

## Efek Keberadaan Jebakan Minyak Bumi 'Trapped Fault' Pada Rekaman Seismik dengan Penyelesaian Beda Hingga Model Bumi Elastik

Eddy Hartantyo, Waluyo dan Wiwit Suryanto

Lab Geofisika, FMIPA, Universitas Gadjah Mada Sekip Utara, PO Box Bls 21, Yogyakarta 55281  
e-mail: [hartantyo@ugm.ac.id](mailto:hartantyo@ugm.ac.id)

### Abstrak

Pemodelan rekaman data seismik di permukaan akibat keberadaan hidrokarbon (HC) murni yang terjebak pada berbagai model struktur telah dilakukan. Pemodelan menggunakan persamaan gelombang elastik untuk kasus 2 dimensi (P-SV) model yang diselesaikan dengan persamaan beda hingga terpusat. Syarat Dirichlet menggunakan bidang redam pada sisi kiri, kanan dan bawah. Sebagai sumber titik, digunakan fungsi Gauss baik pada evolusi waktunya dan evolusi spasialnya. Model struktur yang ditampilkan adalah model 'fault trap' yang mengandung HC dan tidak.

Hasil evolusi waktu menunjukkan bahwa pada komponen horisontal terlihat penjarangan pada arah-x, dan pada komponen vertikal adalah penjarangan pada arah-z. Hal ini disebabkan karena fungsi sumber diterapkan pada komponen stress  $xx$  dan  $zz$ , sehingga hanya komponen transversal (gelombang P) saja yang merambat. Hasil pengurangan rekaman data di permukaan untuk model ber HC dan tidak menunjukkan bahwa pengaruh hidrokarbon sangat signifikan terhadap terjadinya banyak fase gelombang baru akibat yang terpantul dan terbiaskan oleh model strukturnya.

Kata kunci: Modelling HC, beda hingga, perambatan gelombang elastik

### Abstract

*Recorded surface seismic data modeling of pure existing hydrocarbon (HC) which trapped at many structural traps have been conducted. It using elastic wave equation for 2 dimensional (P-SV) model which solved by centered finite difference. Dirichlet boundary conditions are damped area at left, right and bottom part. Gauss function was used for point source at time and space evolutions. Deployed structural model in this paper are fault trap models consist of HC and without HC.*

*Time evolved result shows wave propagation in x-direction at horizontal velocity components and vice versa for vertical components. It caused by source application to  $xx$  and  $zz$  stress components, therefore only transversal components (P wave) was propagated. Substraction of seismic records on HC model with non HC model shows a high significance of new phase-wave emerge from structural model reflections and refractions.*

*keywords: HC modeling, finite difference, elastic wave propagation*

## Pendahuluan

Minyak dan gas bumi (hidrokarbon) yang berada di dalam tanah tersimpan pada pori-pori batuan jauh di bawah tanah yang terlindungi oleh lapisan kedap, yang disebut sebagai rumah minyak (reservoir). Keberadaan rumah minyak dipengaruhi oleh 2 (dua) jenis; yaitu rumah minyak akibat proses struktur (jebakan struktur) dan akibat proses stratigrafi (jebakan stratigrafi). Dalam eksplorasinya, metode seismik yang merupakan metode yang tertinggi resolusinya berusaha memetakan dan menggambarkan jebakan-jebakan tersebut.

Akibat adanya pori-pori, minyak atau gas bumi, air tanah, suhu dan tekanan tinggi dalam rumah minyak ini, menyebabkan adanya kontras yang sangat signifikan antara sifat gelombang elastis ( $V_p$ ,  $V_s$  dan densitas) reservoir dan batuan disekelilingnya. Pemetaan sifat-sifat elastisitas ini yang menjadi target akhir eksplorasi seismik, untuk dapat membantu ahli geologi menceritakan dan menjelaskan konsep perkembangan, pematangan dan migrasi hidrokarbon menuju ke reservoir yang baru.

