

**ANALISIS INDIKASI HIDROKARBON DI CEKUNGAN
BUSUR MUKA LOMBOK DENGAN MENGGUNAKAN
DATA SEISMIK REFLEKSI MULTICHANNEL 2D**

TESIS

disusun oleh:

Rainer Arief Troa
NPM: 0606001462



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM PASCASARJANA FISIKA
KEKHUSUSAN GEOFISIKA RESERVOAR
JAKARTA
2009**

**ANALISIS INDIKASI HIDROKARBON DI CEKUNGAN
BUSUR MUKA LOMBOK DENGAN MENGGUNAKAN
DATA SEISMIK REFLEKSI MULTICHANNEL 2D**

TESIS

**diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Sains**

disusun oleh:

**Rainer Arief Troa
NPM: 0606001462**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM PASCASARJANA FISIKA
KEKHUSUSAN GEOFISIKA RESERVOAR
JAKARTA
2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Rainer Arief Troa

NPM : 0606001462

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Rainer Arief Troa
NPM : 0606001462
Program Studi : Magister Fisika
Kekhususan : Geofisika Reservoir
Judul Tesis : Analisis Indikasi Hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok Dengan Menggunakan Data Seismik Refleksi Multichannel 2D

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Geofisika Reservoir, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Haris ()

Pembimbing : Dr. Yusuf S. Djajadihardja ()

Penguji : Prof. Dr. Suprayitno Munadi ()

Penguji : Dr. Waluyo ()

Penguji : Dr. Ricky Adi Wibowo ()

Ketua Program : Dr. Dedi Suyanto ()

Ditetapkan di : Jakarta
Tanggal : 6 Juni 2009

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warrahmatullaahi Wabarakatuh,

Syukur Alhamdulillah, Segala Puji bagi Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena hanya berkat rahmat dan hidayah-Nya maka penulisan tesis ini dapat diselesaikan.

Tesis ini merupakan suatu studi dan analisis mengenai indikasi hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok dengan menggunakan data seismik refleksi multichannel 2D yang disusun sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Program Pascasarjana Kekhususan Geofisika Reservoir FMIPA – Universitas Indonesia.

Penulisan dan penyusunan tesis ini tentunya tidak akan terselesaikan tanpa adanya dukungan dari berbagai pihak. Karena itulah, pada kesempatan ini disampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Abdul Haris, sebagai pembimbing, atas diskusi, arahan, bimbingan, dan koreksi-koreksinya selama proses penyelesaian tesis ini.
2. Dr. Yusuf S. Djajadihardja, sebagai pembimbing atas arahan dan masukannya dalam penelitian ini dan selaku Kepala Pusat Teknologi Inventarisasi Sumberdaya Alam (TISDA – BPPT) atas dukungan data dan pemberian izin dalam penggunaan fasilitas pengolahan data seismik.
3. Dr. Udrek, sebagai pembimbing teknis yang dengan sabar dan tekun memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama pengerjaan tesis ini dan ketika melakukan pengolahan data seismik.
4. Dr. Dedi Suyanto, selaku Ketua Program Pascasarjana Fisika, Universitas Indonesia.
5. Prof. Dr. Suprajitno Munadi, Dr. Waluyo, dan Dr. Ricky Adi Wibowo sebagai Tim Penguji Tesis.

6. Dr. Budi Sulistyو selaku Kepala Pusat Riset Wilayah Laut dan Sumberdaya Nonhayati Badan Riset Kelautan dan Perikanan Departemen Kelautan dan Perikanan (BRKP – DKP).
7. Seluruh Dosen Program Pascasarjana Geofisika Reservoir, yang telah berdedikasi tinggi dalam mendidik kami.
8. Seluruh Staf Program Pascasarjana Geofisika Reservoir, terutama untuk mas Parman di Kampus Salemba, yang telah banyak membantu dalam administrasi perkuliahan dan tugas akhir.
9. Staf PTISDA dan NEOnet BPPT atas seluruh fasilitas dan keramahannya, terutama Ir. A. Sulaiman M.Si untuk diskusi rumus-rumusnya dan Sumirah, SSi untuk bantuannya dalam pengolahan data seismik.
10. Seluruh rekan-rekan mahasiswa Geofisika Reservoir UI angkatan 2006 atas kekompakannya selama kuliah, terutama mas Eko Triarso sebagai teman seperjuangan.
11. Dan yang paling utama adalah buat keluarga besarku: Mama tersayang, Papa, kakak-kakak (Utih & Aning) & adik-adikku (Katre & Etna), Bapak-Ibu Mertua & Bowo, dan Istriku tercinta Wahyuni Puspita Sari beserta putriku tercantik dan tersayang Kevia Nisrina Qatrunnada. Adalah dorongan semangat, kesabaran dan ketabahan yang tulus, serta bantuannya dari seluruh keluarga besarku itulah yang sangat berperan dalam memotivasi untuk melanjutkan pendidikan hingga menyelesaikan penulisan tesis ini.

Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala memberikan balasan berupa limpahan rahmat atas segala amal baik yang telah diberikan.

Akhirnya disadari bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna, tetapi diharapkan semoga dapat memberikan manfaat bagi pembacanya.

Wassalamualaikum Warrahmatullaahi Wabarakatuh,

Jakarta, Mei 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Rainer Arief Troa
NPM : 0606001462
Program Studi : Magister Sains
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis karya : Tesis

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Analisis Indikasi Hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok Dengan Menggunakan Data Seismik Refleksi Multichannel 2D.

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada Tanggal : 7 Juli 2007
Yang menyatakan

(Rainer Arief Troa)

ABSTRAK

Nama : Rainer Arief Troa
Program Studi : Magister Fisika
Kekhususan : Geofisika Reservoar
Judul Tesis : Analisis Indikasi Hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok Dengan Menggunakan Data Seismik Refleksi Multichannel 2D

Potensi sumberdaya hidrokarbon terutama minyak dan gas bumi di cekungan busur muka (*forearc basin*) masih belum banyak yang tersingkap. Kendala utama yang menyebabkan tahapan kegiatan eksplorasi di lokasi cekungan busur muka ini terlihat berjalan lambat adalah karena data dan informasi mengenai sistem hidrokarbon di sana masih sangat sedikit, serta lokasinya yang berada di laut dalam (*frontier area*).

Dalam penelitian ini, berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data seismik dan penerapan metode AVO diketahui terdapat indikasi kehadiran hidrokarbon di dalam Cekungan Busur Muka Lombok.

Penentuan model dan estimasi parameter fisis terhadap respon seismik yang digambarkan oleh sintetik seismogram terhadap *offset* atau sudut datang berdasarkan konsep analisis AVO, dapat memberikan informasi sifat fisik yang mendekati karakteristik batuanannya seperti nilai kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas (ρ), sehingga nilai Rasio Poisson (σ) yang sangat berarti dalam mendeterminasi kandungan fluida dalam batuan dapat dihitung.

Kata kunci: *Forearc Basin*, Cekungan Busur Muka Lombok, indikasi hidrokarbon, AVO, sintetik seismogram.

ABSTRACT

Name : Rainer Arief Troa
Program Study : Magister of Physics
Specialist : Reservoir Geophysics
Title : Analysis of Hydrocarbon Indication in Lombok
Forearc Basin Using 2D Multichannel Seismic
Reflection Data

Potency of hydrocarbon resources especially oil and gas in forearc basin still not yet been expressed. The resistance causing step activity of exploration in forearc basin walk tardyly is because information and data concerning hydrocarbon system over there still very few, and also the location of residing in deep sea (frontier area).

In this research, based on seismic data processing and analysis result and applying of AVO method known that there are indication presence of hydrocarbon in Lombok Forearc Basin.

Determination of parameter estimation and model to seismic respon depicted by seismogram synthetics to offset or angle of incidence pursuant to AVO analysis concept, can give information of physical properties closing to the rock characteristic like a P wave velocity (V_p), S wave velocity (V_s), and density (ρ), so that Poisson's Ratio (σ) which is very mean in determination of fluid in rock can be calculated.

Keyword: *Forearc Basin, Lombok Forearc Basin, hydrocarbon indication, AVO, seismogram synthetics.*

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Lokasi Penelitian	3
1.4. Metode Penelitian	4
1.5. Sistematika Pembahasan	4
BAB II. TEORI DASAR	
2.1. Sifat Fisis Batuan	
2.1.1. Kecepatan Gelombang P (V_p)	5
2.1.2. Kecepatan Gelombang S (V_s)	5
2.1.3. Densitas (ρ)	6
2.1.4. Rasio Poisson (Poisson's Ratio)	6
2.1.5. Hubungan V_p dengan V_s	8
2.1.6. Hubungan V_p dengan Densitas (ρ)	9
2.2. AVO	
2.2.1. Prinsip Dasar AVO	10
2.2.2. Penyederhanaan Persamaan Zoeppritz	13
2.2.3. Analisis Anomali AVO	14

2.2.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Amplitudo	20
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Data Seismik	23
3.2. Pengolahan Data Seismik Lintasan BGR06-307	24
3.2.1. SEG-D input dari DLT tape	24
3.2.2. Geometry building dan CDP Sorting	24
3.2.3. Filter	25
3.2.4. Velocity Analysis	25
3.2.5. Post-Stack Time Migration (PSTM)	27
3.2.6. Output to SEG-Y format	28
3.3. Pengolahan dan Analisis Data AVO	28
3.3.1. Angle Gather	29
3.3.2. Grafik Respon AVO (Gradient Analysis)	29
3.3.3. Gradient Stack	30
3.3.4. Penampang atribut A - B (Crossplot Attribute)	31
3.3.5. Range Limited Stack (Angle Stack)	31
3.4. Pemodelan AVO	32
BAB IV. TINJAUAN GEOLOGI	
4.1. Kerangka Tektonik Cekungan Busur Muka (Forearc Basin)	33
4.2. Cekungan Busur Muka Lombok (Lombok Forearc Basin)	36
4.3. Lintasan BGR06-307	38
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	
5.1. Indikasi Hidrokarbon	42
5.2. Analisis AVO	43
5.2.1. Penampang Gradient Stack (Product A*B)	44
5.2.2. Penampang Pseudo Poisson's Ratio (A+B)	46
5.2.3. Crossplot Intercept (A) dan Gradient (B)	47
5.3. Pemodelan Gas Sand	48
BAB VI. KESIMPULAN	50
DAFTAR PUSTAKA	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Lokasi penelitian	3
Gambar 2.1.	Hubungan V_p dengan V_s pada batuan silisiklastik	8
Gambar 2.2.	Hubungan V_p dan ρ pada berbagai jenis batuan	9
Gambar 2.3.	Hubungan antara offset dengan sudut datang (θ) dan sinyal datang yang terekam dalam titik reflektor yang sama	10
Gambar 2.4.	Refleksi dan transmisi gelombang P untuk sudut datang tidak sama dengan nol	11
Gambar 2.5.	Model dasar anomali AVO dari Rutherford dan Williams (1989) dengan menggunakan lapisan gas sand diantara dua lapisan shale	15
Gambar 2.6.	Klasifikasi anomali AVO menurut Rutherford dan Williams (1989) yang menunjukkan koefisien refleksi gelombang P pada top masing-masing gas sand	16
Gambar 2.7.	Perubahan amplitudo terhadap offset untuk klasifikasi Rutherford dan Williams	16
Gambar 2.8.	(a) CDP gather dalam domain offset, (b) CDP gather dalam domain sudut datang	18
Gambar 3.1.	Velocity picking untuk mendapatkan nilai kecepatan stack, yang dilakukan untuk setiap 20 CDP	25
Gambar 3.2.	Koreksi terhadap pantulan normal yang disebut juga sebagai koreksi NMO dan display dari spektrum kecepatan	26
Gambar 3.3.	Gambar bagian atas menunjukkan CDP gather yang belum terkoreksi NMO; Gambar bagian bawah merupakan hasil koreksi NMO yang juga memperlihatkan adanya area anomali amplitudo	27
Gambar 3.4.	Penampang Post-Stack Time Migration hasil pengolahan data seismik lintasan BGR06-307 yang telah dapat memperlihatkan bidang-bidang batas perlapisan; area target untuk analisis AVO juga dipilih berdasarkan kenampakan transparent layer dalam penampang ini	28
Gambar 3.5.	Respon amplitudo untuk masing-masing CDP terhadap sudut datang yang berkisar antara $5 - 20^\circ$ dan masih berada di bawah sudut kritis	29
Gambar 3.6.	Grafik respon amplitudo untuk masing-masing CDP terhadap sudut datang yang menunjukkan adanya anomali amplitudo	30
Gambar 3.7.	Kelas-kelas AVO yang ditentukan berdasarkan hasil crossplot yang menunjukkan adanya anomali	31

