

*Skripsi Geofisika*

**PENINGKATAN KUALITAS PENAMPANG SEISMIK  
MENGUNAKAN *TRAVEL TIME TOMOGRAPHY* PADA  
*AREA SHALLOW GAS***



**OLEH**

**ASRIANI**

**H221 16 014**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2020**

**PENINGKATAN KUALITAS PENAMPANG SEISMIK  
MENGUNAKAN *TRAVEL TIME TOMOGRAPHY* PADA  
*AREA SHALLOW GAS***



**OLEH  
ASRIANI  
H221 16 014**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2020**

**PENINGKATAN KUALITAS PENAMPANG SEISMIK  
MENGUNAKAN *TRAVEL TIME TOMOGRAPHY* PADA  
*AREA SHALLOW GAS***

Skripsi ini untuk melengkapi tugas-tugas dan memenuhi syarat untuk mencapai  
gelar sarjana



**OLEH:  
ASRIANI  
H221 16 014**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2020**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**“PENINGKATAN KUALITAS PENAMPANG SEISMIK  
MENGUNAKAN *TRAVEL TIME TOMOGRAPHY* PADA AREA  
*SHALLOW GAS*”**

Oleh:

**ASRIANI**

**H221 16 014**

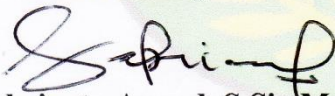
**SKRIPSI**

**Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Ujian Guna Memperoleh Gelar Sarjana  
Sains Program Pendidikan Sarjana, Departemen Geofisika Ini  
Telah Disetujui Oleh Tim Pembimbing Pada Tanggal  
Seperti Tertera di Bawah Ini**


Disetujui Oleh :

**Makassar, 30 November 2020**

**Pembimbing Utama**

  
**Sabrianto Aswad, S.Si., M.T.**  
**NIP. 197805242005011002**

**Pembimbing Pertama**

  
**Dr. Erfan, M.Si.**  
**NIP. 196709032001121001**

**Mengetahui,**

**Ketua Departemen Geofisika**

  
**Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng**  
**NIP. 196709291993031003**

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Asriani

NIM : H22116014

Departemen : Geofisika

Judul TA : Peningkatan Kualitas Penampang Seismik Menggunakan

*Travel Time Tomography Pada Area Shallow Gas*

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan dan penelitian saya sendiri, kecuali arahan Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, 27 November 2020

Yang Membuat Pernyataan,



Asriani

## ABSTRAK

Pengolahan data seismik menjadi hal yang sangat penting karena menyiapkan data agar menghasilkan penampang seismik yang baik. Penentuan model kecepatan yang tepat dari *near surface* adalah langkah yang penting dalam pengolahan data seismik dan *depth imaging*. *Travel Time Tomography* adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan struktur atau model kecepatan yang tepat. Metode ini dilakukan berdasarkan variasi waktu tempuh gelombang yang menjalar dari sumber ke penerima. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan variasi kecepatan khususnya *low velocity* di daerah yang dangkal. Data yang digunakan sebagai input pada metode ini adalah waktu kedatangan tercepat dari gelombang yang pertama kali diterima oleh receiver. Pengolahan data dilakukan di software Geovation dan untuk proses migrasi dilakukan di software Omega. Pada penelitian ini dilakukan tiga tes parameter yaitu tes menggunakan offset yang berbeda, tes *smooth*, dan *N layer refraction test*. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa *travel time tomography* dapat memperbaiki model kecepatan dan mencitrakan *low velocity* pada daerah yang dangkal dan juga data hasil migrasi menampilkan struktur geologi yang semula tidak menyambung menjadi lebih jelas dan teratur.

Kata Kunci: *Low velocity*; Migrasi; Tomografi; Waktu tempuh

## **ABSTRACT**

*Seismic data processing is very important because it prepares data to produce a good seismic section. The determination of the correct velocity structure of the near surface is a crucial step in seismic data processing and depth imaging. Travel Time Tomography is a method that can be used to obtain an accurate velocity model. Application of this method based on variation of travel time seismic wave propagation from source to receiver. The purpose of this research is to describe the variation in velocity, especially low velocity in shallow areas. First arrival travel time data that received by each receiver is used as the input data in this method. Data processing carried out using Geovation software and for the migration process carried out using Omega software. In this research, three parameter tests were carried out, that is the test using different offsets, the smooth test, and N layer refraction test. The results showed that travel time tomography can improve the velocity model and image low velocity in shallow areas and also the data from the migration process shows a better geological structure.*

*Keywords: Low velocity; Migration; Tomography; Travel time*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis hanturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas Rahmat-Nya maka Penulis dapat menyelesaikan penyusunan Skripsi dengan judul: *Peningkatan Kualitas Penampang Seismik Menggunakan Travel Time Tomography Pada Area Shallow Gas*. Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu tugas dan persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains di Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin. Dalam penulisan skripsi ini, masih terdapat beberapa kekurangan baik pada teknis penulisan maupun materi. Hal ini dikarenakan keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh Penulis. Untuk itu, kritik dan saran dari semua pihak sangat Penulis harapkan sebagai pembelajaran kedepannya. Dalam penyusunan skripsi ini juga, Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi serta mewarnai kehidupan penulis dari mahasiswa baru hingga memperoleh gelar Sarjana Sains, khususnya kepada:

1. Ibunda tercinta Murni dan Ayahanda Abd.Azis dan yang dengan senang hati dan tulus membesarkan Penulis hingga memperoleh gelar Sarjana Sains, serta selalu mendukung Penulis beraktivitas di Kampus baik dalam bidang Akademik maupun Organisasi.
2. Adikku tercita Nurul Mahrifa Damayanti. Terima kasih atas segala bantuan dan do'anya.
3. Bapak Sabrianto Aswad, S.Si.,MT., selaku pembimbing utama Penulis yang dengan sabar dan tulus membimbing, mengajar, dan menasihati Penulis untuk



menyelesaikan skripsi ini dengan sangat baik. Terima kasih atas segala ilmu yang telah Bapak berikan kepada Penulis.