Dalam upaya penentuan posisi dan geometri jebakan hidrokarbon, diperlukan sebuah teknik perhitungan maju untuk mengetahui perubahan sifat gelombang seismik yang lewat di dalamnya. Teknik ini nantinya akan berguna untuk memverifikasi model kecepatan/impedansi akustik – elastik yang dihasilkan dari proses inversi gelombang seismik.

Dalam memodelkan gelombang bidang, Higdon (1991) dan Cerjan et al (1985) menggunakan gelombang kosinus secara analitik untuk mempelajari perambatan gelombang dan uji coba efek redaman dalam model beda hingga (finite different). Sedangkan beberapa penulis buku teks (misal Lay and Wallace, 1995 dan Aster, 2000) menggunakan gelombang bidang periodik untuk menyelesaikan secara analitik pantulan dan biasan gelombang bidang tersebut dalam medium elastik dan bertopografi datar.

Beberapa peneliti yang lain, misal Janod and Coutant (2000) menganalisis polarisasi gelombang S pada sumbu  $y$  dengan menggunakan sumber fungsi Ricker. Analisis ini digunakan untuk menyelesaikan masalah bidang batas pada persamaan elemen hingga (*finite element*). Gelombang bidang analitik ini juga dipergunakan oleh Komatisch dan Villote (1998) untuk medium yang bertopografi dengan menggunakan permukaan gaussian 2D dan 3D.

Formulasi gelombang yang digunakan dalam penelitian ini nantinya sesuai dengan metode beda hingga yang dikembangkan oleh Hartantyo (2007a) berbasis pemodelan beda hingga untuk gelombang elastik (Virieux, 1986). Metode tersebut kemudian telah diuji coba dengan menggunakan medium Poisson solid oleh Hartantyo (2007b). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa luasan medium yang diperlukan akan dipengaruhi oleh besarnya sudut datang gelombang bidangnya, agar tidak terjadi kesalahan amplitudo akibat adanya daerah yang tidak terlewati gelombang (*uncaught area*).

Salah satu penulis yang membuat model model bertopografi gunung 3D dengan metode beda hingga adalah Ripperger (2001). Model ini menggunakan sumber gelombang titik pada beberapa kedalaman dan melihat efek scattering akibat perubahan topografi. Persamaan-persamaan yang disusun, terutama syarat batas permukaan topografi mesh, hanya disusun khusus untuk model gunung tersebut. Pendekatan yang sama juga dipergunakan oleh Hartantyo, 2008 namun persamaan yang ada di-generalisasi-kan, sehingga dapat dipergunakan untuk berbagai macam topografi.

Persamaan elastodinamik P-SV (2dimensi) yang merupakan persamaan gelombang elastik melibatkan vektor stress dan pergeseran yang dirumuskan sebagai (Virieux, 1986):

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \\ \tau_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \tau_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}, \\ \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)\end{aligned}\quad (1)$$

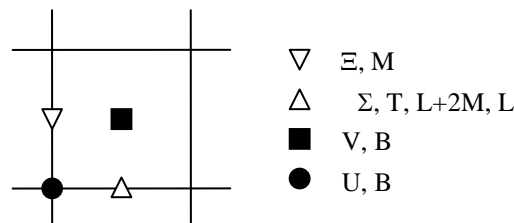
dalam persamaan (1) tersebut,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{zz}$ ,  $\tau_{xz}$  merupakan stress tensor,  $\rho(x,z)$  adalah rapat massa dan  $\lambda(x,z)$  dan  $\mu(x,z)$  adalah koefisien Lamé. Persamaan tersebut dapat ditransformasikan menjadi persamaan vektor kecepatan-stress dalam sistem hiperbolik orde pertama sebagai;

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} &= b \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= b \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x}, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} &= \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right).\end{aligned}\quad (2)$$

Dalam persamaan tersebut,  $(v_x, v_z)$  merupakan vektor kecepatan,  $b(x,z)$  adalah ke'ringan'an (*lightness*) atau keapungan (*buoyancy*) yang merupakan seper massa jenis.