Gambar 4.1.	Tatanan tektonik Indonesia memperlihatkan Lempeng Indo-Australia tersubduksi di bawah Lempeng Eurasia (zona subduksi Sunda-Banda); membentuk batas lempeng terpanjang di Asia Tenggara dengan bermacam variasi parameter geologinya	33
Gambar 4.2.	Pembagian sektor proses tektonik pembentuk cekungan busur muka yang didasarkan atas letaknya terhadap zona subduksi Lempeng Sunda-Banda	36
Gambar 4.3.	Sketsa diagramatik menggambarkan daerah cekungan busur muka pada Lempeng Sunda-Banda	37
Gambar 4.4.	Penampang seismik Lintasan BGR06-307	39
Gambar 4.5.	Hasil pengolahan data seismik yang menunjukkan masih adanya kontinuitas atau penerusan horison-horison di dalam transparent layer secara lateral	40
Gambar 5.1.	Seismic blanking dengan refleksi amplitudo rendah yang kontras dengan lapisan di atasnya yang menunjukkan kenampakan brightspot	42
Gambar 5.2.	Respon amplitudo yang semakin membesar dengan bertambahnya offset pada Horizon 5	43
Gambar 5.2.	Hasil gradient analysis yang menunjukkan respon amplitudo yang semakin membesar dengan bertambahnya offset pada Horizon 2	44
Gambar 5.4.	Penampang Product ($A*B$) menunjukkan kenampakan anomali AVO yang ditandai dengan warna merah yang menunjukkan respon AVO positif pada Horizon 2	45
Gambar 5.5.	Respon AVO positif juga terdapat dalam TWT 7100 – 7200 ms pada CDP 32638 – 32646 Horizon 4 yang terletak di bawah transparent layer	45
Gambar 5.6.	Pseudo Poisson's Ratio yang tinggi ditunjukkan dengan warna kuning yang dapat menjadi indikator keberadaan gas pada Horizon 2	46
Gambar 5.7.	Crossplot untuk melakukan zonasi penentuan kelas gas sand berdasarkan klasifikasi Rutherford dan William (1989)	47
Gambar 5.8.	Hasil crossplot yang dituangkan ke dalam penampang stack, menunjukkan adanya anomali pada zone 2 (base) dan zone 3 (top); Inset: Gambar penampang hasil crossplot yang lebih detail menunjukkan anomali tersebut	47
Gambar 5.9.	Model respon seismik hasil pemodelan (a) dibandingkan dengan data riil (b)	48
Gambar 5.10.	Perbandingan gradient analysis CDP gather (angle gather) dan kurva koefisien refleksi model dengan menggunakan persamaan Zoeppritz di horison 2.	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Nilai Rasio Poisson dari batuan sedimen

7



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Konsumsi minyak dan gas bumi (migas) dunia yang semakin besar telah menjadikan permintaan akan migas semakin meningkat. Hal ini membuat cadangan migas pada cekungan-cekungan yang telah berproduksi dapat mengalami penurunan yang berimplikasi pada penurunan cadangan migas nasional. Karena itu, dibutuhkan usaha untuk menambah jumlah cadangan tersebut dengan melakukan kegiatan eksplorasi, karena hanya dengan eksplorasi maka cadangan migas akan bertambah atau setidaknya-tidaknya dapat dipertahankan (Koesoemadinata, 1980).

Potensi migas atau hidrokarbon di Indonesia umumnya terdapat di berbagai cekungan sedimen tersier. Cekungan tersebut ditinjau dari letak dan tatanan tektoniknya (Hamilton, 1979) tersusun atas cekungan busur belakang (*backarc basin*) dan cekungan busur muka (*forearc basin*). Cekungan busur belakang telah terbukti menghasilkan hidrokarbon dan sebagian besar telah berproduksi, sedangkan hal yang bertolak belakang terjadi pada cekungan busur muka. Cekungan busur muka umumnya masih dalam tahap kajian tektonik dan studi regional cekungan dengan sedikit saja yang telah mencapai tahapan perencanaan eksplorasi. Cekungan busur muka ini tersebar mulai dari perairan sebelah barat pulau Sumatera hingga perairan sebelah selatan pulau Jawa, Bali, dan Lombok. Kendala utama yang menyebabkan tahapan kegiatan eksplorasi di lokasi cekungan busur muka ini terlihat berjalan lambat adalah karena data dan informasi mengenai sistem hidrokarbon di sana masih sangat sedikit. Selain itu, letak sebagian besar cekungannya berada di lautan dengan kolom air laut yang sangat dalam yang mencapai lebih dari tiga ribu meter, sehingga membutuhkan biaya tinggi untuk teknologi eksplorasi dan eksploitasinya.

Ekspedisi dan penelitian geologi dan geofisika kelautan yang melintasi perairan sebelah selatan pulau Jawa, Bali, dan Lombok telah dilakukan sejak tahun 1970, tujuannya terutama untuk studi tektonik dan sumberdaya kelautan (Taib, 2000). Beberapa ekspedisi kelautan tersebut juga telah melintasi Cekungan Busur Muka Lombok, diantaranya adalah Ekspedisi Snellius-II (1984 – 1985) dan Ekspedisi Sindbad (2006). Dalam melakukan pengambilan data geologi dan geofisika kelautan, kedua ekspedisi ini menerapkan metode seismik refleksi 2D, dengan masing-masing menerapkan *singlechannel* dan *multichannel seismic reflection*. Ekspedisi Snellius-II memfokuskan penelitiannya pada pemahaman mengenai sedimentasi, struktur, dan tatanan tektonik pada zona konvergen Busur Sunda bagian timur dan Busur Banda bagian barat (van Weering et al., 1989), sedangkan Ekspedisi Sindbad memiliki tujuan utama untuk menyelidiki hubungan antara perubahan yang terjadi pada lempeng yang lebih bawah dengan evolusi tektonik yang terjadi pada lempeng yang menumpanginya (*overriding plate*) di sepanjang daerah transisi Busur Sunda dengan Busur Banda (Muller et al., 2006). Ekspedisi Sindbad yang merupakan akronim dari *Seismic and Geoacoustic Investigations along the Sunda-Banda Arc Transition – SO190 Research Cruise* ini adalah kerjasama riset kelautan antara Republik Indonesia dengan Jerman pada tahun 2006. Ekspedisi ini dilakukan dengan menggunakan Kapal Riset *R/V Sonne* Jerman. Data seismik dari hasil Ekspedisi Sindbad tersebut yang dipergunakan dalam penelitian ini.

Metode seismik refleksi merupakan metode penyelidikan geofisika yang paling efektif dalam memberikan informasi tentang kondisi geologi bawah permukaan dan potensi hidrokarbon yang terkandung di dalamnya. Indikator akumulasi hidrokarbon pada umumnya ditunjukkan oleh respon seismik dengan anomali amplitudo lokal yang disebut *brightspot* yang telah dikenal sejak tahun 1976 sebagai indikasi adanya akumulasi gas di bawah permukaan. Pada tahun 1984, ditemukan metode baru dalam pengamatan amplitudo yang dikenal dengan metode pengamatan variasi amplitudo terhadap *offset* atau metode AVO (*Amplitudo Variation with Offset* atau *Amplitudo Versus Offset*) yang telah banyak dibuktikan keberhasilannya mengidentifikasi akumulasi hidrokarbon (terutama

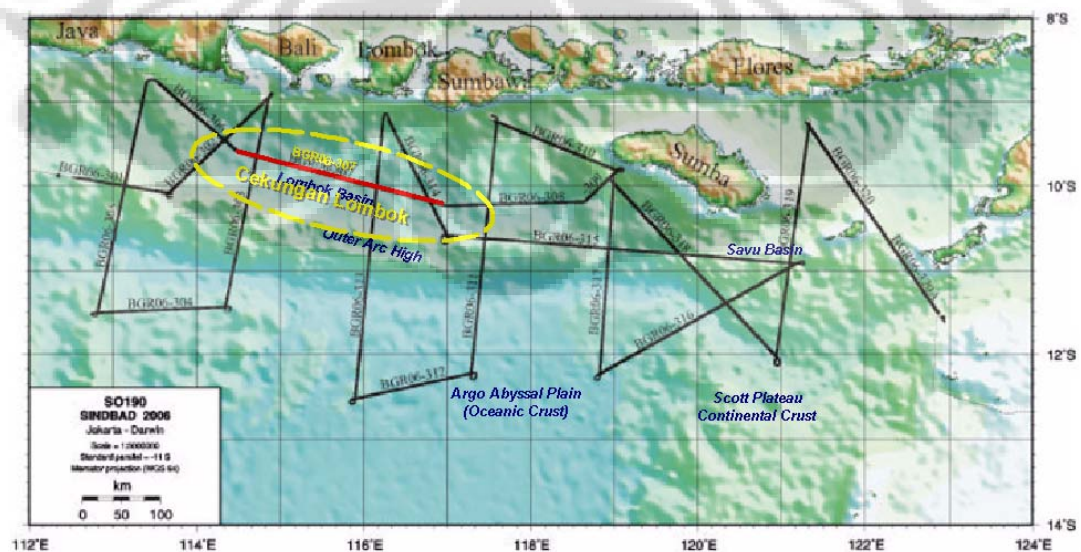
gas) di bawah permukaan (Munadi, 1993). Adanya anomali amplitudo lokal di Cekungan Busur Muka Lombok telah diamati dalam lintasan BGR06-307 yang melewati cekungan tersebut. Kenampakannya berupa *brightspot*, lapisan transparan (*transparent layer*) dengan amplitudo refleksi internal yang rendah (*low amplitude internal reflectivity*), serta bentukan paparan karbonat (*carbonate platform*). Untuk kepentingan penelitian ini, dipilih lintasan BGR06-307 tersebut sebagai fokus kajian.

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji adanya indikasi hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok berdasarkan data seismik refleksi *multichannel* 2D melalui pengolahan data seismik dan metode AVO.

1.3. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Cekungan Busur Muka Lombok, dengan fokus kajian pada data seismik lintasan BGR06-307 yang merupakan lintasan seismik marin di perairan sebelah selatan Pulau Lombok dan melintasi cekungan tersebut (Gambar 1.1).



Gambar 1.1. Lokasi penelitian.

1.4. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode pengolahan data seismik dan metode AVO. Secara lengkap, metode penelitian ini akan dibahas lebih lanjut pada Bab III dalam tesis ini.

1.5. Sistematika Pembahasan

Penulisan tesis ini dibagi ke dalam enam bab, yang terdiri dari Bab I Pendahuluan, Bab II Teori Dasar, Bab III Metodologi Penelitian, Bab IV Tinjauan Geologi, Bab V Hasil dan Pembahasan, serta Bab VI Kesimpulan.

Bab I merupakan pendahuluan dari tesis yang di dalamnya dijabarkan mengenai latar belakang, tujuan, lokasi, dan metode penelitian, serta sistematika pembahasannya.

Bab II membahas mengenai teori dasar yang dijadikan acuan dalam melakukan analisis dalam penelitian ini.

Dalam Bab III, dijabarkan mengenai metodologi penelitian yang digunakan dan tahapan kerja dalam penelitian ini.

Bab IV berisi tentang tinjauan geologi regional daerah penelitian berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan atau yang telah dipublikasikan oleh peneliti sebelumnya, serta hasil interpretasi data seismik.

Bab V berisi tentang hasil dari pengolahan dan analisis data beserta pembahasannya.

Terakhir ditutup oleh Bab VI yang merupakan kesimpulan dari penelitian.

BAB II

TEORI DASAR

2.1. Sifat Fisis Batuan

Sifat fisis batuan terutama kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), densitas (ρ), dan Rasio Poisson (σ) yang dimiliki batuan dapat digunakan untuk menggambarkan kondisinya di bawah permukaan bumi dan akan menentukan bagi kelakuan penjalaran gelombang tersebut di dalam batuan. Sifat fisis batuan nilainya banyak ditentukan oleh tipe matriks, porositas, dan fluida pengisi pori.

2.1.1. Kecepatan Gelombang P (V_p)

Setiap material di dalam bumi memiliki kecepatan gelombang P (*Pressure wave*) tertentu. Secara umum, kecepatan gelombang P akan semakin meningkat dengan meningkatnya kekompakan medium yang dilaluinya. Gelombang P atau gelombang kompresi merupakan gelombang longitudinal yang dapat merambat dalam medium padat, cair, dan gas.

Kecepatan gelombang P (V_p) sebagai fungsi dari modulus bulk (k), modulus geser (μ), dan densitas (ρ) adalah:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

2.1.2. Kecepatan Gelombang S (V_s)

Gelombang S (*Shear wave*) atau gelombang geser merupakan gelombang transversal yang arah pergerakan partikelnya tegak lurus terhadap arah penjalaran gelombangnya. Gelombang S tidak merambat dalam medium cair maupun gas karena modulus geser (μ) untuk medium cair dan gas adalah nol.

Kecepatan gelombang S (V_s) dipengaruhi oleh densitas (ρ) dan modulus geser (μ), tetapi tidak dipengaruhi oleh modulus bulk (k), dapat ditulis sebagai:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

2.1.3. Densitas (ρ)

Densitas merupakan sifat fisis yang berubah secara signifikan terhadap perubahan tipe batuan akibat mineral dan porositas yang dimilikinya. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai perbandingan massa batuan (m) terhadap volume (v):

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.3)$$

Jika terdapat dua jenis fluida dalam satu volume, maka penentuan densitasnya berupa densitas *bulk* (ρ_b) yang dihitung berdasarkan rumus Wyllie (1956):

$$\rho_b = \rho_m(1 - \emptyset) + \rho_w S_w \emptyset + \rho_{hc}(1 - S_w)\emptyset \quad (2.4)$$

dengan:

ρ_b	:	densitas <i>bulk</i> (kg/m^3)
ρ_m	:	densitas matriks (kg/m^3)
ρ_w	:	densitas air (kg/m^3)
ρ_{hc}	:	densitas hidrokarbon (kg/m^3)
\emptyset	:	porositas (%)
S_w	:	saturasi air (%)
$1 - S_w$:	saturasi hidrokarbon (%)

2.1.4. Rasio Poisson (*Poisson's Ratio*)

Rasio Poisson (σ) adalah sebuah konstanta elastik yang merepresentasikan sifat fisis batuan, yang merupakan fungsi dari kecepatan gelombang kompresi (V_p) dan kecepatan gelombang geser (V_s).

