-dependent filtering: first break volume 34*.

[7] Smith, Michael et al, 2008, *Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform: first break volume 26*.

[8] Liang, Chen et al, 2017, *Tutorial: Spectral bandwidth extension- invention versus harmonic extrapolation, library SEG Geophysics vol 82*.

[9] Margrave, and Lamoreux, 2001, *Gabor Deconvolution, CREWES Research-Volume 13*.

[10] Margrave, and Lamoreux et al, 2002, *An Update on Gabor Deconvolution, CREWES Research-Volume 14*.

[11] Margrave, and Lamoreux et al, 2011, *Estimating reflectivity by non stationary deconvolution of seismic data*.

[12] Gadi, A., *Penggunaan Dekonvolusi Gabor Dalam Upaya Peningkatan Resolusi Seismik*, Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2013.

[13] Sukmono, S., 1999, *Interpretasi Seismik Refleksi, Jurusan Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung : Bandung*.

[14] Abdullah, A., 2007. *Ensiklopedi Seismik*, <http://ensiklopediseismik.blogspot.com>. Diakses pada 28 desember 2019. Pukul 19.10 WIB.

[15] Zengbao, Chen et al, 2013, *High resolution seismic processing by Gabor deconvolution, China University of Petroleum, Beijing*.

[16] Li, Fang et al, 2014, *A novel nonstationary deconvolution method based on sprctral modelling and variable-step sampling hyperbolic smoothing. China University of Petroleum. Beijing*. [2] G. kidston, A. D., *The Upper Jurassic Abenaki Formation Offshore Nova Scotia A Seismic and Geologic Perspective, Offshore Petroleum Canada, Kanada*, 2005.

[17] Jamali, javad and Javaherian, A., *Nonstationary deconvolution using maximum kurtosis optimization, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology*.

[18] Kjartansson, E., 1979, *Constant Q-wave propagation and attenuation: Journal of Geophysical Research*, 84, B9, 4737-4748.

[19] Firdaus, R. dan Ekawati M.G., *Optimalisasi Proses Komputasi Pelebaran Pita Frekuensi Data Seismik Refleksi Berbasis Inversi Beresolusi Tinggi Untuk Penafsiran Stratigrafi Seismik*, Institut Teknologi Sumatera.

[20] Firdaus, R. and Winardhi, S., 2014, *Non-Stationary Reflectivity Inversion Using Basis Pursuit Decomposition*, *Proceedings PIT HAGI 39*.

- [21] Firdaus, R. and Ekawati M.G., 2017, *Post-stack Deterministic Seismic Inversion using Sparse Optimisation Utilizing Gaussian Dense Layer Simulation*. *Geophysics Engineering*. Institut Teknologi Sumatera.
- [22] W, Pranowo, 2019, *Time-varying wavelet estimation and its applications in deconvolution and seismic inversion*.
- [23] Naghandeh, D.H et al, 2017, *Stochastic Gabor reflectivity and acoustic impedance inversion*, *Petroleum Geophysics*, Chiang Mai University, Thailand.