### Metodologi

Pada kondisi awal, medium dianggap berada pada keadaan setimbang (pada  $t=0$ ) yakni stress dan kecepatan bernilai nol disetiap titik. Berdasarkan kondisi awal tersebut, penjalaran stress dan kecepatan akan sebanding dengan penjalaran 'stress ter-integrasi waktu' dan pergeseran. Model yang sesuai untuk evolusi waktu dan ruang persamaan ini (Virieux, 1986) adalah grid berundak (*staggered grid*). Grid tersebut dapat dilihat pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Posisi node untuk kecepatan arah x, y (U dan V) serta Buoyancy (B), berbeda dengan posisi node untuk stress arah xx, zz, xz ( $\Sigma$ ,  $\Xi$  dan T) serta konstanta elastisitasnya.

Perbedaan utama staggered grid ini dengan grid FD yang lain bahwasanya posisi vektor kecepatan tidaklah sama antara  $v_x$  dan  $v_z$ . Persamaan numerik berdasarkan gambar 1 adalah;

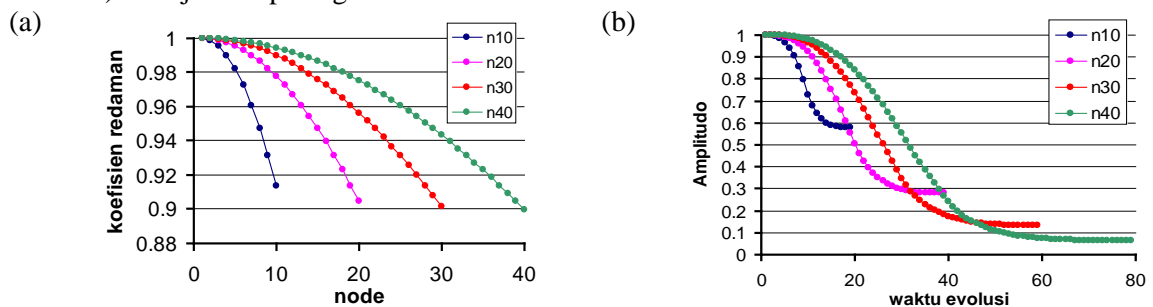
$$\begin{aligned}
 U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} &= U_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + B_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \Sigma_{i+\frac{1}{2},j}^k - \Sigma_{i-\frac{1}{2},j}^k \right) + \\
 &\quad B_{i,j} \frac{\Delta t}{\Delta z} \left( \Xi_{i,j+\frac{1}{2}}^k - \Xi_{i,j-\frac{1}{2}}^k \right) \\
 V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} &= V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + B_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \Xi_{i+1,j+\frac{1}{2}}^k - \Xi_{i,j+\frac{1}{2}}^k \right) + \\
 &\quad B_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta z} \left( T_{i+\frac{1}{2},j+1}^k - T_{i+\frac{1}{2},j}^k \right) \\
 \Sigma_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} &= \Sigma_{i+\frac{1}{2},j}^k + (L + 2M)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( U_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + \\
 &\quad L_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( V_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \\
 T_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} &= T_{i+\frac{1}{2},j}^k + (L + 2M)_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( V_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + \\
 &\quad L_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( U_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \\
 \Xi_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1} &= \Xi_{i,j+\frac{1}{2}}^k + M_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( U_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + \\
 &\quad M_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( V_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right)
 \end{aligned}$$

Pada persamaan tersebut,  $k$  adalah indeks diskritisasi waktu,  $i$  adalah diskritisasi arah  $x$ , dan  $j$  diskritisasi arah  $z$ .  $\Delta t$  merupakan step grid waktu, sedangkan  $\Delta x$  dan  $\Delta z$  adalah step grid bidang (pada tulisan ini dimodelkan  $\Delta x = \Delta z$ ). Pada persamaan tersebut, kecepatan numerik  $(U, V) = (v_x, v_z)$  pada waktu  $(k + \frac{1}{2})\Delta t$  dan stress numerik  $(\Sigma, \Xi, T) = (\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz})$  pada waktu  $(k + 1)\Delta t$  dihitung secara eksplisit dari kecepatan pada waktu  $(k - \frac{1}{2})\Delta t$  dan stress pada waktu  $k\Delta t$ .  $B$  menunjukkan keapungan (*buoyancy*) di dalam medium dan  $L, M$  menunjukkan konstanta Lamé ( $\lambda, \mu$ )