Secara prinsip dapat dijelaskan sebagai berikut, bahwa cepat rambat gelombang seismik terutama V_p akan turun secara drastis di dalam batuan berpori

yang mengandung fluida (terutama gas). Perbandingan cepat rambat antara V_p dan V_s dinyatakan sebagai Rasio Poisson yang dirumuskan:

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (2.5)$$

Rasio Poisson merupakan pengukuran V_p/V_s yang nilainya bervariasi antara 0 hingga 0,5. Batuan yang sangat keras mempunyai nilai Rasio Poisson mendekati 0, sedangkan batuan yang sangat lunak mempunyai nilai yang mendekati 0,5. Nilai Rasio Poisson ini sangat berarti dalam mendeterminasi kandungan fluida dalam batuan, seperti air, minyak, atau gas, sehingga perbedaan kandungan fluida di dalam batuan dapat dimanifestasikan dalam perbedaan Rasio Poisson-nya. Berdasarkan hasil uji laboratorium, setiap batuan sedimen memiliki nilai Rasio Poisson yang spesifik seperti tertera dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Nilai Rasio Poisson dari batuan sedimen (Ostrander, 1984)

Jenis batuan sedimen	Rasio Poisson	Sumber
Sedimen laut dangkal	0,45 – 0,50	Hamilton (1976)
Lempung <i>Green River</i>	0,22 – 0,30	Podio et al. (1968)
Sedimen terkonsolidasi:		Gregory (1976)
Tersaturasi <i>brine</i>	0,20 – 0,30	
Tersaturasi gas	0,01 – 0,14	
Batupasir sintetik:		Domenico (1976)
Tersaturasi <i>brine</i>	0,41	
Tersaturasi gas	0,10	
Batupasir Ottawa:		Domenico (1976)
Tersaturasi <i>brine</i>	0,41	
Tersaturasi gas	0,10	

Ostrander (1984) melakukan penelitian dengan menitikberatkan pada aplikasi nilai Rasio Poisson pada kondisi *gas sand* dan faktor yang mempengaruhi rekaman amplitudo sebagai fungsi *offset*. Berdasarkan penelitian itu diketahui bahwa nilai Rasio Poisson sangat berpengaruh terhadap perubahan koefisien refleksi dan sudut datang.

2.1.5. Hubungan V_p dengan V_s

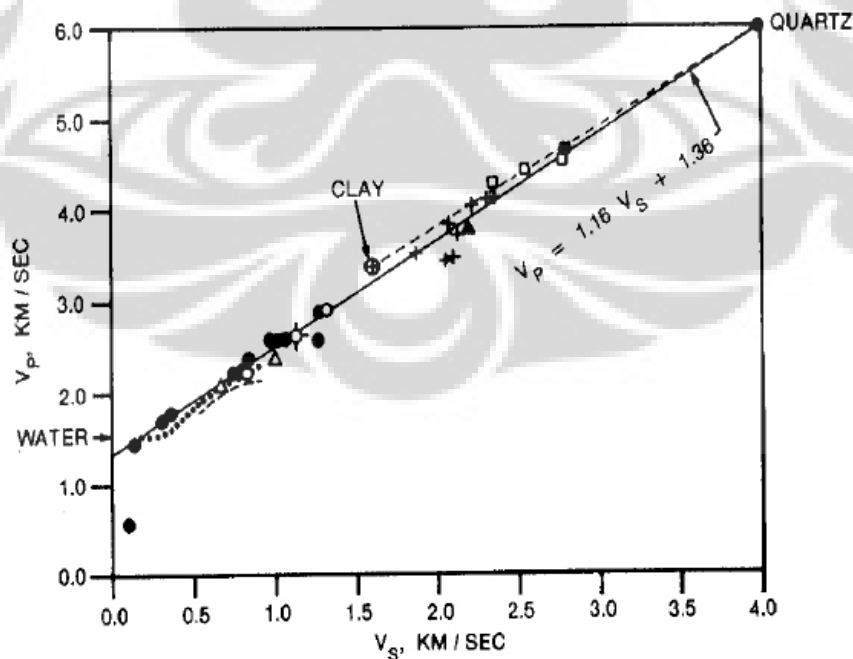
Castagna et al. (1985) melakukan percobaan laboratorium pada batuan silisiklastik di Teluk Meksiko untuk melihat hubungan antara V_p dan V_s . Hubungan V_p dan V_s hasil pengukuran laboratorium (Gambar 2.1) memiliki trend yang sama dengan pengukuran lapangan yang kemudian dikenal dengan nama *Mudrock Line*, yaitu:

$$V_p = 1,16 V_s + 1,136 \quad (2.6)$$

yang secara umum hubungan ini ditulis dengan:

$$V_p = A V_s + B \quad (2.7)$$

dengan A dan B adalah tetapan khusus untuk setiap kasus tertentu.



Gambar 2.1. Hubungan V_p dengan V_s pada batuan silisiklastik (Castagna et al., 1985).

2.1.6. Hubungan V_p dengan Densitas (ρ)

Gardner et al. (1974) melakukan percobaan di laboratorium untuk mempelajari hubungan antara kecepatan gelombang P dan densitas (Gambar 2.2) yang dikenal dengan istilah Relasi Gardner, secara umum ditulis dalam bentuk persamaan:

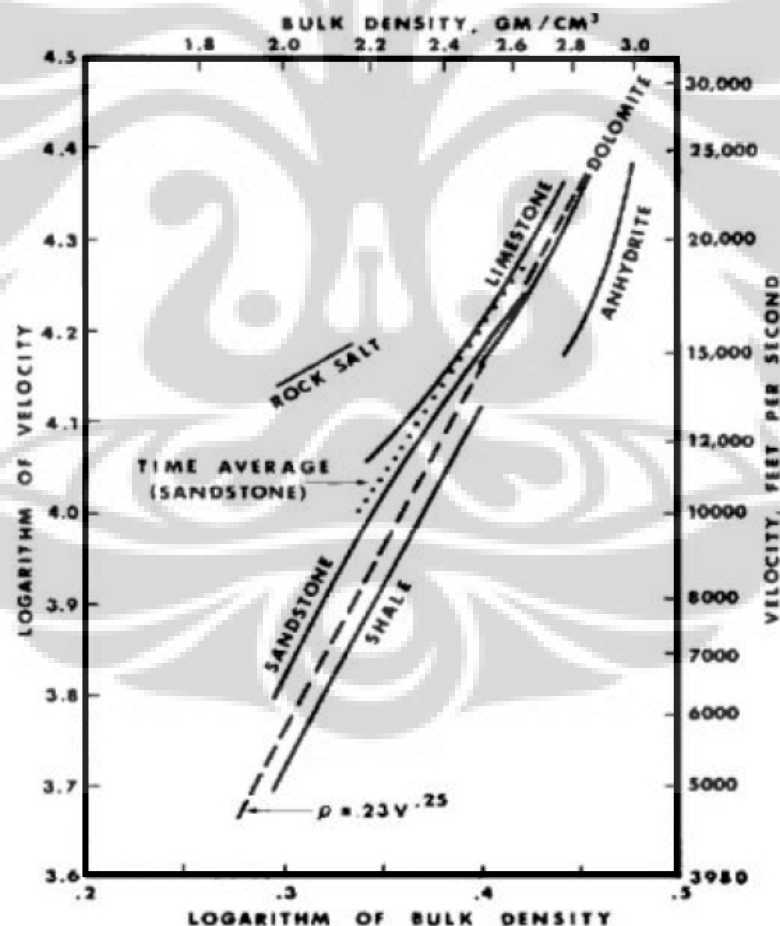
$$\log(\rho) = A \log(V_p) + B \quad (2.8)$$

dengan A dan B adalah tetapan khusus untuk setiap kasus tertentu.

Berdasarkan hasil percobaannya, didapatkan persamaan:

$$\rho = 0,23 V^{0,25} \quad (2.9)$$

Nilai ini dipakai sebagai parameter dasar jika data lokal tidak tersedia.

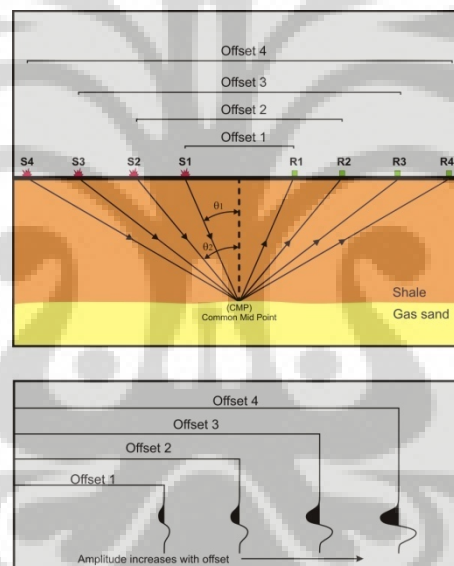


Gambar 2.2. Hubungan V_p dan ρ pada berbagai jenis batuan (Gardner et al., 1974).

2.2. AVO

2.2.1. Prinsip Dasar AVO

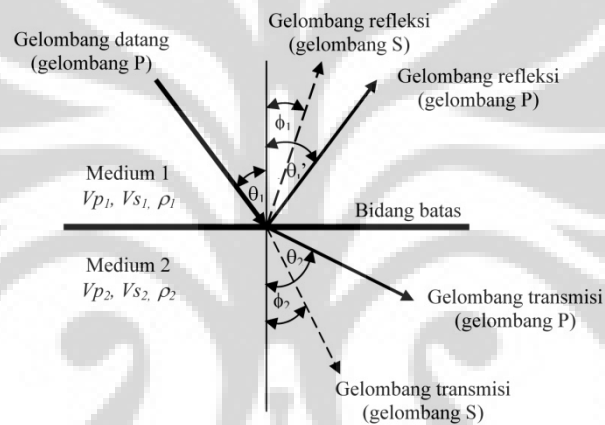
Analisis AVO bertumpu pada adanya perubahan amplitudo sinyal terpantul terhadap jarak dari sumber gelombang ke geofon penerima. Dalam hal ini, semakin besar jarak antara sumber ke penerima (*offset*) akan semakin besar pula sudut datangnya (Gambar 2.3). Fenomena tersebut kelihatannya cukup aneh, karena gelombang yang menjalar semakin jauh seharusnya amplitudonya semakin mengecil, tetapi yang terjadi malahan sebaliknya.



Gambar 2.3. Hubungan antara *offset* dengan sudut datang (θ) dan sinyal datang yang terekam dalam titik reflektor yang sama (Chiburis et al., 1993).

Analisis AVO harus diterapkan pada sinyal seismik tepat di titik pemantul, tetapi tetap ada batasan maksimum *offset* yang berkaitan dengan sudut datang kritis yang dapat digunakan untuk analisis. Adanya variasi perubahan koefisien refleksi dan transmisi terhadap sudut datang yang berkaitan dengan hubungan jarak reflektivitas merupakan dasar berkembangnya teori AVO (Castagna, 1993). Menurut Ostrander (1984), perubahan amplitudo refleksi gelombang P terhadap *offset* akan terjadi jika gelombang seismik tersebut dipantulkan oleh lapisan *gas sand*.

Pengamatan amplitudo terhadap *offset* dapat diamati pada setiap titik pantul yang sama (*Common Depth Point* atau *CDP*) dengan asumsi setiap energi dari sumber diterima oleh *receiver* dengan *offset* tertentu. Karakteristik AVO ditentukan oleh koefisien refleksi sudut datang normal dan kontras Rasio Poisson pada reflektornya (Ostrander, 1984). Koefisien refleksi dan transmisi yang terjadi pada bidang batas adalah gelombang P datang, gelombang P refleksi, gelombang P transmisi, gelombang S refleksi, dan gelombang S transmisi (Gambar 2.4).



Gambar 2.4. Refleksi dan transmisi gelombang P untuk sudut datang tidak sama dengan nol (Yilmaz, 2001).

Lintasan gelombang tersebut mengikuti Hukum Snellius:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{p1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{p2}} = \frac{\sin \phi_1}{V_{s1}} = \frac{\sin \phi_2}{V_{s2}} = p \quad (2.10)$$

dengan:

- θ_1 : sudut refleksi gelombang P
- θ_2 : sudut transmisi gelombang P
- ϕ_1 : sudut refleksi gelombang S
- ϕ_2 : sudut transmisi gelombang S
- V_{p1} : kecepatan gelombang P pada medium pertama
- V_{p2} : kecepatan gelombang P pada medium kedua
- V_{s1} : kecepatan gelombang S pada medium pertama
- V_{s2} : kecepatan gelombang S pada medium kedua
- p : parameter model

Zoeppritz (1919) menghubungkan parameter-parameter yang berupa amplitudo refleksi dan transmisi sebagai fungsi sudut datang, ΔV_p , ΔV_s , dan $\Delta\rho$ dari fenomena perambatan gelombang untuk sudut datang tidak sama dengan nol menjadi matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{p1}}{V_{s1}} \cos 2\theta_1 & \frac{\rho_2 V_{s2}^2 V_{p1}}{\rho_1 V_{s1}^2 V_{p2}} \cos 2\theta_1 & \frac{\rho_2 V_{s2} V_{p1}}{\rho_1 V_{s1}^2} \cos 2\theta_1 \\ -\cos 2\theta_1 & \frac{V_{s1}}{V_{p1}} \sin 2\theta_1 & \frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} \cos 2\theta_1 & -\frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_{p1}} \sin 2\theta_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

dengan:

- R_p : koefisien refleksi gelombang P
- R_s : koefisien refleksi gelombang S
- T_p : koefisien transmisi gelombang P
- T_s : koefisien transmisi gelombang S
- V_p : kecepatan gelombang P
- V_s : kecepatan gelombang S
- ρ : densitas
- θ_1 : sudut refleksi gelombang P
- θ_2 : sudut transmisi gelombang P
- θ_1 : sudut refleksi gelombang S
- θ_2 : sudut transmisi gelombang S
- $1,2$: indeks medium lapisan 1 dan 2

Penyelesaian dari persamaan matriks (2.11) di atas dikenal sebagai persamaan Zoeppritz yang menghasilkan koefisien refleksi dan transmisi pada satu bidang batas sebagai fungsi sudut datang dengan gelombang datang adalah gelombang P.