4. Bapak Dr. Erfan, M.Si selaku pembimbing pertama yang dengan senang hati membimbing dan mengarahkan penulis demi terselesaikannya skripsi ini.
5. Mas Ginanjar Saputra (Mas Gigin), selaku pembimbing penulis selama melaksanakan penelitian di PT. Elnusa Tbk, yang selalu meluangkan waktu ditengah kesibukannya untuk membimbing penulis walaupun di tengah pandemi Covid-19.
6. Bapak Dr. Muhammad Hamzah, S.Si, MT dan Dra. Maria, M.Si selaku penguji penulis yang telah memberikan saran dan masukan terhadap penyempurnaan skripsi ini dan secara tidak langsung membekali penulis dengan berbagai ilmu selama proses seminar dan ujian sidang.
7. Bapak Bambang Widiatmoko selaku Manager divisi GDP yang telah memberikan kesempatan untuk dapat melaksanakan Kerja Praktek dan Tugas Akhir di PT. Elnusa Tbk dan terima kasih atas bantuannya selama penulis di Jakarta, semoga Allah membalas kebaikan bapak dan keluarga.
8. Mba Sinta, Mba uti, Mas Anhar, dan pegawai Elnusa lainnya yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dan bersedia memberi masukan ketika penulis mengalami kendala dalam mengerjakan data penelitian.
9. Mba Ana, Mba Nasa, Mba Yuyun, dan Mas Roy yang telah membantu keperluan penulis ke Makassar di tengah pandemi covid-19. Terima kasih

atas bantuannya baik itu dalam bentuk moril maupun material. Semoga Allah senantiasa membalas kebaikan mba dan mas semua.

10. Bapak Dr. Paharuddin, M.Si, selaku dosen Pembimbing akademik yang senantiasa memberi saran dan masukan dalam proses pemilihan mata kuliah sesuai dengan konsentrasi yang penulis pilih.
11. Dosen-dosen pengajar yang telah membagikan ilmunya serta memberi bimbingan selama perkuliahan.
12. Para staff Departemen maupun Fakultas yang telah banyak membantu hingga terselesaikannya skripsi ini.
13. Marhaeni dan Riana Trisartika, terima kasih untuk selalu ada menemani penulis dalam keadaan apapun. Terima kasih atas supportnya dan jangan lelah untuk selalu bertukar kabar dengan penulis.
14. Saudara seperjuangan Geofisika 2016 (16neous) Iksan, Sadilah, Mappi, Dewi, Wasti, Santri, Mira, Golla, Iis, Ria, Shabran, Retno, Uni, Tari, Debby, Kasma, Nurita, Mufly, Abdi, William, Raxy, Cica, Agung, Aus, Fara, Wiwi, Ervin, Hamdah, Fazrul, Dian, Athaya, Diat, Ninda, Depi, Leo, Syarwan, Aso, Ari, Adit, Ayyub, Ulla, Cinang, Oland, dan Lia. Terima kasih atas segala cerita indah selama di bangku perkuliahan.
15. Indra dan Alam. Terima kasih karena telah banyak membantu dalam menyelesaikan rumus dan kendala-kendala dalam pengerjaan skripsi penulis.
16. Teman-teman KKN Desa Popo, Cici, Iqbal, Arif, Ria, dan Egi terima kasih karena telah memberi warna dan cerita di KKN penulis. Penulis sangat bersyukur bertemu dengan kalian.

17. Keluarga besar HIMAFI FMIPA UNHAS, terima kasih banyak atas kebersamaannya dengan penulis selama penulis menjadi mahasiswa Strata 1 di Universitas Hasanuddin. Segala proses kelembagaan yang pernah penulis jalani akan selalu penulis ingat.
18. Teman-teman SPE Unhas SC, terima kasih atas kebersamaannya menjalani kegiatan yang sangat berkesan serta sharing ilmunya yang sangat bermanfaat.

Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Harapan penulis, semoga skripsi ini dapat berguna bagi banyak orang.

Makassar, 27 November 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENUNJUK SKRIPSI</b> .....	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACK</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
I.4 Tujuan Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
II.1 <i>Shalllow Gas</i> .....	5
II.2 Prinsip Dasar Perambatan Gelombang .....	6
II.2.1 Hukum Snellius .....	6
II.2.2 Prinsip Fermat.....	7
II.2.3 Prinsip Huygens.....	8
II.3 Seismik Refraksi <i>Travel Time</i> Tomografi .....	8
II.4 Penelusuran Sinar (Ray Tracing) .....	10