Sedangkan dalam syarat batasnya, batas-batas internal medium tidak ditentukan secara eksplisit karena berada dalam formulasi homogen. Batas tersebut ditunjukkan oleh perubahan parameter elastik dan massa jenisnya secara alami seperti dalam formulasi tak-homogen. Syarat batas Neumann (*stress free/zero stress*) diterapkan pada permukaan medium, sedangkan ketiga batas lainnya (kiri, kanan dan bawah) menggunakan teknik daerah teredam (*damped area*).

### Hasil dan Pembahasan

Besarnya koefisien redaman untuk empat contoh lebar bidang redaman ( $n=10, n=20, n=30$  dan  $n=40$ ) ditunjukkan pada gambar 2a berikut.



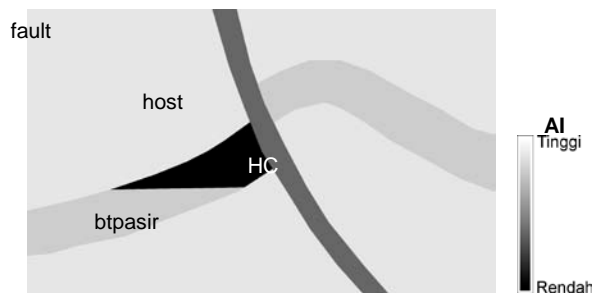
Gambar 2. Grafik koefisien redaman menggunakan lebar redaman  $n = 10-40$  (a), dan penurunan amplitudo ternormalisasi akibat penjarangan masuk ke dalam daerah redaman sesuai dengan lebar bidang redamannya (b)

Sedangkan dalam implementasinya, bidang redam harus diatur sedemikian rupa sehingga bidang tersebut dapat meredam stress yang menuju ke bidang batas kanan, kiri dan bawah dan dapat memenuhi syarat batas Dirichlet. Apabila terdapat gelombang stress yang masuk ke salah satu sisi bidang redam, maka amplitudonya akan meluruh sesuai fungsi koefisien redamnya. Gambar 2b menunjukkan besarnya amplitudo ternormalisasi input dari suatu gelombang stress yang masuk tegak lurus bidang redam. Terlihat bahwa untuk  $n = 10$ , energi yang terpantulkan masih cukup besar yaitu sekitar 60% dan berturut turut sekitar 30%, 14% dan 7% untuk  $n=20, 30$  dan 40. Nilai redaman  $n=40$  dinilai cukup baik untuk meredamkan gelombang yang masuk.

Sumber yang digunakan dalam pemodelan ini adalah fungsi gauss yang diaplikasikan terhadap stress, sehingga bentuk wavelet yang dihasilkan nantinya adalah differensial gauss dan ricker wavelet. Dalam aplikasi eksitasi sumber getarnya, sesuai dengan desain sebelumnya, sumber getar menggunakan fungsi Gauss yang diterapkan kepada stress  $\tau_{xx}$  dan  $\tau_{zz}$ , dalam kawasan waktu,  $t$ .

Namun, dalam implemetasinya di dalam medium, eksitasi sumber getar yang diterapkan secara langsung pada satu titik *node* akan memberikan artefak khususnya dalam penjaralannya sebagai fungsi ruang  $(x, z)$ . Oleh karena itu, untuk mengatasi artefak tersebut, dipergunakan fungsi gauss dalam bidang 2D yang mewakili satu titik *node* untuk sumber getarnya.

