

PERBANDINGAN METODA MIGRASI F-K, KIRCHHOFF, DAN BEDA HINGGA UNTUK MENINGKATKAN RESOLUSI PENAMPANG SEISMIK 3D DARAT LAPANGAN “KDY” CEKUNGAN SUMATRA SELATAN

Kevin Aulia Sandi Pratama¹, Adi Susilo¹, Lambertus Francisco²

¹Jurusan Fisika FMIPA Univ. Brawijaya

²PT. Hexindo Lemang PSC

Email: kevin.aulia.sp@gmail.com

Abstract

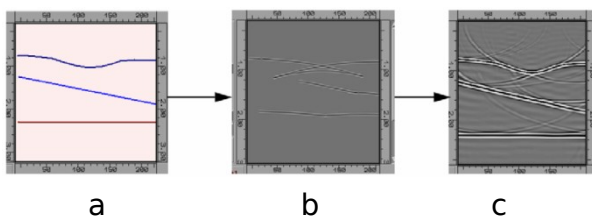
Migrasi seismik sebagai proses untuk memindahkan kedudukan reflektor pada lapisan miring ke posisi sebenarnya di bawah permukaan, baik dalam domain waktu atau kedalaman. Proses migrasi akan meningkatkan kemampuan memisahkan dua reflektor yang berdekatan (resolusi) pada penampang seismik dan menghilangkan efek difraksi dari perambatan gelombang seismik. Peningkatan resolusi penampang seismik bawah permukaan pada daerah yang memiliki struktur kompleks sehingga akan membantu dalam interpretasi geologi, terutama untuk informasi patahan dan lipatan.

Penelitian ini menggunakan tiga metoda migrasi dengan membandingkan hasil penampang seismik yang paling optimal meningkatkan resolusi penampang seismik pada daerah penelitian. Migrasi yang digunakan adalah migrasi f-k, migrasi beda hingga, dan migrasi Kirchhoff. Migrasi yang tepat untuk penampang seismik lapangan “KDY” blok leumpang, cekungan Sumatra Selatan ini adalah migrasi Kirchhoff. Migrasi Kirchhoff dipilih karena menghasilkan penampang *stack* seismik yang lebih baik pada reflektor yang miring maupun lateral, efek difraksi yang lebih sedikit, dan hasil keluarannya memiliki sedikit efek lengkung (*smiling effect*) yang lebih optimal dibandingkan dengan migrasi f-k dan beda hingga.

Kata kunci : struktur kompleks, distorsi, Migrasi f-k, Migrasi Kirchhoff, Migrasi beda hingga.

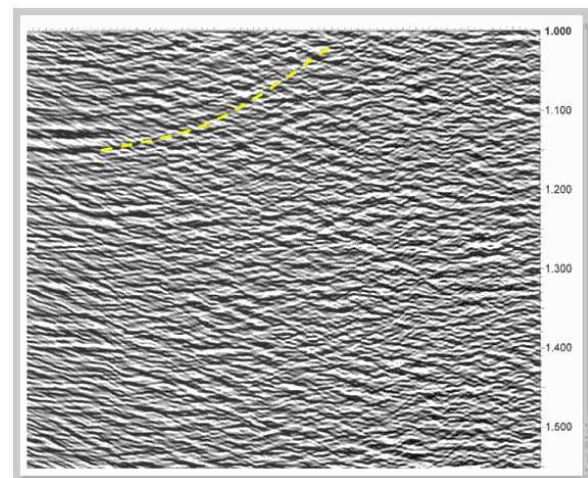
PENDAHULUAN

Pada kasus difraksi gelombang seismik terdapat suatu titik difraktor di bawah permukaan dimana pada titik ini akan dipancarkan gelombang seismik baru yang menjalar ke segala arah dan direkam oleh *geophone* yang berada di permukaan bumi. Adanya titik difraktor ini menjadikannya terlihat seperti bidang reflektor pada rekaman data seismik. Dengan dilakukannya migrasi maka bidang reflektor yang disebabkan sebuah titik difraktor ini akan dikembalikan menjadi satu titik reflektor sedangkan kemiringan dan kedalaman reflektor akan dibuat sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.