2.2.2. Penyederhanaan Persamaan Zoeppritz

a) Aki dan Richard (1980)

Aki dan Richards (1980) menggunakan asumsi persamaan Zoeppritz dengan menambahkan konsep harga perubahan densitas lapisan, kecepatan gelombang P dan S pada bidang batas, diperoleh hubungan:

$$R(\theta) = a \frac{\Delta\rho}{\rho} + b \frac{\Delta V_p}{V_p} + c \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (2.12)$$

dengan:

$$a = \frac{1}{2} - \left[\left(\frac{2V_s^2}{V_p^2} \right) \sin^2 \theta \right]; b = \frac{1}{2 \cos^2 \theta} = \frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta); c = - \left(\frac{4V_s^2}{V_p^2} \right) \sin^2 \theta;$$

$$\Delta V_p = V_{p1} - V_{p2}; \Delta V_s = V_{s1} - V_{s2}; \Delta\rho = \rho_1 - \rho_2; V_p = \frac{1}{2} (V_{p1} + V_{p2});$$

$$V_s = \frac{1}{2} (V_{s1} + V_{s2}); \rho = \frac{1}{2} (\rho_1 + \rho_2); \theta = \frac{1}{2} (\theta_1 + \theta_2); \theta_c = \arcsin \left[\left(\frac{V_p}{V_{p1}} \right) \sin \theta_1 \right]$$

b) Shuey (1985)

Shuey (1985) menyusun kembali persamaan Aki dan Richard (1980) berdasarkan sudut datang menjadi:

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \right] + \left[\frac{1 \Delta V_p}{2 V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} \right] \sin^2 \theta + \left[\frac{1 \Delta V_p}{2 V_p} \right] (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2.13)$$

Dengan memasukkan perbandingan V_p/V_s dalam besaran Rasio Poisson untuk koefisien refleksi pada bidang batas lapisan ke persamaan (2.13) didapatkan pendekatan:

$$R(\theta) = R_p + \left[R_p H_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right] \sin^2 \theta + \left[\frac{1 \Delta V_p}{2 V_p} \right] (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2.14)$$

dimana:

$$R_p = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right); \sigma = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2}; \Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$$

$$H = \frac{\Delta V_p/V_p}{\Delta V_p/V_p + \Delta\rho/\rho}; H_0 = H - 2(1+H) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma}$$

dengan:

σ	:	rata-rata Rasio Poisson
$\Delta\sigma$:	perbedaan σ yang melewati bidang batas = $\sigma_2 - \sigma_1$
V_p	:	rata-rata kecepatan gelombang $P = \frac{V_{p1} + V_{p2}}{2}$
ΔV_p	:	perbedaan V_p yang melewati bidang batas = $V_{p2} - V_{p1}$
θ	:	rata-rata sudut datang dan sudut transmisi = $\frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$
ρ	:	rata-rata densitas formasi = $\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$
$\Delta\rho$:	perbedaan densitas yang melewati bidang batas = $\rho_2 - \rho_1$

Persamaan (2.14) terbagi atas tiga suku, yaitu suku pertama R_p adalah koefisien refleksi dengan sudut datang normal ($\theta = 0^\circ$), suku kedua untuk kisaran sudut menengah, dan suku ketiga untuk sudut datang besar. Pada kondisi riil di lapangan, θ tidak pernah lebih besar dari 40° .

Untuk sudut yang kecil, dengan pendekatan pada sudut mencapai 30° , maka $\sin^2\theta \approx \tan^2\theta$, sehingga persamaan (2.14) menjadi:

$$R(\theta) = R_p + G \sin^2\theta = A + B \sin^2\theta \quad (2.15)$$

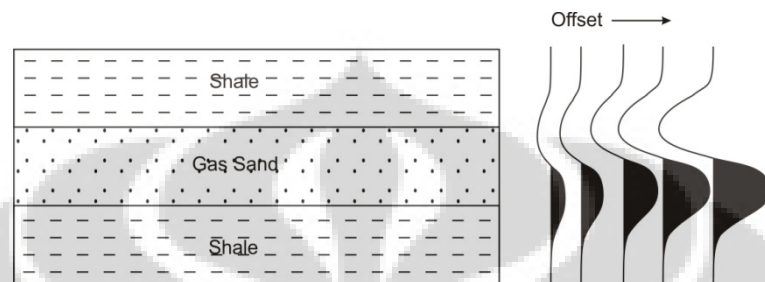
Persamaan (2.15) merupakan persamaan linier dengan G adalah fungsi dari Rasio Poisson terhadap densitas dari lapisan pemantul, yang dikenal sebagai *gradient* AVO atau *slope*, yaitu $G = B = R_p H_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}$ dan $R_p = A$ adalah reflektifitas *normal incidence* atau disebut *intercept*. Jadi terlihat dengan jelas bahwa ada perubahan nilai $R(\theta)$ terhadap sudut atau *offset*.

2.2.3. Analisis Anomali AVO

a) Model Dasar Anomali AVO

Model dasar untuk anomali AVO dapat digambarkan dengan menggunakan suatu lapisan *gas sand* di antara dua lapisan *shale* (Gambar 2.5). Nilai Rasio Poisson untuk *gas sand* lebih kecil daripada *shale* dan koefisien refleksinya berubah secara cepat terhadap sudut datang. Amplitudo yang

dihasilkan pada *gather offset* adalah refleksi negatif pada *offset* dekat dan menjadi lebih negatif pada *offset* jauh, yang diwujudkan dengan nilai absolut dari kenaikan amplitudo terhadap bertambahnya *offset*.



Gambar 2.5. Model dasar anomali AVO dari Rutherford dan Williams (1989) dengan menggunakan lapisan *gas sand* diantara dua lapisan *shale* (dalam Canning, 2000).

b) **Klasifikasi Rutherford dan Williams**

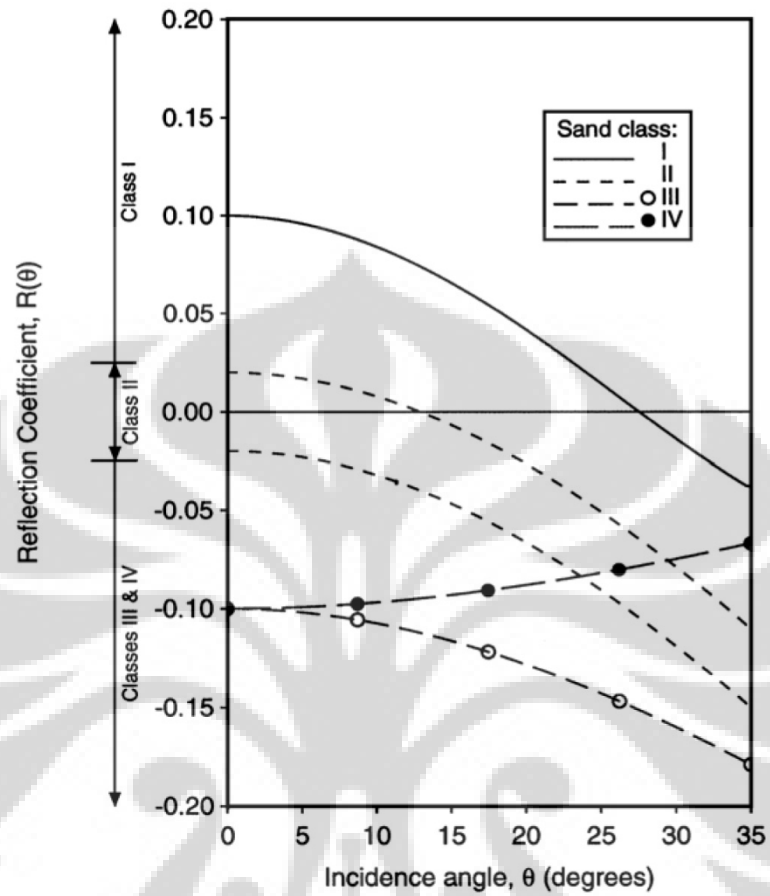
Rutherford dan Williams (1989) melakukan klasifikasi anomali AVO berdasarkan kandungan minyak dan gas menjadi tiga kelas yaitu:

- Kelas I : *High Impedance Contrast Sands*
- Kelas II : *Near-Zone Impedance Contrast Sands*
- Kelas III : *Low Impedance Contrast Sands*

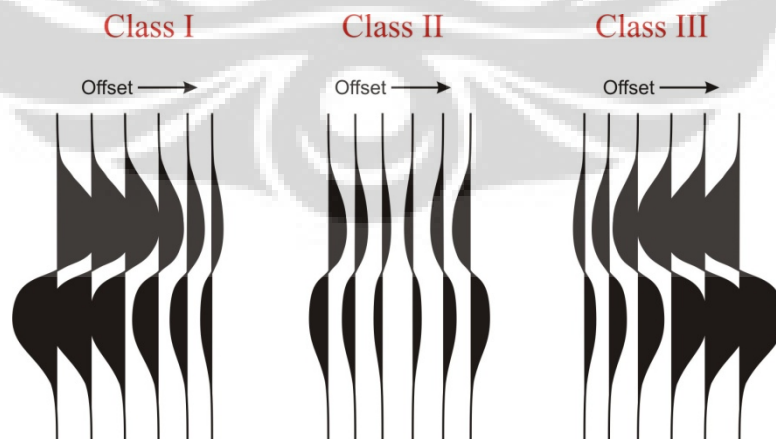
Castagna et al. (1998) menambahkan dengan *sandstone* kelas IV setelah melakukan *crossplot* AVO berdasarkan klasifikasi Rutherford dan Williams (1989) seperti tertera dalam Gambar 2.6.

High Impedance Contrast Sands (Kelas I)

Gas sand kelas I memiliki impedansi akustik (IA) yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan penutupnya (*cap-rock*). Koefisien refleksi dari normal incidence adalah positif pada top batupasir dan negatif pada base batupasir. Terletak di kuadran IV, terjadi penurunan amplitudo (*dimming effect*) dengan kenaikan *offset* (Gambar 2.7). Perubahan amplitudo terhadap *offset* (*gradien*) untuk kelas I ini lebih besar dibandingkan kelas lainnya.



Gambar 2.6. Klasifikasi anomali AVO menurut Rutherford dan Williams (1989) yang menunjukkan koefisien refleksi gelombang P pada *top* masing-masing *gas sand* (Castagna et al., 1989).



Gambar 2.7. Perubahan amplitudo terhadap *offset* untuk klasifikasi Rutherford dan Williams (dalam Canning, 2000).

Near-Zone Impedance Contrast Sands (Kelas II)

Gas sand kelas II memiliki harga IA yang hampir sama dengan *caprock*. Koefisien refleksi dari *normal incidence* bernilai kecil pada *top* dan *base gas sand*, tetapi amplitudonya lebih besar daripada sekitarnya. Tipe ini lebih terkonsolidasi dan kompak, dibagi menjadi dua yaitu kelas II dan kelas Iip. Kelas II mempunyai koefisien refleksi positif pada *zero offset* dan terjadi pembalikan polaritas di sekitar *near offset*.

Low Impedance Contrast Sands (Kelas III)

Gas sand kelas III memiliki IA lebih rendah dibandingkan *caprock*. Koefisien refleksi dari *normal incidence* selalu bernilai negatif dan semakin negatif dengan kenaikan *offset*. Pada data *stack* seismik, batupasir kelas III mempunyai amplitudo dan koefisien refleksi yang tinggi di keseluruhan *offset*. Pasir tipe ini biasanya kurang terkompaksi dan *unconsolidated*.

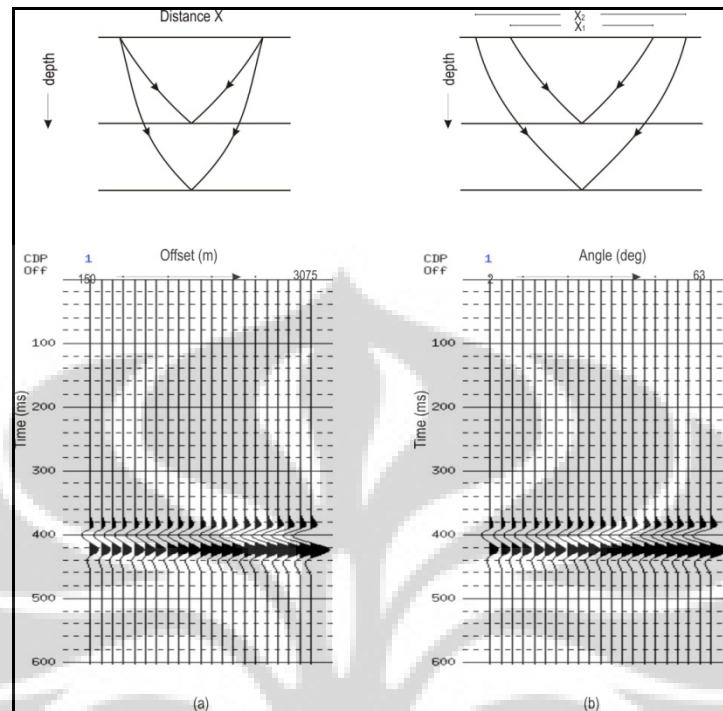
Low Impedance Contrast Sands (Kelas IV)

Gas sand kelas IV berada di kuadran II dengan *intercept* negatif dan *gradien* positif. Pada data *stack* seismik berupa *brightspot*, tetapi koefisien refleksi turun dengan kenaikan *offset*. Umumnya pasir dalam *porous sand* yang dibatasi oleh litologi berkecepatan gelombang seismik tinggi seperti *hard shale* (*silicaceous* atau *calcareous*), *siltstone*, *tightly cemented sand* atau *carbonate*.