Model '*trapped fault*' merupakan model struktur patahan yang digambarkan dengan zona remukan patahan yang memotong antiklin batupasir. Skenario yang dipergunakan bawah patahan ini bersifat impermeabel sehingga dapat menyekat aliran fluida hidrokarbon yang menjalar menuju ke permukaan antiklin.



Gambar 3. Struktur patahan yang memotong batupasir antiklin. Batupasir yang terpotong patahan mengandung hidrokarbon (sealed fault trap)

Parameter kecepatan dan densitas medium dalam model ini dapat dilihat pada tabel berikut;

	Greyscale	Vp	Vs	rho
host	229	2916	2062	2.26
batupasir	204	2816	1991	2.21
fault	102	2408	1703	2.00
HC	0	2000	1414	1.80

Parameter komputasi yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut;

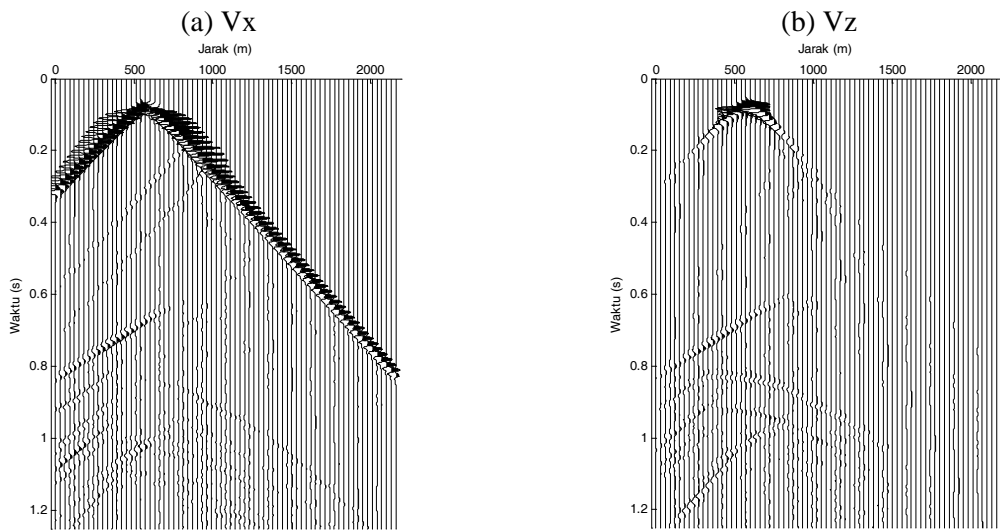
Parameter	Nilai
Banyak node sumbu-x [int], <i>nx</i>	1106
Banyak node sumbu-z [int], <i>nz</i>	672
Waktu maksimum [int], <i>nt</i>	2500
Spasi grid, <i>dx</i> (m)	2 m

Interval waktu evolusi, $dt$	0.5ms
Orde differensiasi	2
Lebar daerah absorpsi [int]	40
Posisi Sumber $x$ [int]	300
Posisi Sumber $z$ [int]	50
Frekuensi dominan sumber	30 Hz
Sample pengambilan gambar [int]	50
Posisi Geophone Perekam	Node $z$ ke-3, setiap $dx$

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa panjang gelombang terpendek sekitar 45 meter, sehingga dengan menggunakan spasi antar grid sebesar 2m, akan diperoleh banyak titik adalah 22 titik per panjang gelombang. Nilai ini disara cukup untuk membentuk gelombang yang tak terganggu oleh perubahan fase gelombang.

Rekaman data dipermukaan terlihat pada gambar 4. Gambar (a) menunjukkan kecepatan pada komponen horisontal ( $x$ ) dan gambar (b) menunjukkan komponen vertikal ( $z$ ). Pada komponen vertikal, dominasi gelombang awal terjadi karena efek penguatan akibat adanya zona *free-surface* (permukaan), sedangkan pada komponen horisontalnya perambatan sumber di dekat permukaan menyebabkan dominasi amplitudo mirip seperti gelombang langsung yang cukup besar.