Gambar 1 (a) model geologi, (b) rekaman data seismik, (c) data seismik setelah migrasi. [1]

Satu efek negatif dari migrasi saat menghilangkan efek dari difraksi adalah munculnya bentukan hiperbolik keatas (*migration smile*) pada hasil seismic section yang memiliki signal to noise ration yang rendah.



Gambar 2 *Seismic section* setelah migrasi pada data yang memiliki S/N ratio rendah akan lebih menampilkan *migration smiles* [2]

Migrasi seismik bertujuan untuk mengembalikan reflektor semu ke posisi yang sebenarnya. Proses migrasi pada dasarnya terdapat dua cara yaitu migrasi sesudah *stack* (*post-stack migration*) dan migrasi sebelum *stack* (*pre-stack migration*). Migrasi yang akan digunakan antara lain migrasi f-k, migrasi beda hingga, dan migrasi Kirchhoff yang menggunakan *post-stack migration*.

Migrasi f-k

Penggunaan transformasi Fourier pada proses migrasi dapat dilakukan dengan sederhana. Secara singkat persamaan gelombang dalam domain waktu-ruang adalah persamaan (1) dan persamaan

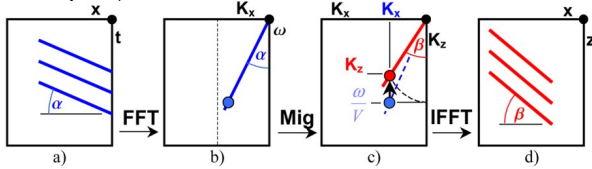
gelombang dalam domain bilangan gelombang-frekuensi didefinisikan persamaan (2).

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 P}{V^2 \partial t^2} \quad (1)$$

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{V^2} \quad (2)$$

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2}{V^2} - k_x^2} \quad (3)$$

Solusi persamaan (2) untuk k_z , kita mendapatkan persamaan (3), dimana mengakibatkan pergerakan data pada gambar 2.14 (c), yang energinya semula berada pada $P(k_x, \omega/v)$ dengan kemiringan α sebelum migrasi, berpindah ke $P(k_x, k_z)$ dengan kemiringan β setelah migrasi. Setelah pergerakan data, titik $P(k_x, k_z)$ berbentuk segitiga dimana jarak radial dihasilkan oleh ω/v . Selanjutnya inversi transformasi



Gambar 3 Ilustrasi langkah migrasi f-k pada kecepatan konstan. [3]

Notasi matematis prinsip migrasi dengan metoda f-k tersebut dapat dirumuskan sebagai:

$$(x, z, 0) = \frac{C}{4\pi^2} \int e^{-jk_z z} dk_z \cdot \frac{k_z}{z} P(k_x, 0, \omega) \cdot e^{-jk_x x} dk \quad (4)$$

Migrasi Kirchhoff

Parameter utama untuk Migrasi Kirchhoff adalah *Trace Spacing*, penjumlahan *aperture* dan *dip-limits*. [4]

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dt_0 \int dA_0 \times \left[G \frac{\partial}{\partial n} P(x_0, \right.$$

(5)

Green's Function (Fungsi Green) dengan sifat yang diinginkan pada permukaan bebas terdiri dari titik sumber dan citra negatif.

$$G(x, y, z, t | x_0, y_0, z_0, t_0) = \frac{\delta\left(t - t_0 - \frac{R}{V}\right)}{R} - \frac{\delta\left(t - t_0 - \frac{R'}{V}\right)}{R'}$$

$$G(x, y, z, t | x_0, y_0, z_0, t_0) = \frac{\delta\left(t - t_0 - \frac{R}{V}\right)}{R} - \frac{\delta\left(t - t_0 - \frac{R'}{V}\right)}{R'}$$