II.5 Metode Inversi <i>Least Square</i> .....	13
II.6 Migrasi Seismik.....	16
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>19</b>
III.1 Waktu dan Lokasi Penelitian .....	19
III.2 Data .....	19
III.3 Tahapan Penelitian .....	21
III.3.1 Persiapan Data .....	21
III.3.2 Pembuatan Database .....	21
III.3.3 <i>Picking First Break</i> .....	21
III.3.4 Seismik Refraksi <i>Travel Time Tomography</i> .....	22
III.3.5 Migrasi Seismik .....	24
III.4 Bagan Alir Penelitian .....	25
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>26</b>
IV.1 Analisis <i>Velocity Model</i> .....	26
IV.1.1 Analisis <i>Velocity Model</i> dengan Offset Berbeda .....	26
IV.1.1 Analisis <i>Velocity Model</i> dengan Smooth .....	27
IV.1.1 Analisis <i>Velocity Model N Layer Refraction Test</i> .....	30
IV.1.1 Analisis Hasil Produksi <i>Velocity Model</i> .....	31
IV.2 Analisis Hasil Migrasi PSDM.....	33
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>36</b>
V.1 Kesimpulan .....	36
V.2 Saran.....	36
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>38</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>41</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Ilustrasi migrasi gas dari bawah permukaan menuju ke <i>near surface</i>	6
<b>Gambar 2.2</b> Penjalaran Gelombang Melewati Dua Medium .....	6
<b>Gambar 2.3</b> Prinsip Fermat.....	7
<b>Gambar 2.4</b> Prinsip Penjalaran Gelombang Huygens .....	8
<b>Gambar 2.5</b> Metode penjalaran gelombang dengan menggunakan prinsip Vidale	12
<b>Gambar 2.6</b> Diagram Alir Rekonstruksi Tomografi Menggunakan metode LSQR	16
<b>Gambar 2.7</b> Prinsip Migrasi.....	18
<b>Gambar 3.1</b> Shot Map Data Penelitian .....	19
<b>Gambar 3.2</b> Receiver Map.....	20
<b>Gambar 3.3</b> <i>Picking First Break</i> .....	22
<b>Gambar 4.1</b> Model Kecepatan dengan Offset 2000 .....	27
<b>Gambar 4.2</b> Model Kecepatan dengan Offset 3170 .....	27
<b>Gambar 4.3</b> Model Kecepatan tanpa smooth.....	28
<b>Gambar 4.4</b> Model Kecepatan dengan smooth 100 meter.....	28
<b>Gambar 4.5</b> Model Kecepatan dengan smooth 500 meter.....	29
<b>Gambar 4.6</b> Model Kecepatan dengan smooth 1000 meter.....	29
<b>Gambar 4.7</b> Model Kecepatan dengan $N=2$ .....	30
<b>Gambar 4.8</b> Model Kecepatan dengan $N=3$ .....	30
<b>Gambar 4.9</b> Initial Model Kecepatan Akhir .....	32
<b>Gambar 4.10</b> Model Kecepatan akhir.....	32
<b>Gambar 4.11</b> RMS Error pada setiap pembaharuan model (iterasi).....	33
<b>Gambar 4.12</b> <i>Initial Velocity Model</i> .....	33

<b>Gambar 4.13</b> <i>Intial Depth Migrated Section</i> .....	33
<b>Gambar 4.14</b> <i>Intial Depth Migrated Gathers</i> .....	34
<b>Gambar 4.15</b> <i>Final Velocity Model</i> .....	34
<b>Gambar 4.14</b> <i>Final Depth Migrated Section</i> .....	34
<b>Gambar 4.14</b> <i>Final Depth Migrated Gathers</i> .....	34

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Pada saat ini perkembangan teknologi geofisika mengalami kemajuan yang pesat. Hal ini dapat terlihat dari kemudahannya dalam akuisisi data yang jauh lebih mudah dan akurat serta pemrosesan data yang sederhana yang dapat langsung diproses ketika dilapangan, serta kemampuannya yang akurat dalam interpretasi karena hasil akhirnya dipresentasikan secara visual dalam bentuk citra (image) dan terutama dalam geotomografi yang telah menjadi suatu tahapan yang penting untuk penyelidikan secara detail tentang distribusi sifat fisik tanah/batuan atau objek yang terletak di bawah permukaan bumi. Ide tomografi dalam memecahkan masalah kebumihan adalah suatu implikasi dari keberhasilan yang pesat dalam bidang tomografi dunia kedokteran yang mampu untuk menampilkan distribusi spatial redaman sinar-X yang melewati tubuh manusia untuk mendeteksi penyakit dalam tubuh manusia (Delliansyah, 2009).

Dalam ilmu geologi, kondisi geologi yang kompleks terjadi ketika ada perubahan kecepatan secara ekstrim baik secara horizontal maupun vertikal. Perubahan kecepatan yang ekstrim dapat diakibatkan oleh adanya *body* batuan yang memiliki kecepatan tinggi di dekat permukaan contohnya adalah batuan beku dan karbonat (Rovetta, dkk., 2013). Selain itu perubahan kecepatan dapat diakibatkan oleh lapisan *low velocity anomaly* yang berupa gas (Surya, 2017).



*Shallow gas* atau gas dangkal merupakan gas yang umum dijumpai pada sedimen dasar laut. Gas ini biasanya adalah hasil dari dekomposisi material organik yang terkandung dalam sedimen. Pada tahap awal pembentukannya, gas yang dihasilkan akan terikat di dalam air pori. Jika gas tersebut sudah lewat jenuh, maka gas yang terbentuk akan bermigrasi sebagai gas bebas (Rice dan Claypool, 1981). Selain itu, gas yang dijumpai pada sedimen dasar laut dapat juga berasal dari hidrokarbon yang terjebak di dalam lapisan batuan di bawahnya yang kemudian bermigrasi melalui rekahan atau patahan sehingga terperangkap diatas menjadi *shallow gas*. Sehingga kehadiran *shallow gas* dapat memberikan indikasi adanya cadangan hidrokarbon pada bagian yang lebih dalam (Astawa, 2007).

Pengolahan data seismik menjadi hal yang sangat penting karena menyiapkan data agar menghasilkan penampang seismik yang baik. Penentuan model kecepatan yang tepat dari *near surface* adalah langkah yang penting dalam pengolahan data seismik dan *depth imaging*. Tomografi adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan struktur atau model kecepatan yang tepat (Noble, 2010).

Suroso (2018), dalam penelitiannya menyebutkan bahwa, model kecepatan yang dibangun dari *travel time* tomografi refraksi dapat merepresentasikan kondisi dekat permukaan dengan tepat, yang mana model kecepatan yang tepat dapat digunakan untuk koreksi statik.

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh Astuti (2019) menggunakan metode *Full Waveform Inversion* (FWI). Dimana penampang yang dihasilkan menggunakan metode ini memiliki kualitas yang baik. Akan tetapi metode

tersebut terlalu mahal dan rumit dalam algoritma sehingga dibutuhkan alternatif metode yang lebih simple dan lebih murah.