Pada gambar ini, efek keberadaan zona hidrokarbon relatif tidak kelihatan, namun efek ini terjadi setelah waktu evolusi berjalan hingga 0.5 detik, karena anomali kecepatan hidrokarbon ini cukup dalam

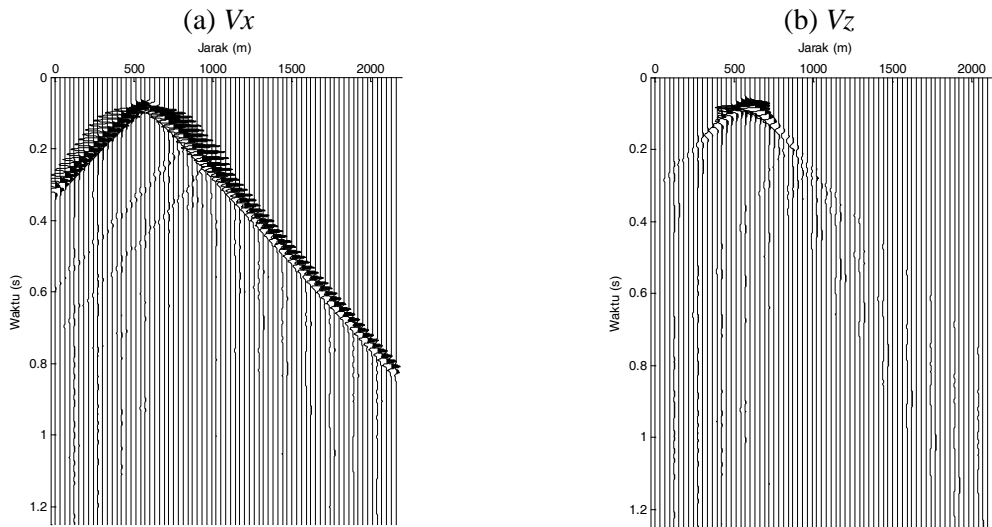


Gambar 4. Rekaman data seismik di permukaan dengan spasi antar geophone 20m pada komponen horisontal (a) dan vertikal (b).

Model perbandingan yang digunakan adalah sama dengan modela pada gambar 3, hanya tidak terdapat hidrokarbon. Parameter kecepatan medium, densitas, dan komputasinya juga sama dengan tabel di atas.

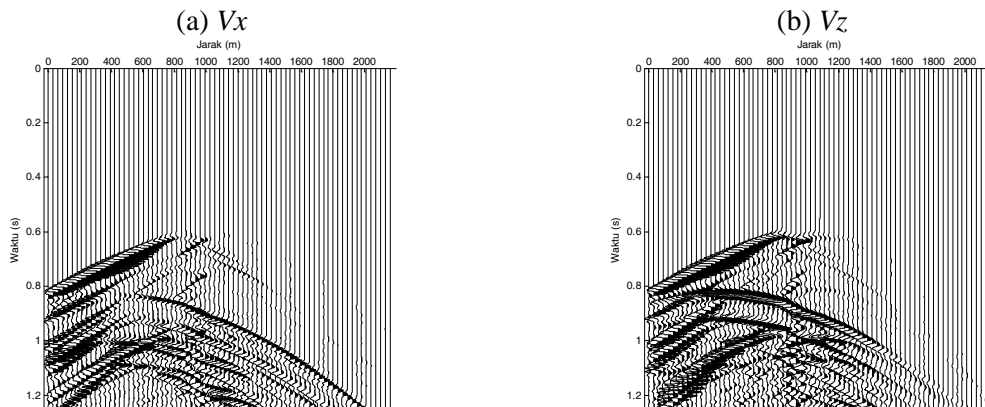
Setelah proses evolusi gelombangnya, rekaman geophone di permukaan terlihat pada gambar 5. Gambar 5a adalah rekaman kecepatan getar pada komponen horisontal ( $x$ ) dan gambar 5b adalah rekaman komponen vertikalnya ( $z$ ). Pada gambar ini dapat ditunjukkan bahwa amplitudo gelombang terlihat menjalar ke arah horisontal dan mengalami pantulan pada bidang patahan (*fault*). Sedangkan pada komponen vertikalnya, gambar yang diperoleh hampir sama dengan

gambar model sebelumnya, dengan beberapa perbedaan khususnya pada waktu rekaman setelah 0.5 detik.