(6)

dimana

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

$$R' = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2}$$

Jika $z_0 = 0$ pada bidang pengamatan A_0 , kita mendapatkan $R = R'$, sehingga pada persamaan (6) kita akan mendapatkan $G = 0$. Sehingga persamaan (5) akan menjadi

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dt_0 \int dA_0 \left[P(x_0, y_0, z_0, t_0) \frac{\partial}{\partial n} G \right]$$

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dt_0 \int dA_0 \left[P(x_0, y_0, z_0, t_0) \frac{\partial}{\partial n} G \right]$$

(7)

karena vektor normal ke luar permukaan S_0 dalam arah yang berlawanan untuk koordinat z_0 , maka akan didapatkan

$$\frac{\partial G}{\partial n} = -\frac{\partial G}{\partial z_0} \quad (8)$$

Substitusi dari persamaan (6) dan (8) menjadi persamaan (7) dan hasil penyederhanaan berdasarkan representasi integral untuk wavefield $P(x, y, z, t)$ untuk sembarang titik pada citra jarak dalam hal pengamatan wavefield $P(x_0, y_0, z_0, t_0)$ pada permukaan

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dt_0 \int dA_0 \times \left[P(x_0, y_0, z_0, t_0) \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int dt_0 \int dA_0 \times \left[P(x_0, y_0, z_0, t_0) \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

(9)

Sesuai dengan prinsip pencitraan yang mengekstrapolasi sumber dari semua $z > 0$ pada $t=0$, sehingga

$$P(x, y, z, 0) = \frac{-1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \iint dx_0 dy_0 \frac{P(x_0, y_0, 0, t + \frac{\Delta z}{v})}{R}$$

$$P(x, y, z, 0) = \frac{-1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \iint dx_0 dy_0 \frac{P(x_0, y_0, 0, t + \frac{\Delta z}{v})}{R}$$

(10)

Solusi dari wavefield pada persamaan (10) dapat menghasilkan Migrasi seismik. Persamaan integral (10) dapat dituliskan dengan

$$P(m\Delta x, n\Delta y, l\Delta z, 0) = \frac{-1}{2\pi} \frac{\Delta}{\Delta z} \sum_{\eta=-N}^N \sum_{\xi=-M}^M \frac{P(\xi\Delta x, \eta\Delta y, 0, t + \frac{\Delta z}{v})}{\sqrt{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}$$

$$P(m\Delta x, n\Delta y, l\Delta z, 0) = \frac{-1}{2\pi} \frac{\Delta}{\Delta z} \sum_{\eta=-N}^N \sum_{\xi=-M}^M \frac{P(\xi\Delta x, \eta\Delta y, 0, t + \frac{\Delta z}{v})}{\sqrt{(m\Delta x)^2 + (n\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}$$

(11)

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M,$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N,$$

$$l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm L,$$

Dimana Δx , Δy , Δz adalah sampel ruang sepanjang sumbu x , y , z , pada m , n , l , menunjukkan nomor urut sampel dari titik subsurface mendekati sumbu x , y , z , pada ξ , η , adalah nomor urut titik surface sepanjang sumbu

x , dan y secara berurutan dan $\frac{\Delta}{\Delta z}$ adalah

turunan orde pertama sepanjang koordinat z . [5]

Migrasi Beda Hingga

Konsep migrasi beda hingga mendasari dari kontinuitas ke bawah medan gelombang seismik. Proses migrasi beda hingga memanfaatkan pemecahan persamaan gelombang dengan metoda beda hingga. Jika dianggap t adalah waktu tempuh $\frac{1}{2}$ dari TWT (*two way time*) maka gelombang bidang yang merambat dengan sudut θ dinyatakan oleh persamaan

$$\Psi(x, z, t) = A \exp \left[j\omega \left(t - \frac{x\theta}{v} - \frac{z}{v} + \frac{z\theta^2}{2v} \right) \right]$$

$$\Psi(x, z, t) = A \exp \left[j\omega \left(t - \frac{x\theta}{v} - \frac{z}{v} + \frac{z\theta^2}{2v} \right) \right]$$