Selain masalah tersebut, (Tongxing, 2017) menyebutkan bahwa umumnya tomografi refleksi tidak dapat menghasilkan model kecepatan yang tepat pada kualitas data seismik yang buruk, terutama pada struktur yang dangkal dimana terdapat akumulasi *shallow gas*. Untuk mengatasi hal tersebut dilakukan *prestack depth migration* menggunakan metode *travel time* tomografi refraksi untuk menghasilkan model kecepatan yang menggambarkan variasi kecepatan di lapisan dangkal sehingga dapat meningkatkan pencitraan reservoir dibawah anomali *shallow gas*.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini yaitu bagaimana menghasilkan model kecepatan yang lebih baik pada struktur geologi yang dangkal (near surface) dimana terdapat akumulasi *shallow gas*.

## **I.3 Ruang Lingkup Penelitian**

Pada penelitian *travel time* tomografi refraksi ini menggunakan data 3D *Marine* yang terdiri dari 5 swath. Analisa fokus dalam penelitian ini adalah penerapan tomografi refraksi pada area dangkal menggunakan software Geovation serta dilakukan *pre-stack* domain kedalaman menggunakan software Omega.

#### **I.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

- 1) Melakukan *travel time* tomografi refraksi pada daerah yang terdapat gas (shallow gas).
- 2) Menghasilkan model kecepatan kedalaman yang lebih baik dan terperinci di dasar laut yang dangkal
- 3) Melakukan migrasi *pre-stack* domain kedalaman pada data seismik.

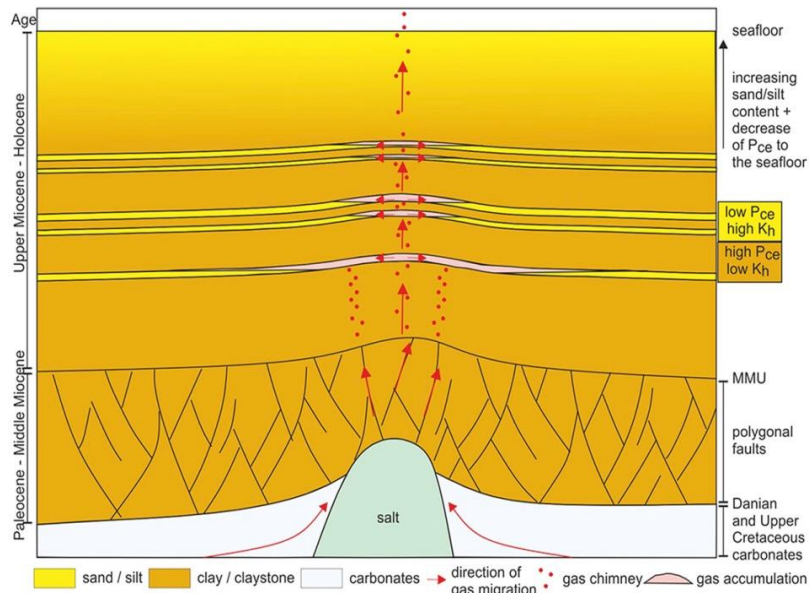
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 *Shallow Gas***

Gas yang berada dari kedalaman 0 sampai 1000 meter di bawah permukaan dasar laut didefinisikan sebagai *shallow gas*. *Shallow gas* selalu menjadi hal yang penting baik untuk produksi dan eksplorasi hidrokarbon. Pertama, gas dapat menjadi suatu bencana dan resiko saat *drilling borehole* atau saat *positioning* di *offshore platform* pada dasar laut. Kedua, adanya *shallow gas* dapat memberikan indikasi adanya cadangan hidrokarbon pada bagian yang lebih dalam dan itu menjadi sebuah *exploration tool* (Aksara, 2013).

*Shallow gas* atau gas dangkal merupakan gas yang umum dijumpai pada sedimen dasar laut. Gas ini biasanya adalah hasil dari dekomposisi material organik yang terkandung dalam sedimen oleh bakteri. Pada tahap awal pembentukannya, gas yang dihasilkan akan terikat di dalam air pori. Jika gas tersebut sudah lewat jenuh, maka gas yang terbentuk akan bermigrasi sebagai gas bebas (Rice dan Claypool, 1981). Selain itu, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1 gas yang dijumpai pada sedimen dasar laut dapat juga berasal dari hidrokarbon yang terjebak di dalam lapisan batuan di bawahnya yang kemudian bermigrasi melalui rekahan atau patahan sehingga terperangkap diatas menjadi *shallow gas*. Sehingga kehadiran *shallow gas* dapat memberikan indikasi adanya cadangan hidrokarbon pada bagian yang lebih dalam (Astawa, 2007).

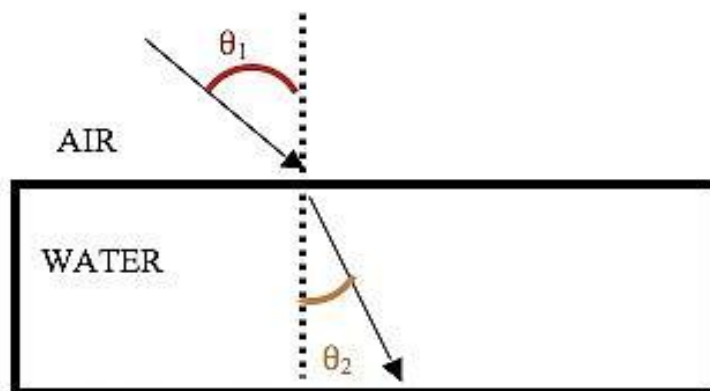


**Gambar 2.1** Ilustrasi migrasi gas dari bawah permukaan menuju ke *near surface* (Müller, S., dkk, 2017)

## II.2 Prinsip Dasar Perambatan Gelombang

### II.2.1 Hukum Snellius

Berdasarkan Gambar 2.2 Hukum Snellius menyatakan bahwa apabila suatu gelombang jatuh pada bidang batas dua medium yang berbeda, dimana terdapat perbedaan densitas pada medium tersebut, maka gelombang akan dibiaskan jika sudut datang gelombang lebih kecil atau sama dengan sudut kritisnya dan akan dipantulkan jika sudut datangnya lebih besar dari sudut kritisnya.