Gambar 5. Rekaman data seismik di permukaan dengan spasi 20m. Gambar kiri (a) adalah komponen horisontal, dan gambar kanan (b) adalah komponen vertikal.

Efek HC pada sisa model dapat terlihat jelas setelah dilakukan pengurangan rekaman geophone dari gambar 4 dengan gambar 5. Nampak bahwa efek keberadaan minyak nampak pada waktu sekitar 0.6 detik. Terlihat bahwa bentuk gelombang akibat HC memiliki kemiripan antara komponen vertikal dan horizontalnya, dengan ditandai oleh 'trough' pada lereng kiri dan beberapa fase minor pada lereng kanan.



Gambar 6. Rekaman data seismik yang menunjukkan efek hidrokarbon saja pada medium struktur antiklin terpatahkan.

Data tersebut menunjukkan bahwa pengaruh HC sangat signifikan terhadap gelombang multipel yang muncul dari keberadaan HC tersebut. Berdasar analisis dengan model lain yang lebih sederhana (model antiklin dengan puncak terdapat HC), juga diperoleh beberapa fase gelombang akibat struktur dan kombinasinya dengan keberadaan HC.

## Kesimpulan

Pemodelan dengan substraksi rekaman seismik model berHC dan tidak menunjukkan bahwa pengaruh keterdapatannya HC pada berbagai jebakan struktur memberikan respon yang cukup signifikan terhadap data final, yang sangat dipengaruhi oleh kompleksitas struktur host-nya. Pemodelan ini memberikan gambaran riil terhadap kelakuan gelombang elastik yang didominasi perubahan fase gelombang P dan S.

## Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada LPPT UGM atas pemberian dana hibah penelitian berbasis komputasi tahun 2008, dan Lab Geofisika, FMIPA atas support peralatannya.

## Daftar Pustaka

- Aki, K. And Richard, P.G., 1980, Quantitative Seismology: Theory and Methods, vol.1, W.H. Freeman, New York.
- Aster, R., 2000, Plane waves in layered media, [www.ees.nmt.edu/Geop/Classes/GEOP523/Docs/layered.pdf](http://www.ees.nmt.edu/Geop/Classes/GEOP523/Docs/layered.pdf)
- Cerjan, C., Koslov, D., Koslof, R., & Reshef, M., 1985. A no reflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *Geophysics*, 50, 705-708.
- Hartantyo, E., 2008, Pemodelan Beda hingga Gelombang Teleseismik 2D pada topografi Gunung Merapi, paper koleksi pribadi, belum dipublikasikan.
- Hartantyo, E., 2007a, Arbitrarily dip seismic plane wave source generation on 2D staggered grid scheme: A new method, *Proceeding of The 4th Kentingan Physics Forum, UNS, Solo*.
- Hartantyo, E., 2007b, A Verification of plane wave implementation on finite volume poisson solid medium, *Proceeding Jogja Regional Physics Conference (JRPC), FMIPA, UGM*
- Higdon, R.L., 1991, Absorbing boundary conditions for elastic waves, *Geophysics*, v56, p231-241.
- Janod, F. and Coutant, O., 2000, Seismic response of three dimensional topographies using a time domain boundary element method, *Geophys. J. Int.*, v142, 603-614.
- Komatich, D. & Vilotte, J.P., 1998. The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 368-392.
- Lay, T., and Wallace, T.C., 1995, *Modern Global Seismology*, Academic Press, California
- Ripperger, J., 2001, volcano topography in 3D seismic wave simulation, Diploma thesis, Institute of Geophysics, LMU, not published.
- Virieux, J. 1986. Velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51, 889-901.