(12)

$$' = \frac{\partial \Psi^i}{\partial t^i} \frac{\partial t^i}{\partial t} = \frac{\partial \Psi^i}{\partial t^i}; \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^{i2}}$$

(13)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi^i}{\partial x}; \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{\partial \Psi^i}{\partial z} + \frac{\partial \Psi^i}{\partial t^i} \frac{\partial t^i}{\partial z} = \frac{\partial \Psi^i}{\partial z} - \frac{1}{v} \frac{\partial \Psi^i}{\partial t}$$

(15)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z^2} - \frac{2}{v} \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} + \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial t^{i2}}$$

(16)

Disubstitusikan ke persamaan gelombang

(16) Memberikan persamaan baru

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z^2} - \frac{2}{v} \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z^2} - \frac{2}{v} \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} = 0 \quad (17)$$

Persamaan gelombang yang merambat mendekati vertikal Ψ^* terhadap z sangat kecil, sehingga

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z^2} \quad \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z^2}$$

bisa

diabaikan. Hal ini disebut dengan pendekatan 15°.

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial x^2} - \left(\frac{2}{v} \right) \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial x^2} - \left(\frac{2}{v} \right) \frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} = 0 \quad (18)$$

Penyelesaian persamaan (18) digunakan *finite-difference* (beda hinga), dimana ψ^* disusun dalam bentuk array 3 dimensi dengan selang interval adalah $\Delta x, \Delta z, \Delta t^*$.

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial x^2} \approx \frac{\Psi^i(x, z, t^i) - 2\Psi^i(x - \Delta x, z, t^i) + \Psi^i(x - 2\Delta x, z, t^i)}{\Delta x^2}$$

(19)

$$\frac{\partial^2 \Psi^i}{\partial z \partial t^i} \approx \frac{[\Psi^i(x, z, t^i) - \Psi^i(x, z - \Delta z, t^i) - \Psi^i(x, z, t^i - \Delta t^i) + \Psi^i(x, z - \Delta z, t^i - \Delta t^i)]}{\Delta z \Delta t^i}$$

(20)

Sehingga persamaan (20) dapat dituliskan solusinya sebagai berikut

$$\begin{aligned} & \frac{\Psi^i(x, z - \Delta z, t^i)}{\Delta z \Delta t^i} + \frac{\Psi^i(x, z, t^i - \Delta t^i)}{\Delta z \Delta t^i} \\ & - \frac{V \Psi^i(x - \Delta x, z, t^i)}{\Delta x^2} - \frac{\Psi^i(x, z - \Delta z, t^i - \Delta t^i)}{\Delta z \Delta t^i} \\ & + \frac{V \Psi^i(x - 2\Delta x, z, t^i)}{2\Delta x^2} \\ & \Psi^i(x, z, t^i) = \frac{\Delta z \Delta t^i}{2\Delta z^2 - V \Delta z \Delta t^i} \end{aligned}$$