Perubahan amplitudo terhadap *offset* untuk klasifikasi Rutherford dan Williams yang telah dijabarkan di atas tertera dalam Gambar 2.7.

c) Transformasi dari Domain Jarak ke Domain Sudut Datang

Persamaan Zoepritz maupun Shuey adalah tergantung pada sudut datang, sehingga data CDP *gather* yang masih dalam domain jarak (*offset*) harus ditransformasikan dahulu ke domain sudut seperti terlihat dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8. (a) CDP *gather* dalam domain *offset*, (b) CDP *gather* dalam domain sudut datang.

Untuk mentransformasi dari *offset* ke sudut datang dibutuhkan hubungan antara *offset* (X) dan sudut datang (θ). Dari gambar di atas didapat:

$$\tan \theta = \frac{X}{2Z} \quad (2.16)$$

dengan:

- θ : sudut datang
- X : *offset*
- Z : kedalaman (*depth*)

Dengan mengetahui harga kecepatan (V) maka Z dapat dihitung melalui cara sebagai berikut:

$$Z = \frac{Vt_0}{2} \quad (2.17)$$

dengan:

- V : kecepatan (*RMS* atau *average*)
- t_0 : waktu penjalaran gelombang pada *zero offset*

Dari persamaan (2.16) dan (2.17) didapatkan hubungan sudut datang sebagai fungsi dari *offset* (X) yaitu:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{X}{Z} \right] \quad (2.18)$$

d) Atribut AVO

Atribut AVO merupakan komponen-komponen dari sebuah sinyal yang digunakan untuk mengetahui perubahan amplitudo terhadap *offset* atau sudut datang yang dapat diamati secara individual atau kombinasi antara dua komponen. Secara umum atribut AVO terdiri dari *Intercept* (A), *Gradient* (B), *Gradient Stack* (A*B), *Pseudo Poisson's Ratio* (A+B), *Angle Stack Limited (Range Limited Stack)*, dan *Crossplot A vs B*.

Intercept (A)

Atribut ini merupakan *intercept* dari grafik amplitudo fungsi ($\sin^2\theta$) atau kuadrat sinus dari sudut datang. Atribut ini didefinisikan sebagai besarnya amplitudo refleksi pada *zero offset* atau koefisien refleksi sudut datang normal. Atribut *intercept* ini merupakan nilai koefisien refleksi pada *zero offset*.

Gradient (B)

Gradient merupakan perubahan relatif amplitudo refleksi terhadap kuadrat sinus sudut datangnya ($\sin^2\theta$) dari gelombang seismik yang mengenai bidang reflektor. *Gradient* ini digambarkan oleh kemiringan *slope* dari kurva $R(\theta)$ vs $\sin^2\theta$.

Gradient Stack (A*B)

Atribut ini merupakan perkalian antara *Intercept* (A) dengan *Gradient* (B). Perkalian antara kedua atribut ini akan bernilai positif jika *intercept* dan *gradient*-nya bernilai positif atau negatif. Nilai perkalian akan menjadi negatif jika *intercept* dan *gradient* memiliki nilai yang saling berlawanan positif atau negatifnya. Hasil perkalian yang positif menunjukkan adanya peningkatan

amplitudo terhadap *offset* yang merupakan anomali AVO positif. Amplitudo berkurang terhadap *offset* ditunjukkan oleh hasil perkalian yang negatif, sedangkan amplitudo yang konstan mempunyai hasil perkalian bernilai nol.

Pseudo Poisson's Ratio (A+B)

Pseudo Poisson's Ratio adalah atribut yang dihasilkan dari penjumlahan *Intercept* dengan *Gradient* (A+B) yang secara empirik dapat mendeliniasi zona prospek batupasir yang berisi gas.

Angle Stack Limited (Range Limited Stack)

Metoda ini adalah suatu cara untuk mengetahui perubahan amplitudo suatu data *stack* dengan membagi *offset* sudut datang menjadi beberapa bagian pada CDP *gather*. Anomali AVO dapat diketahui secara langsung hanya dengan melihat perubahan amplitudo yang terjadi pada masing-masing *stack* yaitu *stack* dekat atau *nearstack* dan *stack* jauh atau *farstack*.

Crossplot A vs B

Berdasarkan persamaan (2.15), dibuat suatu *crossplot* antara A dan B yang bertujuan untuk mengetahui anomali AVO secara lebih jelas. Atribut ini bekerja lebih baik untuk jenis pasir kelas III dengan memasukkan input berupa *gradient stack* pada interval tertentu yang selanjutnya hasil *crossplot*-nya dibagi menjadi beberapa zona.

2.2.4. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Amplitudo

Terdapat dua faktor utama yang mempengaruhi amplitudo gelombang seismik, yaitu faktor alam dan faktor teknis. Faktor alam merupakan sifat-sifat gelombang seismik sebagai fenomena alam, misalnya melemahnya energi akibat semakin jauhnya perambatan gelombang, berkurangnya energi akibat pantulan dan pembiasan di bidang batas antar lapisan, atenuasi, interferensi, dan *tuning effect*. Selain itu, faktor alam lainnya yang berpengaruh pada amplitudo yaitu,

multiple, *noise*, dan kondisi geologi permukaan seperti pelapukan. Faktor teknis meliputi pengaruh instrumen pada saat perekaman dan pengolahan data.

a) Faktor Geometris (*Spherical Spreading*)

Faktor geometri adalah berkurangnya amplitudo gelombang, karena energinya menjalar ketika melalui medium. Jika gelombang seismik melewati suatu medium yang biasa dianggap medium ideal, yaitu medium homogen dan isotropis, maka setiap saat medan gelombang membentuk suatu luasan berupa lingkaran, sehingga besar amplitudo gelombang akan melemah sebanding dengan kebalikan jarak yang ditempuh.

b) Faktor Atenuasi dan Interferensi

Energi gelombang seismik juga mengalami pelemahan karena pengaruh penyerapan oleh medium inelastik (*inelastic attenuation*). Penyerapan energi ini terjadi karena pengaruh gesekan ketika gelombang melalui batuan yang kurang elastik sehingga mengubah energinya menjadi energi panas. Amplitudo refleksi akan dipengaruhi oleh sifat absorpsi dari batuan yang dilewati. Juga adanya *noise* koheren, misalnya *multiple* dan difraksi akan mempengaruhi amplitudo gelombang seismik jika keduanya berinterferensi. Atenuasi gelombang seismik mencerminkan pelemahan energi gelombang seismik akibat penyerapan oleh medium yang dilaluinya.

c) *Tuning Effect*

Selain interferensi karena adanya *multiple* dan difraksi yang mempengaruhi amplitudo gelombang seismik, adanya lapisan tipis juga akan menghasilkan interferensi yang menyebabkan amplitudo sinyal seismik dapat berubah. Akibat interferensi dari gelombang-gelombang yang dipantulkan oleh permukaan bagian atas dan dasar lapisan tipis, *resultant* amplitudonya dapat menjadi lebih rendah ataupun lebih tinggi daripada yang semestinya.

d) Pengaruh Bidang Batas Antar Lapisan

Pada bidang batas antara dua lapisan, maka gelombang seismik dapat mengalami tiga peristiwa, yaitu refleksi, transmisi, dan konversi. Akibatnya energi gelombang seismik akan terbagi menjadi tiga bagian pula.

e) Faktor-Faktor Teknis

Faktor-faktor teknis dibagi menjadi dua yaitu pada saat perekaman data dan pada pengolahan data seismik. Saat perekaman data seismik, terdapat pengaruh pemilihan *receiver array* ataupun pengaturan muatan (*source array*), serta pengaruh pada *amplifier* dan kopling antara geofon dan tanah, dan *noise* dari kabel. Ketika melakukan pengolahan data seismik, banyak proses yang akan mempengaruhi amplitudo refleksi, misalnya *equalization*, *stacking*, dan *amplitude balancing*, sehingga pemilihan proses pada pengolahan data seismik untuk kepentingan analisis AVO harus dilakukan secara hati-hati agar data yang dihasilkan relatif mendekati *true amplitude*.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Data Seismik

Data yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah data seismik refleksi *multichannel* dua dimensi (2D). Akuisisi data dilakukan dalam kegiatan Ekspedisi *Seismic and Geoacoustic Investigations along the Sunda-Banda Arc Transition – SO190 Research Cruise*, disingkat dengan nama Ekspedisi SINDBAD, pada tahun 2006. Ekspedisi ini merupakan hasil kerjasama riset kelautan antara Republik Indonesia dengan Jerman pada tahun 2006 menggunakan Kapal Riset *R/V Sonne* Jerman yang dilengkapi dengan peralatan seismik refleksi *multichannel* dengan 240 *channel streamer* (3 km), dilengkapi dengan 16 buah *airgun* yang tersusun dalam satu rangkaian dengan kapasitas total 50,8 liter (3100 in^3), interval penembakan (*shooting interval*) 50 meter, *sampling interval* 2 *milisecond* (ms), dan panjang rekaman (*record length*) 14000 ms.

Sejumlah 20 lintasan seismik marin dengan total sepanjang 4933 km telah diakuisisi. Enam lintasan berarah tegak lurus dengan *deformation front*, dan memotong cekungan busur muka (*forearc basin*), tinggian busur luar (*outerarc high*), hingga kerak samudera (*oceanic litosphere*); dan sebanyak tiga lintasan (BGR06-307, BGR06-308, dan BGR06-309) melewati sepanjang Cekungan Lombok dan 2 lintasan melewati *Cekungan Sawu* (BGR06-319 dan BGR06-320). Untuk kepentingan penelitian indikasi hidrokarbon di Cekungan Busur Muka Lombok, dipilih lintasan BGR06-307 sebagai obyek penelitian.

Tahapan kerja yang dilakukan dalam penelitian ini adalah meliputi pengolahan data seismik dan melakukan analisis AVO terhadap data seismik yang telah dilakukan pengolahan datanya tersebut. Kemudian hasil anomali AVO yang didapatkan pada sebuah CDP gather dalam horison tertentu, akan diambil untuk dilakukan pemodelan.

3.2. Pengolahan Data Seismik Lintasan BGR06-307

Pengolahan data seismik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Paradigm (Focus 5.2 – Epos 3.0 dan GeoDepth 8.0)* di bawah sistem operasi *Linux*.

3.2.1. SEG-D Input dari DLT Tape

Melakukan input data dari DLT *tape* yang tersimpan dalam format SEG-D untuk disimpan ke dalam *hardisk* yang akan diterjemahkan ke dalam format internal *Paradigm*.

3.2.2. Geometry Building dan CDP Sorting

Koreksi geometri dilakukan untuk melakukan koreksi terhadap posisi *airgun* (sumber gelombang seismik) dan posisi *streamer* terhadap posisi antena GPS. Dengan dilakukannya geometri pada urutan pengolahan data, maka posisi sumber gelombang seismik, *streamer*, dan posisi titik refleksi berada dalam posisi (koordinat) yang sebenarnya. Selain itu, geometri dibutuhkan pula untuk mengembalikan posisi letak *airgun* dan *streamer* agar terletak pada satu garis. Selanjutnya data seismik tersebut disortir berdasarkan CDP. Informasi akuisisi yang dimasukkan untuk membuat *geometry* ini adalah:

- *Sampling rate* : 2 ms
- *Data length* : 14000 ms
- *Number of shot* : 5784
- *Number of channel* : 240
- *Close* : 1
- *Offset* : 150 m
- *Group interval* : 12,5 m
- *Shot interval* : 50 m
- *Number* : 1

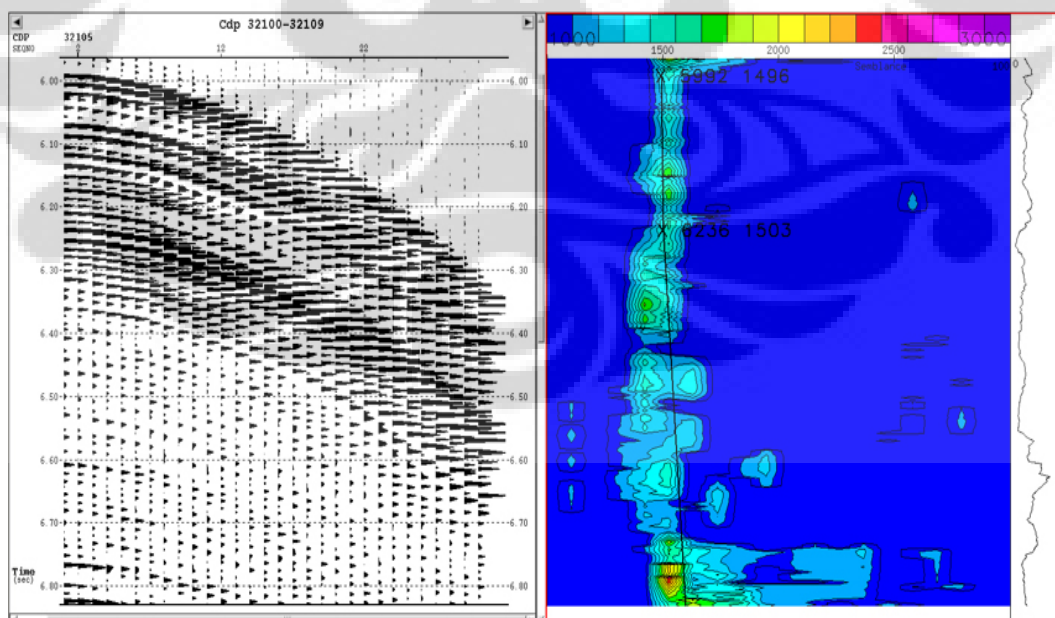
Dari hasil pengolahan data seismik, mulai dari input SEG-D, *geometry building* dan *CDP sorting*, maka akan dihasilkan data *CDP gather* yang sudah dapat digunakan dalam analisis AVO.