**Gambar 2.2** Penjalaran Gelombang Melewati Dua Medium

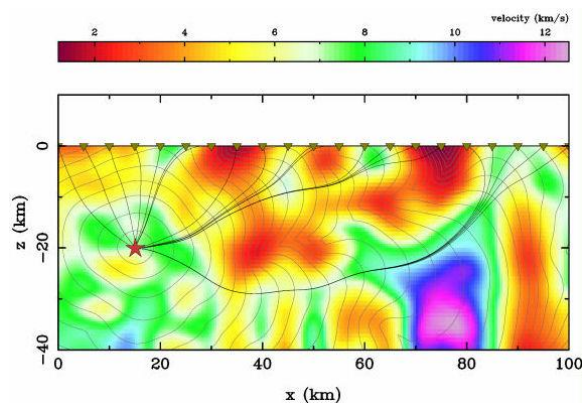
Hukum Snellius menjelaskan bahwa saat suatu gelombang melewati batas antara dua medium yang berbeda, maka gelombang akan berubah arah sehingga:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (2.1)$$

Di mana  $\theta_1$  adalah sudut datang gelombang,  $v_1$  adalah kecepatan dari medium pertama,  $\theta_2$  adalah sudut refraksi, dan  $v_2$  adalah kecepatan gelombang pada medium kedua.

## II.2.2 Prinsip Fermat

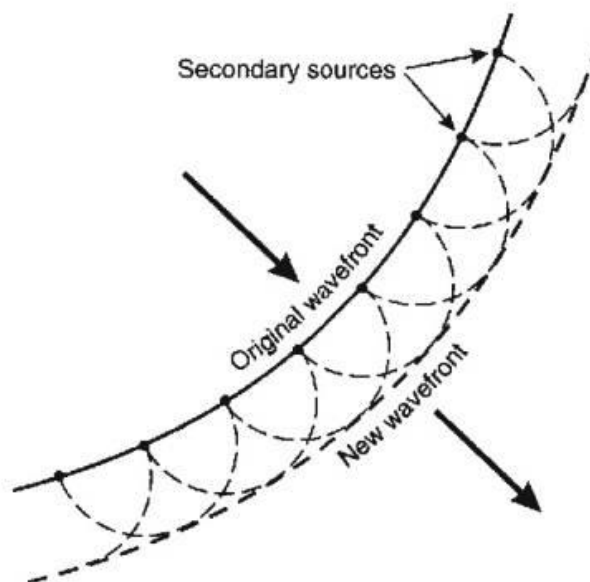
Prinsip Fermat menyatakan apabila sebuah gelombang merambat dari satu titik ke titik yang lainnya, maka gelombang tersebut akan melalui jejak yang tercepat. Jejak yang dilalui oleh sebuah gelombang tersebut adalah jejak yang tercepat secara waktu bukan yang terpendek secara jarak. Tidak selamanya yang terpendek adalah yang tercepat. Sehingga, jika sebuah gelombang melewati medium yang memiliki variasi kecepatan gelombang seismik, maka gelombang tersebut akan memilih melalui zona-zona yang berkecepatan tinggi dan menghindari zona-zona kecepatan rendah. Gambar 2.3 menunjukkan Prinsip Fermat tentang penjalaran gelombang (Abdullah, 2007).



**Gambar 2.3** Prinsip Fermat

### II.2.3 Prinsip Huygens

Prinsip Huygens menyatakan bahwa setiap titik pengganggu yang berada di depan muka gelombang utama akan menjadi sumber bagi terbentuknya deretan gelombang yang baru seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Jumlah energi total deretan gelombang baru tersebut sama dengan energi utama (Abdullah, 2007).



**Gambar 2.4** Prinsip penjalaran gelombang Huygens

### II.3 Seismik Refraksi *Travel Time* Tomografi

Seismik *travel time* adalah salah satu metode yang digunakan untuk mendekati kondisi bawah permukaan bumi melalui distribusi kecepatan gelombang seismik yang menjalar di bawah permukaan. Nilai ini diperoleh dari hasil inversi terhadap waktu rambat penjalaran gelombang dari sumber (source) ke penerima (receiver). Sebagaimana yang diketahui, struktur di bawah permukaan bumi sangat

kompleks. Untuk mendapatkan gambaran yang menyerupai kondisi bawah permukaan yang sebenarnya maka nilai waktu rambat yang diperoleh haruslah bisa mencerminkan kondisi waktu rambat yang sebenarnya (Delliansyah, 2009). Tomografi seismik refraksi *travel time* adalah metode yang memanfaatkan gelombang refraksi yang terekam pada proses pengukuran seismik refleksi, informasi tersebut terdapat pada *first break* data seismik (Schuster, 2017).

Pemodelan ke depan di dalam seismik tomografi digunakan untuk menghitung *travel time* gelombang atau sinar secara teoritis dengan menggunakan suatu model kecepatan awal (Monalia, 2011). Dalam pemodelan data, dicari suatu model yang menghasilkan respon yang cocok atau fit dengan data pengamatan atau data lapangan. Dengan demikian, model tersebut dapat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di tempat pengukuran data (Grandis, 2009).

*Travel time tomography* menggunakan *first arrival time* dari gelombang seismik sebagai input dalam pengolahan data (Azwin, 2013). *Travel time* tomografi refraksi diawali dengan membuat *initial velocity model* dan meng-input informasi dari *source* dan *receiver*. Kemudian dengan menggunakan algoritma *Least Squares* dicari suatu model yang menghasilkan respon yang cocok atau fit dengan data pengamatan atau data lapangan. Untuk mendapatkan model yang cocok dilakukan iterasi hingga perbedaan data observasi dan kalkulasi mencapai minimum dan error yang cukup kecil.