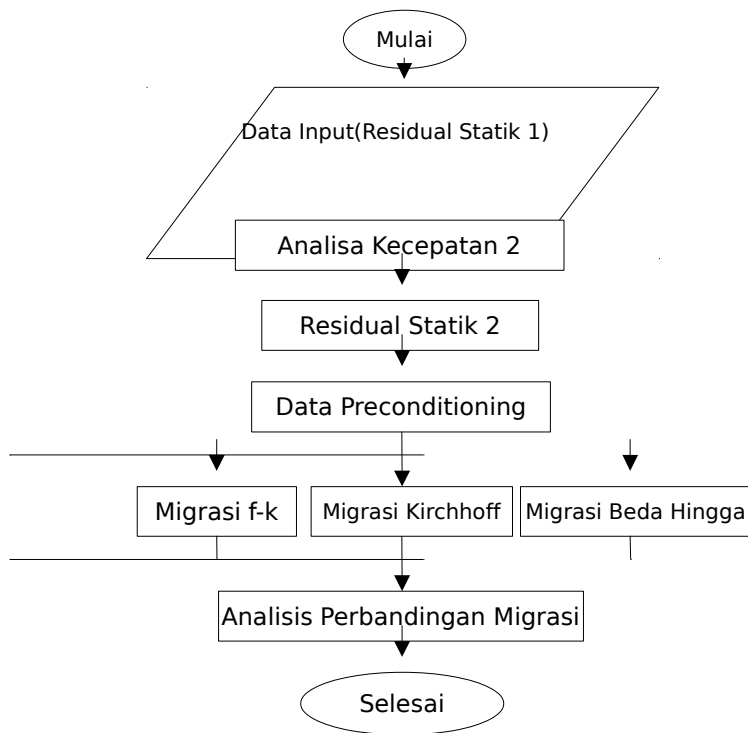
$$\Psi^i(x, z, t^i) = \frac{\Delta z \Delta t^i}{2\Delta z^2 - V \Delta z \Delta t^i} \left(\frac{\Psi^i(x, z - \Delta z, t^i)}{\Delta z \Delta t^i} + \frac{\Psi^i(x, z, t^i - \Delta t^i)}{\Delta z \Delta t^i} - \frac{V \Psi^i(x - \Delta x, z, t^i)}{\Delta x^2} - \frac{\Psi^i(x, z - \Delta z, t^i - \Delta t^i)}{\Delta z \Delta t^i} + \frac{V \Psi^i(x - 2\Delta x, z, t^i)}{2\Delta x^2} \right)$$

(21)

Persamaan ini menunjukkan hubungan enam elemen pada *array* [6].

METODOLOGI

Adapun tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3. Tahapan Penelitian

Data masukan adalah data yang telah melalui proses geometri, koreksi statik, *denoising*, *deconvolution*, analisa kecepatan 1, dan koreksi *residual static* 1. Diasumsikan bahwa data masukan merupakan data yang bebas dari *noise*, efek penjaralan gelombang, efek konvolusi dan efek statik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

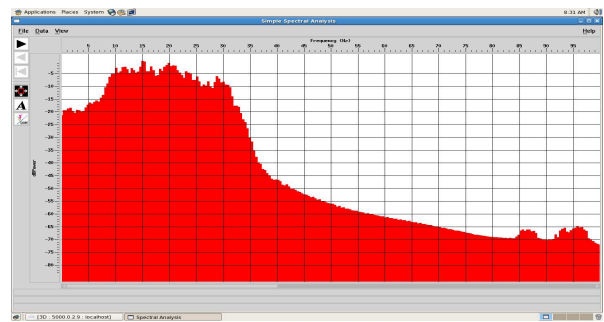
Analisis Hasil Migrasi

• Komponen Frekuensi

Komponen frekuensi adalah hasil kandungan frekuensi pada setiap komponen. Komponen disini merupakan hasil *seismic stack* dengan hasil dari *input Poststack* migrasi, migrasi f-k, migrasi Kirchhoff, dan migrasi Beda Hingga dengan lebar *window* 0 ms hingga 2400 ms.

➤ Migrasi f-k

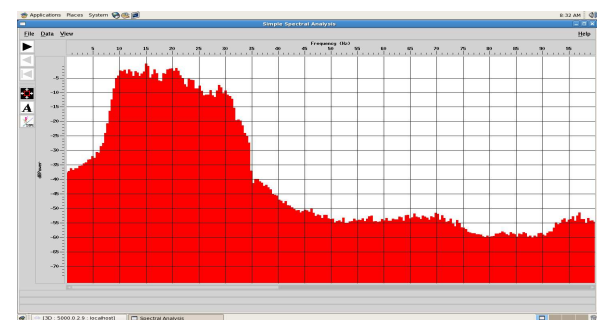
Diperoleh nilai frekuensi yang tepat yaitu pada frekuensi 35 Hz dimana pada frekuensi tersebut optimum untuk migrasi karena sinyal banyak terdapat pada rentang ini. Migrasi f-k meningkatkan energi pada frekuensi rendah yang semula pada kisaran -40 dB *power*, akan tetapi setelah migrasi energi pada frekuensi rendah naik hingga -20 dB *power*.