3.2.3. Filter

Digunakan filter *bandpass* dengan nilai 6-12-60-120 agar dimungkinkan mendapatkan hasil yang lebih baik. Nilai filter ini mewakili spektrum sinyal yang dihasilkan oleh *airgun* dan menghilangkan *noise* pada frekuensi rendah yang terdapat pada data karena pada saat akuisisi data tidak menggunakan *filter low-cut*.

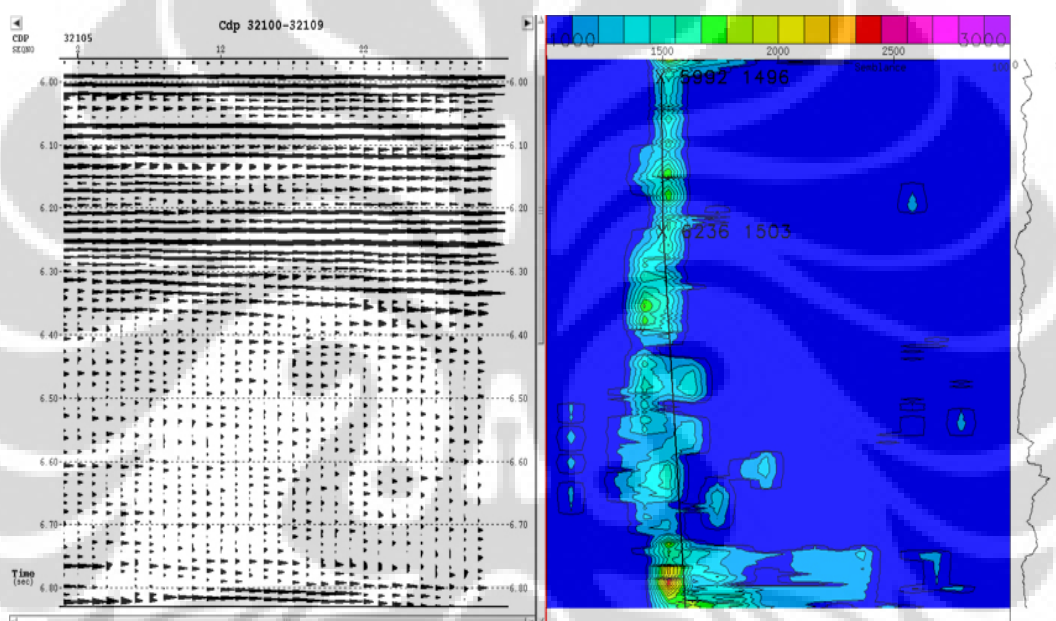
3.2.4. Velocity Analysis

Dilakukan dengan spasi yang lebih rapat yaitu setiap 20 CDP pada kurva NMO (*Normal Move Out*) yang berbentuk lengkung hiperbolik dalam diagram t-x (waktu-jarak) yang mencerminkan perbedaan jarak antara sumber gelombang ke posisi penerima. Adanya perbedaan jarak tersebut mengakibatkan pantulan dari reflektor bawah permukaan yang datar dan pantulan dari satu titik reflektor yang diamati dari jarak yang berbeda akan tampak melengkung (Gambar 3.1). Kelengkungan ini pun juga dipengaruhi oleh kecepatan penjalaran gelombang seismik di dalam medium batuan bawah permukaan, sehingga dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan nilai kecepatan yang disebut *V_{nmo}* atau *V_{stacking}*.



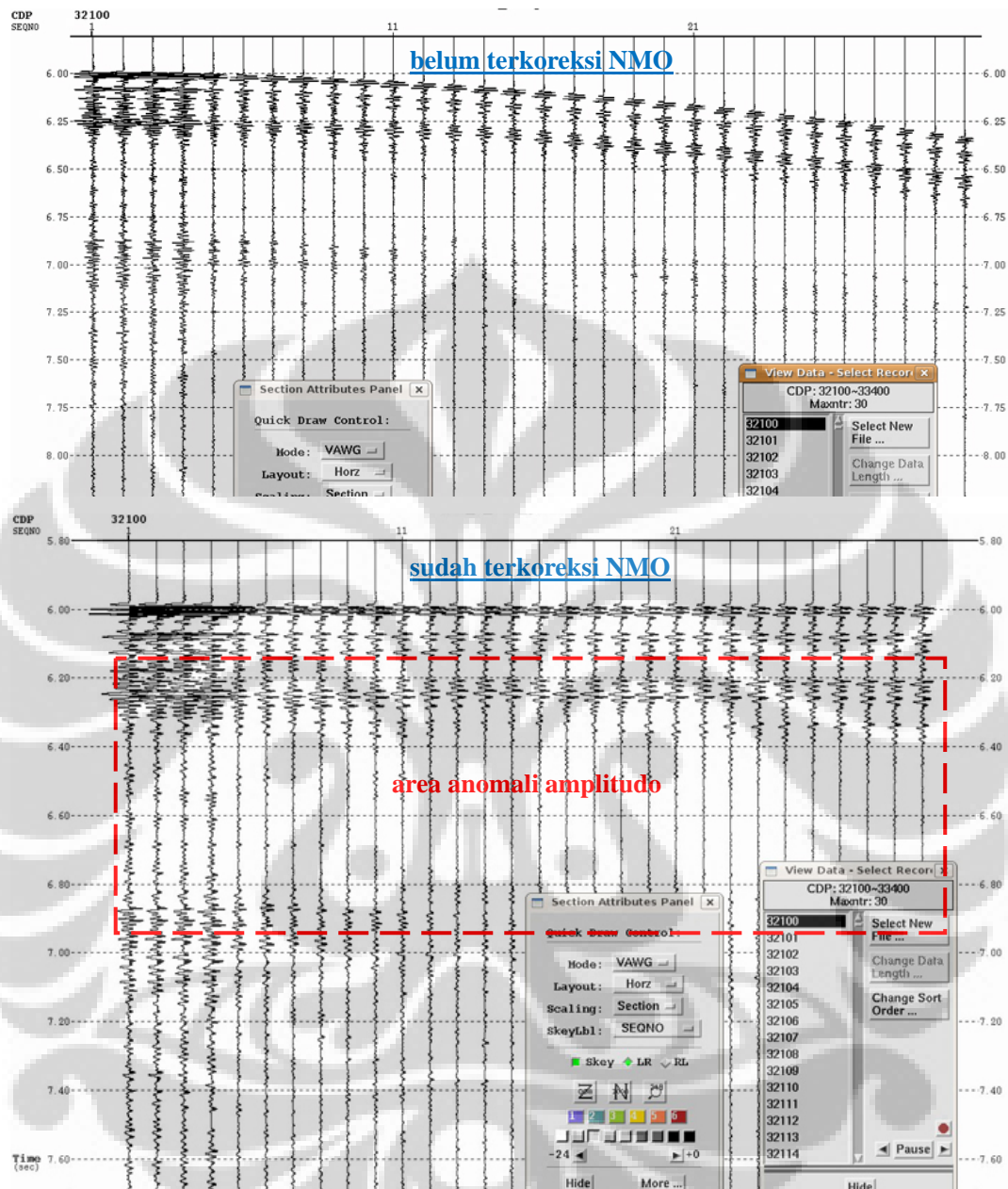
Gambar 3.1. *Velocity picking* untuk mendapatkan nilai kecepatan *stack*, yang dilakukan untuk setiap 20 CDP.

Untuk mendapatkan nilai V_{nmo} atau $V_{stacking}$ ini adalah melalui suatu tahap koreksi terhadap pantulan normal yang disebut juga sebagai koreksi NMO (*Normal Move Out*) dan kemudian amplitudo sinyalnya dijumlahkan (*di-stack*). Jika kecepatan yang dipilih tepat, maka hasil penjumlahan amplitudonya akan maksimal. Atas dasar ini maka dapat dibentuk spektrum kecepatan yang dapat memberitahu nilai kecepatan yang tepat untuk berbagai waktu datang gelombang seismik yang terpantul (Gambar 3.2).



Gambar 3.2. Koreksi terhadap pantulan normal yang disebut juga sebagai koreksi NMO dan *display* dari spektrum kecepatan.

Dalam Gambar 3.3, ditunjukkan adanya anomali amplitudo lokal yang dapat teramati dengan jelas pada CDP *gather* yang telah terkoreksi NMO. Refleksi amplitudo pada area tersebut terlihat lebih lemah jika dibandingkan dengan di bagian atas atau bawahnya. Untuk itu maka akan dilakukan analisis AVO yang juga sekaligus untuk mencari kenampakan *brightspot* yang dapat terjadi di antara area *seismic blanking* tersebut.

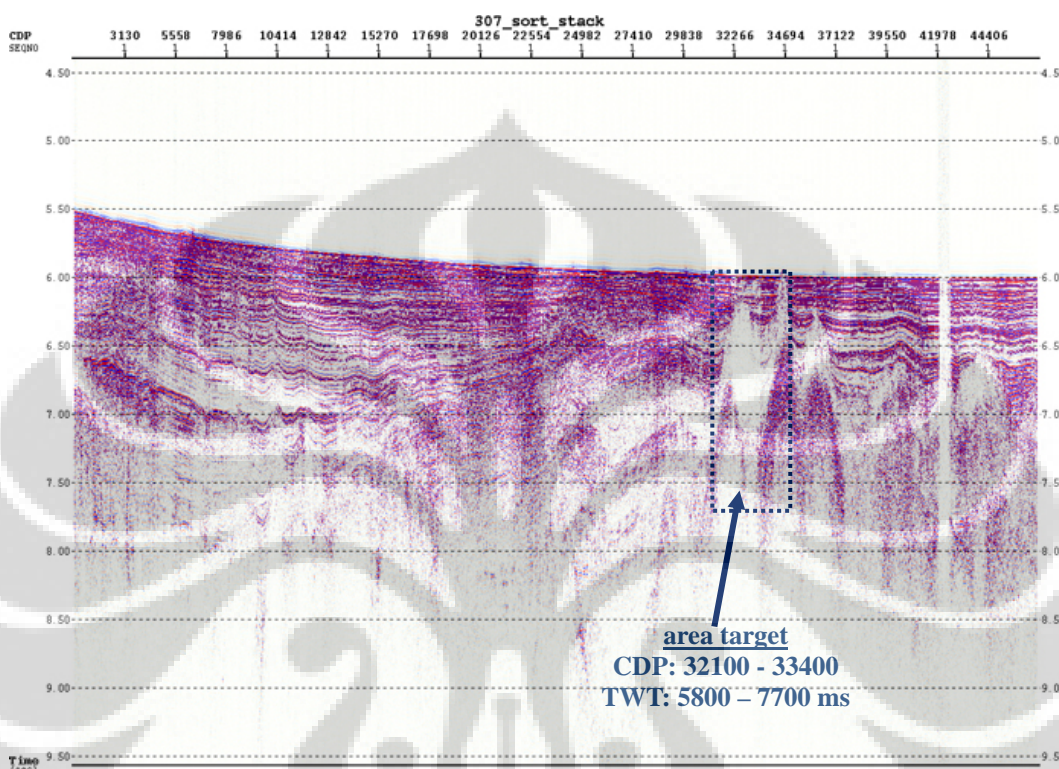


Gambar 3.3. Gambar bagian atas menunjukkan CDP *gather* yang belum terkoreksi NMO; Gambar bagian bawah merupakan hasil koreksi NMO yang juga memperlihatkan adanya area anomali amplitudo.

3.2.5. *Post-Stack Time Migration (PSTM)*

Merupakan hasil dari *stack* terhadap data CDP *gather* yang telah terkoreksi NMO dan dimigrasi. Data *stack* PSTM tersebut merupakan penjumlahan (*stack*) CDP secara keseluruhan menggunakan *Khirchoff Post-Stack Time Migration*. Hasilnya berupa penampang yang telah dapat menampilkan keseluruhan respon

seismik terhadap kontras impedansi antar bidang batas perlapisan serta kenampakan seismik lainnya (Gambar 3.4).



Gambar 3.4. Penampang *Post-Stack Time Migration* hasil pengolahan data seismik lintasan BGR06-307 yang telah dapat memperlihatkan bidang-bidang batas perlapisan; area target untuk analisis AVO juga dipilih berdasarkan kenampakan *transparent layer* dalam penampang ini.