## II.4 Penelusuran sinar (Ray Tracing)

*Ray tracing* adalah metode yang digunakan untuk memberikan gambaran gelombang seismik yang merambat melalui suatu media hingga gelombang diterima oleh *receiver*. Metode penelusuran sinar meninjau penjalaran gelombang seismik sebagai suatu berkas sinar yang melintas dalam suatu media dan sekaligus menghitung *travel time*-nya (Jonathan, 2012).

Dasar dari *ray tracing* adalah persamaan Eikonal. Eikonal adalah turunan dari persamaan gelombang yang dapat dijadikan dasar perhitungan *travel time* gelombang pada medium akustik (Arenrin, 2013). Seperti yang diketahui bahwa persamaan gelombang adalah

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

$u$  merupakan besaran yang merupakan fungsi posisi dan waktu. Persamaan diatas merupakan persamaan osilasi dengan amplitudo maksimumnya adalah  $P(x)$  dan adapun solusi dari persamaan gelombang yaitu:

$$u(x, t) = P(x)e^{-i\omega T(x)} \quad (2.3)$$

Jika persamaan (2.3) disubstitusi ke persamaan (2.2), maka fungsi  $u$  pada ruas kiri diturunkan terhadap  $x$  dan fungsi  $u$  pada ruas kanan diturunkan terhadap  $t$ , sehingga diperoleh

$$\nabla^2 u - \omega^2 P(\nabla t)^2 = -\frac{P(x)\omega^2}{c^2} \quad (2.4)$$

Jika kedua ruas dikalikan dengan  $\frac{1}{P(x)\omega^2}$ , maka akan diperoleh

$$\frac{\nabla^2 u}{P(x)\omega^2} - (\nabla t)^2 = \frac{1}{c^2} \quad (2.5)$$

Dengan mengasumsikan kita menggunakan frekuensi tinggi sehingga nilai  $\omega$  akan sangat besar, sehingga komponen pertama dari persamaan (2.5) sangat kecil dibandingkan dengan komponen lainnya, maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$(\nabla t)^2 = \frac{1}{c^2} \quad (2.6)$$

Persamaan ini disebut persamaan Eikonal. Jadi dapat disimpulkan bahwa persamaan Eikonal adalah solusi dari persamaan gelombang frekuensi tinggi yang dapat menghitung waktu tempuh terpendek antara sumber dan penerima (Octova, 2018). John Vidale kemudian mengembangkan persamaan ini dan mengaplikasikannya melalui metode numerik dimana persamaan Eikonal memberikan penyelesaian waktu rambat pada setiap titik sel pada medium (Monalia, 2011).

Penyelesaian numerik dari persamaan Eikonal dilakukan dengan menggunakan metoda beda hingga (Vidale, 1990). Dalam penyelesaiannya, terlebih dahulu dilakukan dikritisasi model menjadi elemen-elemen kecil dengan ukuran dan jumlah tertentu. Elemen-elemen kecil ini disebut grid. Jumlah dan ukuran grid ditentukan sedemikian rupa, sehingga optimasi kecepatan pengolahan oleh komputer dan keakuratan hasil dapat dilakukan dengan baik. Tiap grid memiliki empat titik sudut. Titik sudut dari tiap-tiap grid merupakan nilai fungsi yang akan dicari nilainya.

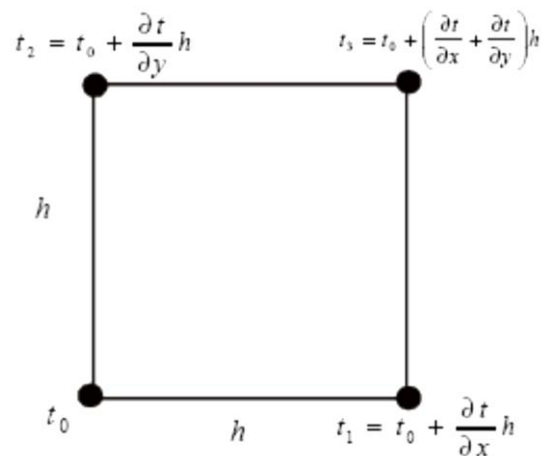
Persamaan Eikonal dapat juga dituliskan sebagai

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 = s^2 \quad (2.7)$$

$\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial t}{\partial y}$  adalah waktu tiba dalam perambatan gelombang seismik dari titik sumber

yang melewati suatu medium dengan distribusi slowness  $s(x,y) = 1/c$ .

Jika sebuah bangun berbentuk persegi seperti Gambar 2.5 dengan empat buah titik sudut. Di kiri bawah ditempatkan  $t_0$ , titik disebelahnya pada arah berlawanan arah jarum jam ditempatkan  $t_1$  dan pada titik sebelah lainnya pada arah searah jarum jam ditempatkan titik  $t_2$  dan pada arah diagonal dari  $t_0$  ditempatkan  $t_3$ . Pada node ke 0 diasumsikan mempunyai waktu rambat  $t_0$ . Sedangkan waktu rambat pada node 1, 2, dan 3 ( $t_1, t_2$ , dan  $t_3$ ) didekati menggunakan ekspansi deret Taylor orde pertama.