Gambar 4 *Frequency content* pada migrasi f-k

➤ Migrasi Kirchhoff

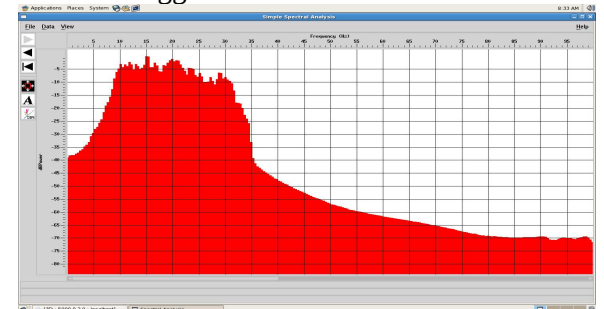
Diperoleh nilai frekuensi yang tepat yaitu pada frekuensi 35 Hz dimana pada frekuensi tersebut optimum untuk migrasi karena sinyal masih banyak terdapat pada rentang ini. Setelah di migrasi, *frequency content* pada migrasi Kirchhoff berubah. Migrasi Kirchhoff tidak terlalu memberikan efek perubahan energi pada frekuensi rendah, terlihat pada *frequency content* migrasi Kirchhoff (gambar 5). Kecenderungan migrasi kirchhoff memunculkan sinyal pada frekuensi tinggi sehingga mengakibatkan kurva pada frekuensi tinggi tidak halus dan memunculkan kembali *noise* pada frekuensi tinggi.



Gambar 5 *Frequency content* pada migrasi Kirchhoff

➤ Migrasi Beda Hingga

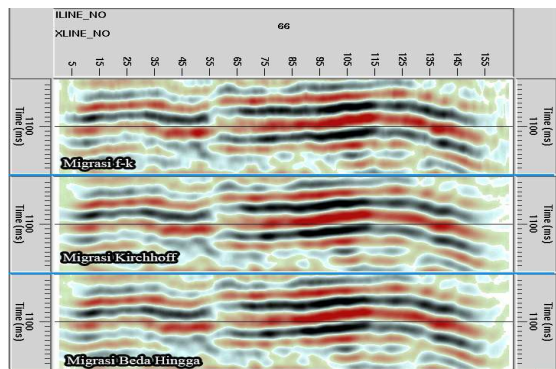
Diperoleh nilai frekuensi yang tepat yaitu pada frekuensi 35 Hz pada migrasi beda hingga. Migrasi beda hingga tidak terlalu merubah kurva pada frekuensi tinggi, sehingga hasil yang diperoleh tidak terlalu memunculkan *noise* frekuensi tinggi.