3.2.6. Output to SEG-Y format

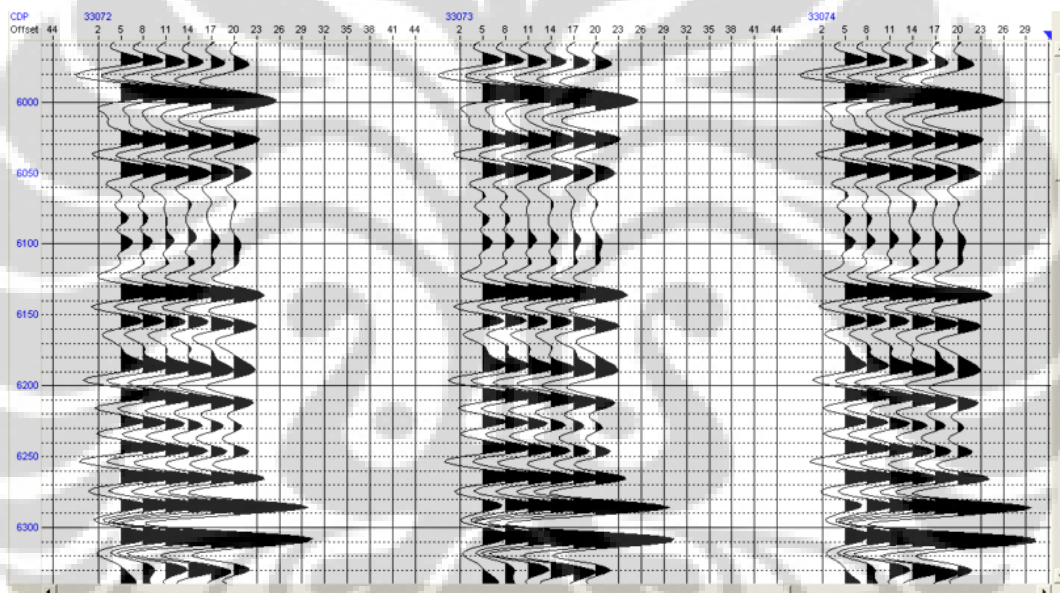
Analisis AVO yang akan dilakukan adalah menggunakan *software Hampson-Russell AVO 6.0 (HRS 6.0)*, karena itu dilakukan konversi data CDP *gather* pada area target yang sudah ditentukan, yaitu CDP 32100 – CDP 33400 dengan TWT 5800 – 7700 ms, ke dalam format SEG-Y.

3.3. Pengolahan dan Analisis Data AVO

Pengolahan dan analisis data AVO dilakukan dengan input data berupa data CDP *gather* dari CDP 32100 – CDP 33400 dengan TWT 5800 – 7700 ms dalam format *SEG-Y*. Data kecepatan yang digunakan adalah *RMS Velocity*.

3.3.1. *Angle Gather*

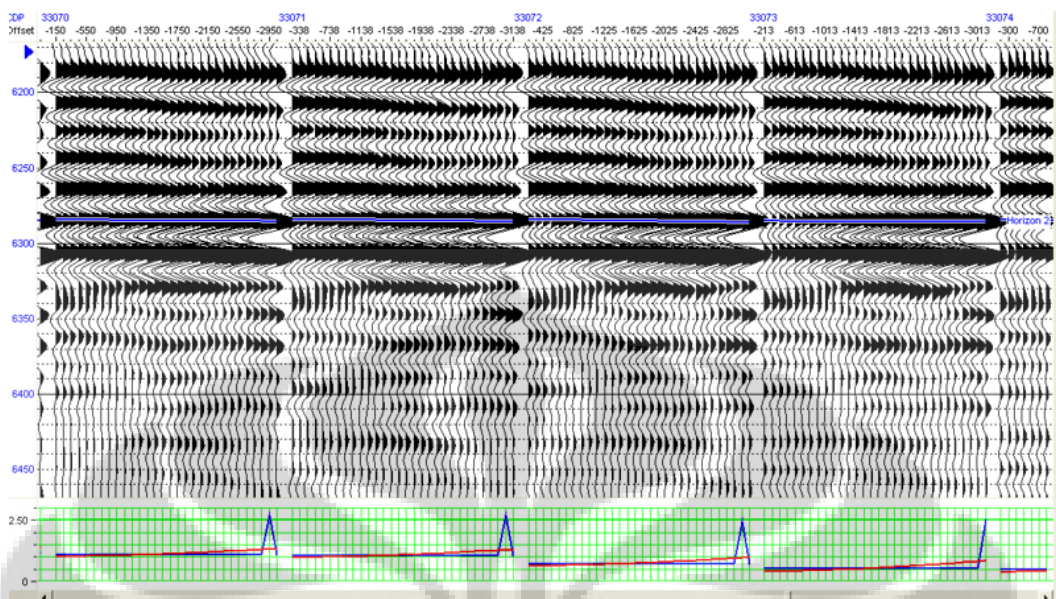
Dalam *angle gather* dapat dilihat faktor *maximum angle*, yaitu besarnya sudut maksimum yang digunakan untuk menghilangkan *noise* dan penentuan batas sudut kritis (*critical angle*) yang berhubungan dengan penyebaran muka gelombang yang mengalami pelemahan dengan bertambahnya jarak antara sumber dan penerima. Dalam Gambar 3.5 diperlihatkan bahwa data penelitian masih berada dalam rentang sudut antara 5 hingga 20° yang masih di bawah sudut kritis $\approx 35^\circ$.



Gambar 3.5. Respon amplitudo untuk masing-masing CDP terhadap sudut datang yang berkisar antara 5 – 20° dan masih berada di bawah sudut kritis.

3.3.2. **Grafik Respon AVO (*Gradient Analysis*)**

Grafik respon AVO ditampilkan berupa kurva hubungan antara perubahan amplitudo sinyal terpantul terhadap sudut datang (*angle of incidence*). Grafik respon AVO ini menunjukkan perilaku amplitudo sinyal terpantul terhadap sudut datang gelombang seismik berdasarkan persamaan Zoeppritz (1919), aproksimasi Shuey (1985), serta Aki dan Richard (1980). Berdasarkan grafik respon AVO tersebut, penentuan kelas pasir gas dari Klasifikasi Rutherford dan Williams (1989) dapat dilakukan. Grafik respon AVO yang menunjukkan *brightspot* terlihat dalam Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Grafik respon amplitudo untuk masing-masing CDP terhadap sudut datang dalam satu horizon yang menunjukkan adanya anomali amplitudo.

3.3.3. Gradient Stack

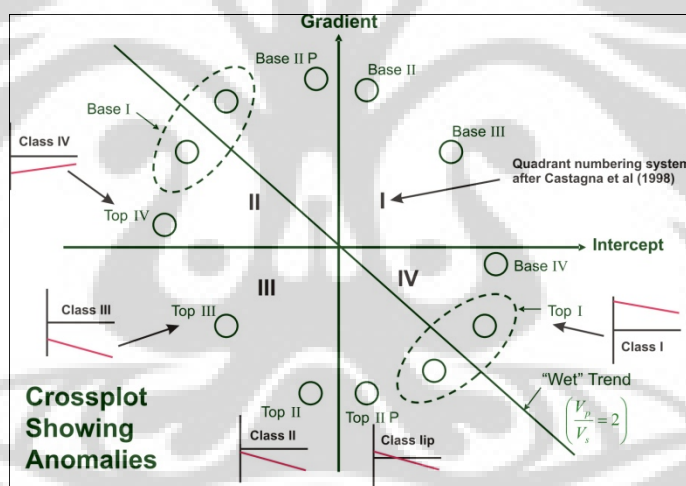
Proses ini menampilkan dua atribut sekaligus. Atribut pertama adalah *Intercept* (A) sebagai respon amplitudo pada *zero offset* atau pada sudut datang normal; amplitudo ini dikatakan dalam keadaan yang ideal dengan efek AVO yang tidak diperhitungkan. Atribut kedua adalah perubahan amplitudo setiap cuplikan waktu terhadap sudut datang yang diberikan oleh *Gradient* (B), dengan amplitudonya memperhitungkan keseluruhan pengaruh AVO. Proses ini diterapkan pada keseluruhan interval CDP dengan informasi data kecepatan berupa V_{rms} dan interval sudut datang yang diinginkan.

Sebagai hasil dari proses *gradient stack* adalah atribut *Product* (A*B), diberikan dengan nilai interval minimum dan maksimum masing-masing -1 dan 1, dengan AVO negatif diberikan warna biru, sedangkan AVO positif diberikan oleh warna merah. Untuk mengidentifikasi anomali AVO dapat ditunjukkan dengan:

- Hasil perkalian dua atribut (A*B) akan menampilkan daerah yang mempunyai *brightspot* yang kuat dan *gradient* yang besar.
- Pada kasus pasir gas (*gas sand*), anomali ditunjukkan oleh hasil perkalian atribut positif atau warna merah pada batas atas (*top sand*) dan batas bawah (*base sand*) dari pasir gas suatu formasi.

3.3.4. Penampang atribut A - B (*Crossplot Attribute*)

Proses ini dilakukan untuk mengetahui anomali AVO secara lebih detail dalam sumbu atribut A dan B. Atribut ini bekerja dengan baik untuk jenis *gas sand* kelas III. Interval CDP yang diamati berdasarkan hasil *gradient stack* yang telah dilokalisir pada kedalaman waktu. Daerah yang diarsir merupakan daerah AVO positif yang ditampilkan dalam sebuah penampang melintang atribut (*cross section*). Proses ini juga bertujuan sebagai validasi untuk anomali AVO pada *gradient stack* yang mempunyai harga A dan B keduanya positif atau negatif. Validasi anomali pada sumbu atribut A dan B dilakukan dengan membuat daerah (zone) arsiran untuk hasil perkalian $A*B$ pada masing-masing kuadran I dan III sebagai daerah AVO positif (Gambar 3.7).



Gambar 3.7. Kelas-kelas AVO yang ditentukan berdasarkan hasil *crossplot* yang menunjukkan adanya anomali (Simm et al, 2000 dalam Russel 2007).

3.3.5. Range Limited Stack (*Angle Stack*)

Data *stack* ini dihasilkan dengan membagi *offset* menjadi beberapa bagian, dengan memberikan batas sudut datang tertentu pada CDP *gather*. Pada penampang *angle stack* untuk batasan sudut datang tertentu, terlihat semakin besar sudut datangnya, maka kenampakan anomali semakin jelas atau anomali amplitudo *stack*-nya juga akan memiliki nilai yang lebih besar.

Respon amplitudo akan berbeda-beda untuk lapisan-lapisan bawah permukaan. Pada lapisan pasir yang mengandung gas, amplitudonya akan semakin

membesar terhadap semakin jauhnya jarak *offset* atau kenaikan sudut datangnya. Sedangkan untuk lapisan yang tidak mengandung gas, amplitudonya akan mengecil ketika jarak antara sumber ke penerima semakin jauh. Pada penelitian ini, atribut yang dihasilkan *angle stack* ini dibagi menjadi tiga yaitu *near angle stack (offset dekat)* berada pada rentang sudut $5^{\circ} - 10^{\circ}$, *medium angle stack (offset tengah)* pada kisaran $10^{\circ} - 15^{\circ}$ dan *far angle stack (offset jauh)* berada pada kisaran sudut $15^{\circ} - 20^{\circ}$. Dari hasil *range limited stack* tersebut dapat diamati adanya perubahan amplitudo *offset* dekat dan *offset* jauh yang secara langsung akan merefleksikan adanya anomali AVO.

3.4. Pemodelan AVO

Penentuan model dan estimasi parameter fisis terhadap respon seismik digambarkan oleh sintetik seismogram terhadap *offset* atau sudut datang. Dengan menggunakan pendekatan Zoeppritz, maka akan dapat ditentukan bentuk model sintetiknya yang dapat mewakili model geologi dengan nilai parameter fisik berupa V_p , V_s , dan ρ dari suatu lapisan target yang berhubungan erat dengan karakteristik batumannya (misalnya batupasir dan serpih) dengan mengamati nilai anomali amplitudo yang tampak.