**Gambar 2.5** Metode Penjalaran Gelombang dengan menggunakan Prinsip Vidale.

Berdasarkan ekspansi deret Taylor, secara umum dapat dituliskan ekspansi dari deret Taylor orde pertama pada  $h$  yaitu:

$$t_1 = t_0 + \frac{\partial t}{\partial x} h \quad (2.8)$$

$$t_2 = t_0 + \frac{\partial t}{\partial y} h \quad (2.9)$$

$$t_3 = t_0 + \left( \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} \right) h \quad (2.10)$$

Ketiga persamaan tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut menjadi

$$2h \frac{\partial t}{\partial x} = t_3 + t_1 - t_2 - t_0 \quad (2.11)$$

$$2h \frac{\partial t}{\partial y} = t_3 + t_2 - t_1 - t_0 \quad (2.12)$$

Pada persamaan Eikonal (2.7) diketahui bahwa  $(\nabla t)^2 = s^2$ , dengan memasukkan persamaan (2.11) dan (2.12) ke persamaan (2.7), maka diperoleh:

$$(t_3 + t_1 - t_2 - t_0)^2 + (t_3 + t_2 - t_1 - t_0)^2 = 4\bar{s}^2 h^2 \quad (2.13)$$

Dimana

$$\bar{s} = \frac{1}{4}(s_0 + s_1 + s_2 + s_3) \quad (2.14)$$

$s_0, s_1, s_2, s_3$  = slowness (perlambatan) pada titik 0, 1, 2, dan 3.

Persamaan (2.13) dapat disederhanakan menjadi

$$(t_3 - t_0)^2 + (t_1 - t_2)^2 = 2\bar{s}^2 h^2 \quad (2.15)$$

Sehingga dari persamaan (2.15) diatas dapat diperoleh  $t_3$  yaitu:

$$t_3 = t_0 + \sqrt{2\bar{s}^2 h^2 - (t_1 - t_2)^2} \quad (2.16)$$

Perhitungan *travel time* gelombang dimulai dari posisi sumber ke titik-titik terdekat ( $t_1, t_2$ ) dan persamaan untuk mencari  $t_1$  dan  $t_2$  adalah

$$t_1 = t_0 + \left(\frac{s_0 + s_1}{2}\right) h \quad (2.17)$$

$$t_2 = t_0 + \left(\frac{s_0 + s_2}{2}\right) h \quad (2.18)$$

## II.5 Metode Inversi Least Square

Pada proses *ray tracing* didapatkan *travel time* dari model kecepatan. Proses selanjutnya adalah melakukan perbaikan terhadap model kecepatan berdasarkan *travel time* yang diperoleh dari proses *ray tracing* dengan menggunakan proses inversi. Inversi *travel time* dalam tomografi dipahami sebagai sebuah proses

menghitung *travel time* dari suatu model untuk mendapatkan *image* kecepatan dari model itu sendiri. *Travel time* tersebut akan dibandingkan dengan data *travel time* pengamatan dalam proses inversi, dan selisihnya akan didistribusikan sepanjang volume grid sehingga didapatkan model kecepatan yang baru (Iskandar, 2013).

Untuk memudahkan perhitungan, pada tahap inversi kecepatan gelombang digantikan dengan kelambanan (invers dari kecepatan gelombang). Hal ini dilakukan karena persamaan inversi menjadi linear ketika berada dalam domain *slowness* (Monalia, 2011).

Untuk memformulasikan permasalahan inversi secara lebih umum maka parameter yang terlibat dinyatakan dalam notasi vektor atau elemen (Grandis, 2009).

Secara matematis, model dan data pengukuran dapat dirumuskan sebagai berikut

$$T = [ \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N ]^T \quad (2.19)$$

$$S = [ s_1, s_2, s_3, \dots, s_M ]^T \quad (2.20)$$

Dengan T adalah vektor data pengukuran dengan parameter N dan S adalah vektor model dengan parameter M. Maka secara umum hubungan antara data pengukuran dan model dinyatakan dalam persamaan:

$$(\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_N) = L( s_1, s_2, s_3, \dots, s_M) \quad (2.21)$$

Dengan L adalah suatu fungsi hubungan antara model dan data pengukuran. Proses ini akan membentuk model dengan metode *trial and error* dengan cara

menganalisa perbandingan antara keluaran model dengan data hasil pengukuran yang pasti memiliki tingkat kesalahan tertentu. Proses ini dilakukan secara berulang-ulang dengan jumlah iterasi tertentu sehingga diperoleh hasil dengan tingkat kesalahan terkecil.

Dalam tomografi  $T$  dimisalkan sebagai matriks waktu tunda dari gelombang dan  $S$  adalah matriks *slowness*. Waktu tunda yang dimaksud adalah selisih antara *travel time* observasi dan *travel time* kalkulasi.

Metode *least square* dapat didekati dengan operasi matriks. Pada dasarnya suatu *problem* geofisika selalu diupayakan agar dapat disederhanakan menjadi persamaan (2.21), dimana nilai  $S$  yang akan diperoleh (Supriyanto, 2007). Jika data yang kita miliki sangat ideal dalam arti tidak ada error sama sekali, maka  $S$  bisa diperoleh sebagai berikut:

$$S = L^{-1}T \quad (2.22)$$

Akan tetapi, pada kenyataannya semua data pengukuran pasti memiliki error yang besarnya relatif. Oleh sebab itu, data observasi tak akan pernah fit secara sempurna dengan model.