Gambar 6 *Frequency content* pada migrasi beda hingga

• Hasil Stack

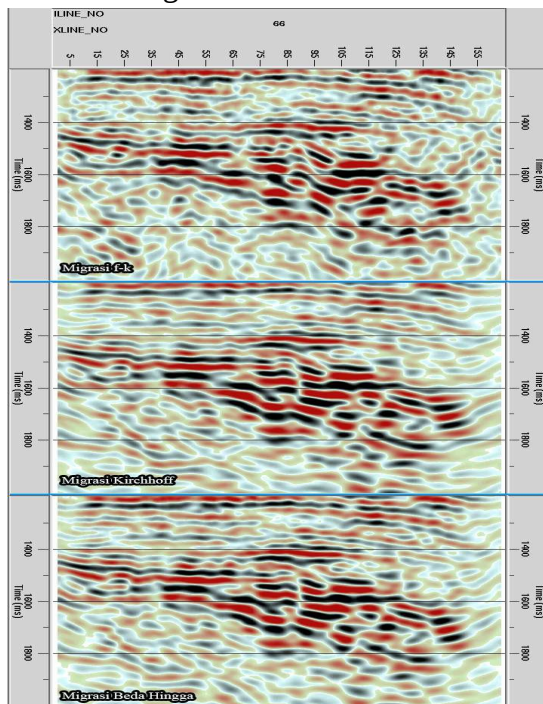
➤ Kontinuitas Reflektor Datar



Gambar 7 Seismic stack density pada window 1000 ms hingga 1200 ms

Hasil seismic stack migrasi memiliki efek migrasi dalam hal gambaran horizon pada bidang reflektor yang lebih datar. Gambar 7 menunjukkan bahwa pada migrasi f-k cenderung terdapat sedikit distorsi pada penggambarannya, migrasi Kirchhoff dan migrasi beda hingga memiliki kenampakan reflektor bidang datar relatif sama. Migrasi Kirchhoff sedikit dapat memisahkan atau memiliki resolusi di atas migrasi Bada Hingga pada penggambaran reflektor yang relatif datar.

➤ Kemiringan



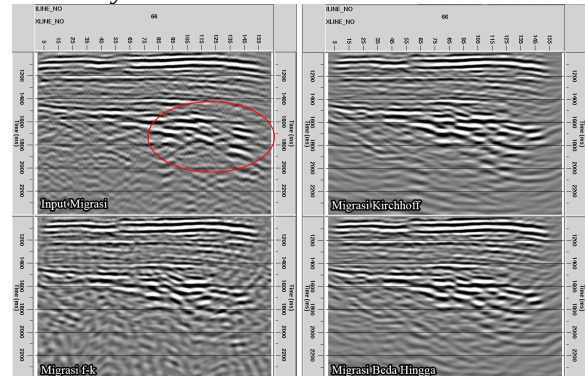
Gambar 8 Seismic stack density pada window 1300 ms hingga 1700 ms

Hasil seismic stack migrasi memiliki efek migrasi dalam hal gambaran reflektor yang miring. Kemiringan reflektor yang digambarkan hasil dari migrasi f-k cenderung kurang dapat menangani variasi kemiringan reflektor. Kontinuitas reflektor miring kurang bagus terlihat kurang konsisten dan cenderung sedikit

putus-putus. Migrasi Kirchhoff mampu menangani reflektor pada bidang miring. Terlihat bahwa variasi kemiringan pada migrasi Kirchhoff yang terlihat pada gambar 8 lebih baik dan resolusinya lebih baik dibandingkan dengan resolusi pada migrasi yang lainnya. Migrasi Bada Hingga juga bagus dalam menangani kemiringan.

➤ Eliminasi Efek Difraksi

Salah satu keunggulan dari metoda migrasi mengeliminasi efek difraksi. Efek difraksi di sini salah satunya adalah *bow tie effect*. *Bow tie effect* muncul akibat adanya kemiringan, patahan, struktur *syncline* dan *anticline*.

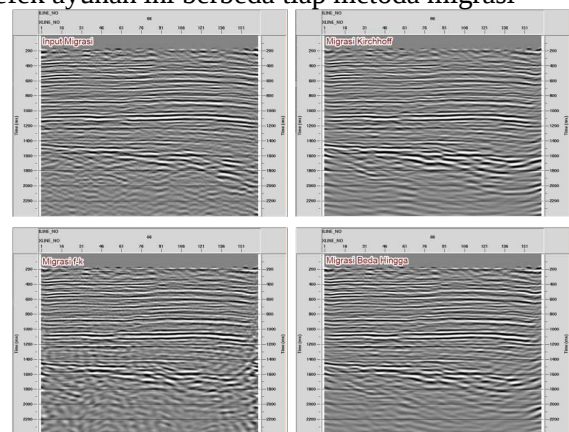


Gambar 9 Seismic stack input migrasi dan hasil tiap migrasi.