$$T = LS + e_i \quad (2.23)$$

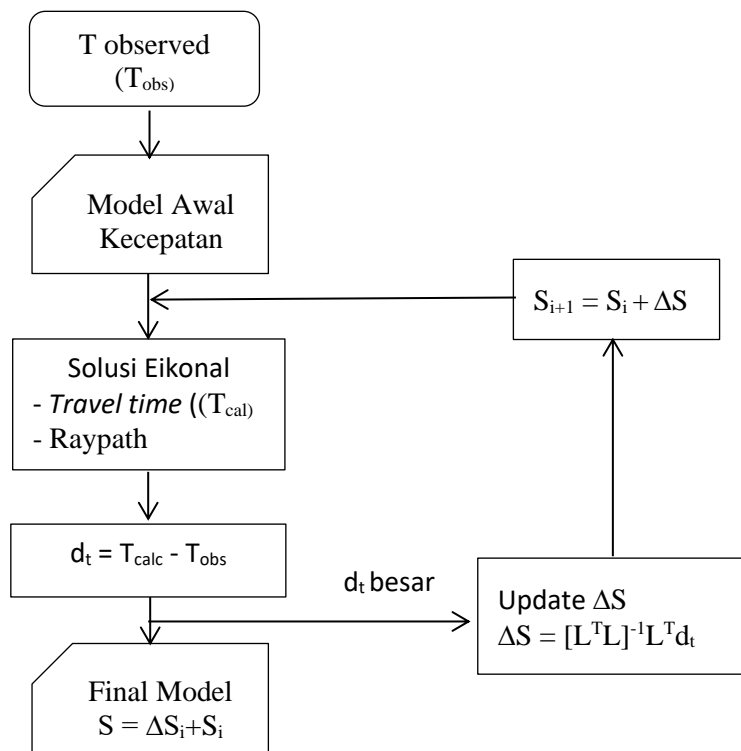
Untuk memperoleh solusi tersebut dilakukan dengan meminimalkan jumlah kuadrat dari residual,  $e_i$ . Cara ini akan meminimalkan perbedaan antara data lapangan dan model yang diprediksi melalui pemodelan *forward*. Dalam formulasi dinyatakan dengan

$$E = e^T e = (T - LS)^T (T - LS) \quad (2.24)$$

Penurunan fungsi E dilakukan untuk mendapatkan persamaan matriks dengan vektor parameter model  $S$  sebagai variabel yang tidak diketahui.

$$S = (L^T L)^{-1} L^T T \quad (2.25)$$

Metode *least square* mencoba meminimalkan error dengan cara menentukan parameter model sedemikian rupa sehingga diperoleh jumlah kuadrat error yang minimal (Grandis, 2009). Secara umum tahap-tahap dalam inversi travel time tomografi refraksi dijelaskan pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Diagram alir rekonstruksi tomografi menggunakan metode LSQR

## II.5 Migrasi Seismik

Migrasi yang dilakukan pada data seismik bertujuan untuk menghilangkan efek difraksi akibat sesar, kubah garam, pembajian, dan lain sebagainya. Selain itu

migrasi juga bertujuan untuk mengembalikan reflektor miring ke posisi sebenarnya (Abdullah, 2007).

Terdapat beberapa macam migrasi diantaranya migrasi *kirchoff*, *frequency-space*, *frequency-wavenumber*, dan *finite difference*. Setiap metode migrasi ini memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri namun pada dasarnya semua metode tersebut mempunyai tujuan yang sama tetapi dengan cara pendekatan yang berbeda-beda (Yilmaz, 1987).

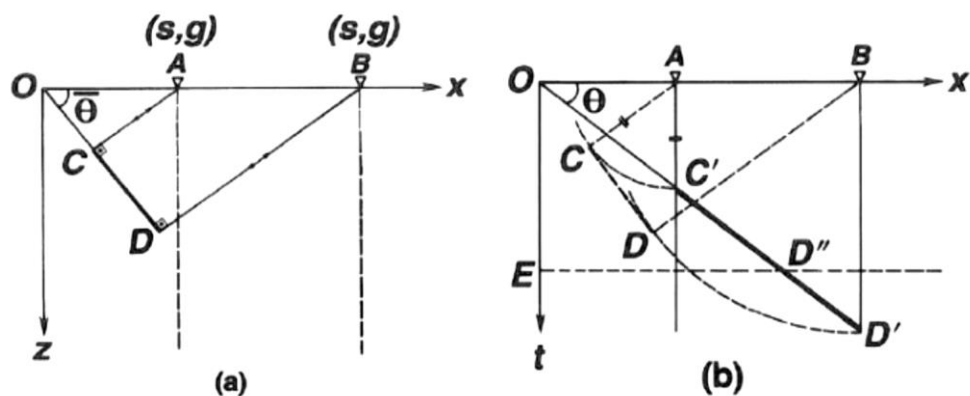
Migrasi bertujuan untuk membuat penampang seismik mirip dengan kondisi geologi yang sebenarnya berdasarkan reflektifitas lapisan bumi. Reflektifitas suatu bidang refleksi yang semula tidak menyambung dan selaras satu dengan yang lainnya serta dipenuhi oleh efek difraksi bowtie, setelah dimigrasi penampangnya menjadi lebih jelas dan teratur. Perbedaan amplitudo yang terlihat antara lapisan yang di atas dengan lapisan di bawahnya disebabkan oleh perubahan kontras densitas batuan di bidang batas antar lapisan, namun setelah dimigrasi juga menunjukkan reflektifitas yang lebih baik. Dengan kata lain, kontinuitas amplitudo refleksi pada fasies seismik yang ditampilkan pada *migrated section* semakin optimal (Minarti, 2010).

Prinsip dasar migrasi dapat dilihat pada Gambar 2.7 dimana titik reflector CD di bawah permukaan memiliki *offset* sepanjang O-x dan kedalaman sejauh O-t. Ketika pasangan *source* dan *receiver* (s,g) digerakkan dari titik O sampai ke titik x, *normal incident* pertama yang datang dari reflektor miring terekam pada lokasi A. Sinyal dari gelombang seismik yang merupakan pantulan dari reflektor di



bawah permukaan, yang sampai pada pasangan *source-receiver* di permukaan ditandai oleh A dan pada reflektor di bawah permukaan ditandai oleh C'.

Ketika pasangan *source-receiver* dijalankan kembali dari A menuju ke arah x, *normal incident* yang datang terekam dari reflektor miring CD. Kedatangan terakhir pantulan dari reflektor di bawah permukaan yang terekam oleh *receiver* dipermukaan ditandai oleh titik B dan pada reflektor di bawah permukaan ditandai dengan titik D'. Posisi geologi sebenarnya dari reflektor CD tidak sama dengan peristiwa refleksi yang posisinya di C'D' (Yilmaz, 2001).



**Gambar 2.7** Prinsip migrasi (Yilmaz, 2001)