Gambar 9 ditunjukkan pada input migrasi bahwa terdapat efek dari penjaralan gelombang yaitu difraksi. Difraksi ini terlihat dari kenampakan *bow tie effect* yang salah satunya terlihat pada kedalaman 1000 ms yang terlihat jelas pada gambar yang dilingkari. Dilihat dari beberapa hasil migrasi, semua migrasi yang dipilih sukses mengeliminasi efek difraksi tersebut.

➤ Smiling Effect setelah Migrasi

Migrasi seismik yang digunakan tidak akan lepas dari munculnya efek samping dalam penggunaannya. Efek ayunan ini akan memunculkan efek tersebut yang dampak dari efek ayunan ini berbeda tiap metoda migrasi



Gambar 10 Seismic stack input migrasi dan efek migrasi pada tiap metoda migrasi

Terlihat pada gambar 10 bahwa sebelum migrasi (*input migrasi*) yang sebelumnya terdapat *bow tie effect* yang cenderung terlihat lengkungan ke bawah, akan tetapi efek tersebut hilang dan kemudian muncul dengan lengkungan ke atas. Efek ini adalah salah satu *noise* yang muncul, dan akan tetapi energi atau kenampakannya berbeda untuk tiap metoda migrasi. Pada migrasi f-k, terlihat kenampakan jelas dan sedikit terputus-putus sehingga mengurangi kualitas data hasil migrasi.

KESIMPULAN

1. Data input migrasi haruslah terhindar dari noise dan efek penjalaran gelombang. Noise pada data seismik lapangan “KDY” yang paling terlihat yaitu *groundroll* yang pada penelitian ini dihilangkan dengan *bandpass filter* dan *fan filter* yang membatasi pada domain frekuensi dan kecepatan. Efek penjalaran gelombang juga dikoreksi dengan pemilihan kecepatan yang tepat kemudian data di-*stack* sehingga diasumsikan data pada *zero offset*.
2. Masing-masing metoda migrasi seismik memiliki beberapa keunggulan dan kelemahan. Akan tetapi, semua metoda migrasi seismik memberikan output yang baik karena tujuan dari migrasi yaitu memindahkan reflektor semu menuju reflektor yang sebenarnya dan menghilangkan efek difraksi.
3. Hasil dari ketiga migrasi yang digunakan (f-k, Kirchhoff, dan Beda Hingga), metoda migrasi seismik yang tepat untuk penampang seismik lapangan “KDY” blok Lemang, Cekungan Sumatra Selatan ini adalah migrasi Kirchhoff. Migrasi Kirchhoff dipilih karena menghasilkan penampang *stack* seismik yang lebih baik dibandingkan dengan metoda migrasi seismik yang lain. Kontinuitas pada reflektor yang datar maupun miring, metoda migrasi kirchhoff menghasilkan kontinuitas lebih baik dari metode lainnya. Akan tetapi migrasi kirchhoff memberikan output yang berbeda pada frekuensi konten. Hal ini diakibatkan karena adanya random noise yang ikut termigrasi sehingga random noise yang memiliki domain frekuensi selain frekuensi dari data akan ikut termigrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Triyoso, Kaswandhi. *Migrasi Pre-Stack Domain Kedalaman (PSDM): Undergraduate Theses*. (Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2007)
- [2] Dye, Alicia Sranfill. *Geophysical Investigation of Subsurface Structure of the Pennsylvanian and Younger Strata Associated with the Inman East Fault, Gallatin County, Illinois*. (Southern Illinois University Carbondale, USA, 2008)
- [3] Bancroft, Jhon C. *Review of Seismic Imaging: Poststack*. (CSEG Recorder, 2001)
- [4] Anonymous, *MIGRATION in practice*, accessed 26/10/2013
<http://www.xsgeo.com/course/mig.htm#kirkp>
- [5] Yuan, Yijun, Yuan Gao, Liying Bai, dan Zhanzu Liu. *Prestack Kirchhoff time migration of 3D coal seismic data from mining zones*. *Geophysical Prospecting*, 59, 455-463, (2011)
- [6] Sheriff, R.E. and Geldart, Lloyd P. *Exploration Seismology*. (Cambridge University Press, USA, 1995)