Pada target area penelitian ini tidak terdapat data log sumur karena memang merupakan *frontier area* yang belum pernah dilakukan eksplorasi detail, sehingga untuk pembuatan modelnya dilakukan dengan cara mencocokkan kurva anomali AVO model dan data riil dengan mengubah-ubah parameter modelnya hingga didapatkan model yang paling sesuai. Tahapan pembuatan model ini secara berurutan dilakukan sebagai berikut:

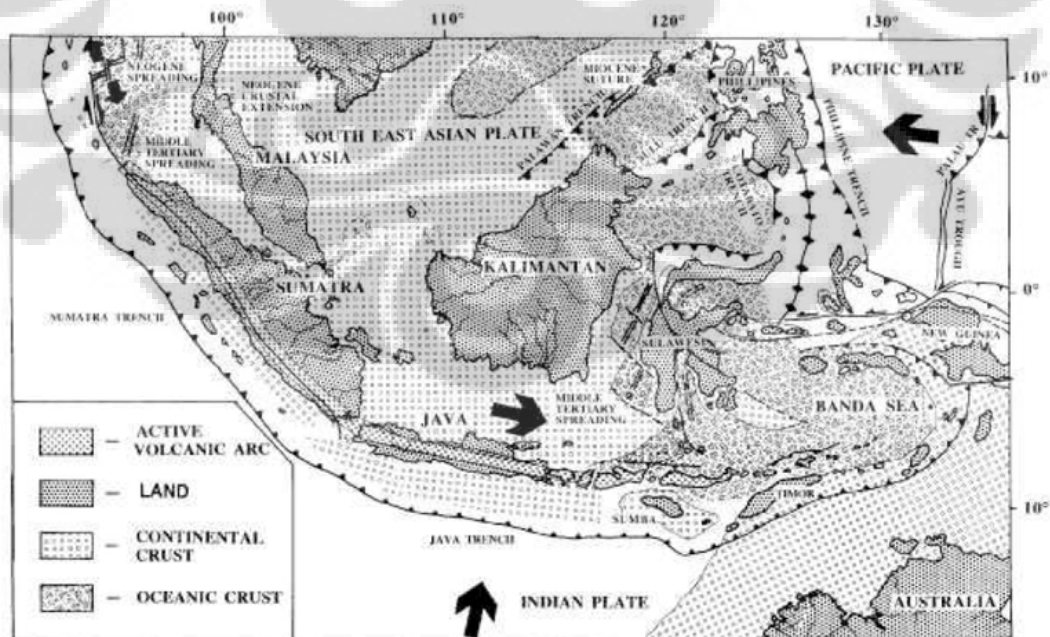
- Penentuan lapisan target yang meliputi batas lapisan batuan reservoir; ditentukan dari hasil analisis atribut AVO.
- Penentuan bidang batas dan parameter model untuk V_p , V_s , dan ρ .
- Pemilihan horisan dan menampilkan kurva amplitudo terhadap *offset*.
- Melakukan pencocokan kurva anomali AVO model dan data dengan melakukan perubahan berulang-ulang terhadap parameter modelnya.

BAB IV

TINJAUAN GEOLOGI

4.1. Kerangka Tektonik Cekungan Busur Muka (*Forearc Basin*)

Kepulauan Indonesia terletak pada daerah pertemuan tiga lempeng utama atau disebut sebagai *triple junction*. Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik saling berinteraksi satu dengan lainnya, sehingga membuat tatanan tektonik Kepulauan Indonesia memiliki pola yang cukup rumit dan kompleks. Dalam Gambar 4.1 dijelaskan mengenai tatanan tektonik Indonesia yang memperlihatkan Lempeng Indo-Australia tersubduksi di bawah Lempeng Eurasia (zona subduksi Sunda-Banda) dan membentuk batas lempeng yang terpanjang di Asia Tenggara, serta menggambarkan bermacam variasi parameter geologi misalnya sedimen input, umur subduksi lempeng, dan subduksi *oblique* (Muller et al., 2006).



Gambar 4.1. Tatanan tektonik Indonesia memperlihatkan Lempeng Indo-Australia tersubduksi di bawah Lempeng Eurasia (zona subduksi Sunda-Banda); membentuk batas lempeng terpanjang di Asia Tenggara dengan bermacam variasi parameter geologinya (Muller et al., 2006).

Daerah penelitian ini yaitu Cekungan Busur Muka Lombok, termasuk ke dalam zona pertemuan sepanjang batas Lempeng Sunda-Banda yang membentang lebih dari 5000 km (Hamilton, 1979). Pada batas benua inilah, konsep formasi tinggian (*mountain formation*) dan tektonik lempeng telah dikembangkan sejak awal abad lalu. Banyaknya kegiatan penelitian yang telah dilakukan, telah mampu memperjelas hubungan antara struktur vulkanik dan subduksi pada parit laut dalam (*deep-sea trench*). Berdasarkan penelitian pada Busur Sunda bagian Barat, telah memberikan kemajuan yang berarti bagi pemahaman mengenai tatanan tektonik cekungan busur muka. Ciri-ciri utamanya dihubungkan dengan pengamatan sedimen yang tebal dari Kipas Bengal dan munculnya sistem akresi Sunda ke status klasik. Tidak hanya untuk Indonesia, tetapi penelitian mengenai tektonik lempeng di wilayah tersebut telah menyumbangkan konsep dasar mengenai evolusi busur muka dan sedimen akresi bagi dunia (Muller et al., 2006).

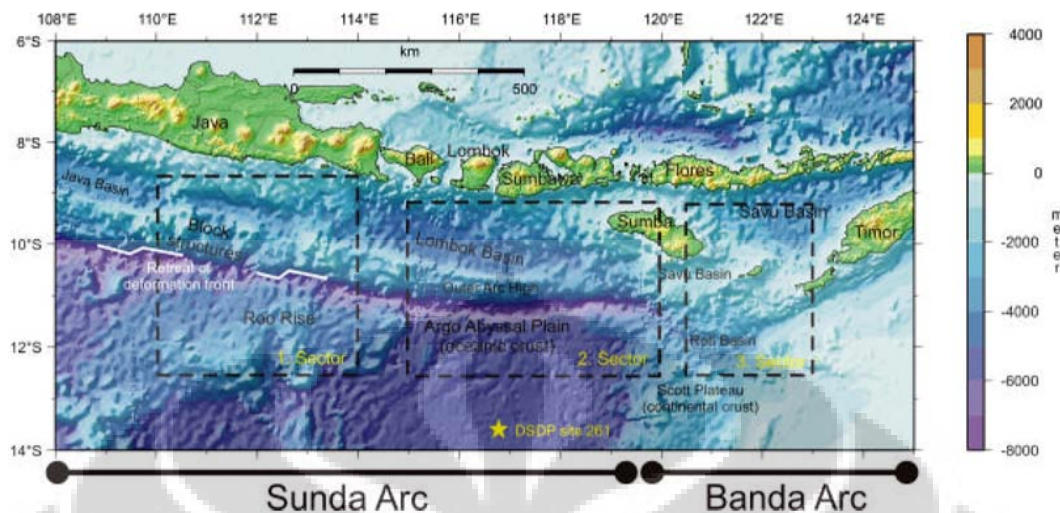
Penyelidikan yang dilakukan di busur Sunda bagian timur lebih sedikit bila dibandingkan dengan Busur Sunda bagian Barat. Padahal, daerah ini merupakan lokasi yang menarik bagi penelitian tektonik lempeng karena merupakan zona transisi dari pertemuan batas lempeng-lempeng tektonik. Transisi dari subduksi samudera-samudera pada busur kepulauan terhadap tumbukan benua-samudera sepanjang Busur Banda sangat dipengaruhi oleh benua-benua kecil (*micro-continent plate*) yang terperangkap di antara parit laut dalam dan busur kepulauan. Tumbukan antara busur kepulauan dan benua merupakan faktor penting dalam pembentukan orogenesis dan cekungan yang mekanismenya masih terus diselidiki hingga sekarang.

Sistem subduksi merupakan kontribusi utama bagi pembentukan cekungan busur muka. Hal tersebut merupakan ciri-ciri yang selalu ditemukan pada batas zona subduksi. Dengan demikian dapat dipahami bahwa keberadaan cekungan ini sangat kuat kaitannya dengan proses subduksi. Evolusi cekungan busur muka telah diamati, baik pada daerah akresi maupun pada tepian pertemuan erosional (*erotional base*). Hubungannya hingga saat ini masih belum dapat dipecahkan, karena itu cekungan-cekungan tersebut dianggap memainkan peranan penting pada batas konvergensi atau batas benua seperti halnya dengan busur

kepulauan. Perkembangan struktur busur muka sepanjang Busur Sunda-Banda utamanya dikontrol oleh ketebalan dari struktur-struktur lokal batuan dasar (*local basement structure*) yang sangat bervariasi di sepanjang batas tersebut. Penurunan cekungan (*subsidence*) dipengaruhi oleh proses pembentukan *accretionary wedge* di bagian barat dan tengah Busur Sunda, akumulasi sedimen, dan pertumbuhan *wedge* yang mengakibatkan turunnya struktur *basement* (Matson and Moore, 1992) maupun lempeng yang datang (*incoming plate*). Jika proses ini terjadi terus-menerus, maka jarak antara busur vulkanik dan *deformation front* akan membesar, sedangkan bagian lempeng yang masuk akan mengalami pelenturan ke atas dan menyebabkan terangkatnya *subduction complex* (Pavlis and Bruhn, 1983).

Cekungan busur muka (*forearc basin*) terletak di antara busur tinggian luar (*outerarc high*) dan busur magmatik (*magmatic arc*). Kedua busur ini memberikan suplai sedimen kepada cekungan busur muka. Oleh karena itu, stratigrafi dari cekungan busur muka akan menyimpan informasi tentang pembentukan kedua busur tersebut. Dapat dikatakan pula bahwa stratigrafi cekungan busur muka dapat menjelaskan kaitan antara proses sedimentasi dan tektonik, serta menyimpan informasi mengenai akibat dari adanya tumbukan lempeng pada saat sebelum terbentuknya struktur busur muka.

Untuk wilayah Indonesia, proses tektonik yang membentuk cekungan busur muka di di sepanjang Samudera Hindia bagian Timur hingga Laut Banda dapat dibagi menjadi tiga sektor. Dalam Gambar 4.2, terlihat peta batimetri dari satelit gravimetri yang di dalamnya dijelaskan mengenai pembagian sektor tersebut didasarkan atas letaknya terhadap zona subduksi Lempeng Sunda-Banda. Sektor ke-1 merupakan subduksi *Roo Rise* di selatan Jawa. Sektor ke-2 terdapat subduksi *Argo Abyssal Plain* di bawah Cekungan Lombok, dan Sektor ke-3 yang dicirikan oleh tumbukan (*collision*) dari *Scott Plateau* dengan Busur Kepulauan (Muller et al., 2006).



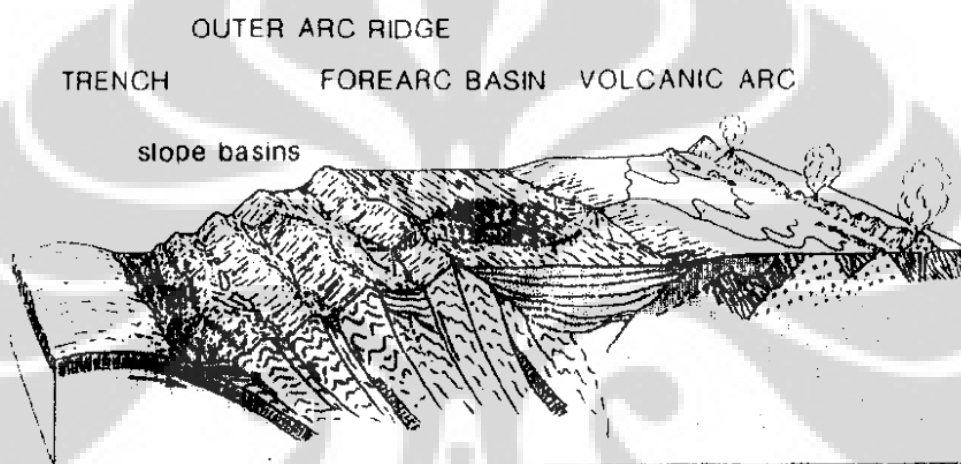
Gambar 4.2. Pembagian sektor proses tektonik pembentuk cekungan busur muka yang didasarkan atas letaknya terhadap zona subduksi Lempeng Sunda-Banda (Muller et al., 2006).

4.2. Cekungan Busur Muka Lombok (*Lombok Fore-Arc Basin*)

Cekungan Lombok merupakan bagian dari blok Sunda yang terletak di atas kerak benua yang menebal, dengan sumbu panjang 600 km dan sumbu lebar 120 km (Bolliger dan De Ruyter, 1975; Curray et al., 1977), total luas sekitar 70.000 km² dan kedalaman laut lebih dari 4 km. Sebelah utara cekungan ini dibatasi oleh Pulau Bali, Lombok dan Sumbawa. Sedangkan di timurnya dibatasi oleh Pulau Sumba yang membatasi Cekungan Lombok dari Cekungan Sawu.

Aktivitas tektonik saat ini masih dalam fase pembentukan awal, dikontrol oleh subduksi *Argo Abyssal Plain* dan tumbukan *Scott Plateau* dengan pulau-pulau di utaranya (*Sundaland*). Tumbukan ini mengakibatkan pengangkatan bagian timur cekungan. Lempeng samudera *Argo Abyssal Plain* diperkirakan berusia dari Jurasik Akhir sampai Kapur Awal dan menyusup ke bawah lempeng benua ketika mendekati palung, mengarah kepada pembentukan patahan normal, struktur *horst* dan *graben*, dan berasosiasi dengan kegiatan *extensional earthquake* (van der Weff, 1996). Topografi yang kasar, *basement* ditutupi oleh sedimen lempung (berumur Kapur), *nannofossil Ooze* (Miosen Awal dan Pliosen) dan *radiolarian clay* (Kuartar), yang telah di ambil sampelnya pada kegiatan survey DSDP (*Deep Sea Drilling Project*) site 261 (1.3) (Heirtzler et al., 1974; Hinz et al., 1978 dalam Muller, 2006). Tutupan sedimen pada umumnya memiliki

ketebalan kurang dari beberapa ratus meter saja (Masson et al., 1990). *Outer arc high* sepanjang 100 km berada di selatan Bali dan memanjang ke arah timur dengan lebar 70 km di selatan Sumbawa. Kondisi lempeng yang menumpanginya sampai saat ini masih belum diketahui. Secara sketsa diagramatik, Moore et al. (1980) membuat pembagian tatanan tektonik utama dari sistem palung-busur Sunda-Banda seperti tertera pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Sketsa diagramatik menggambarkan daerah cekungan busur muka pada Lempeng Sunda-Banda; menunjukkan tatanan tektonik utama dari sistem palun-busur Sunda-Banda (Moore et al. (1980).

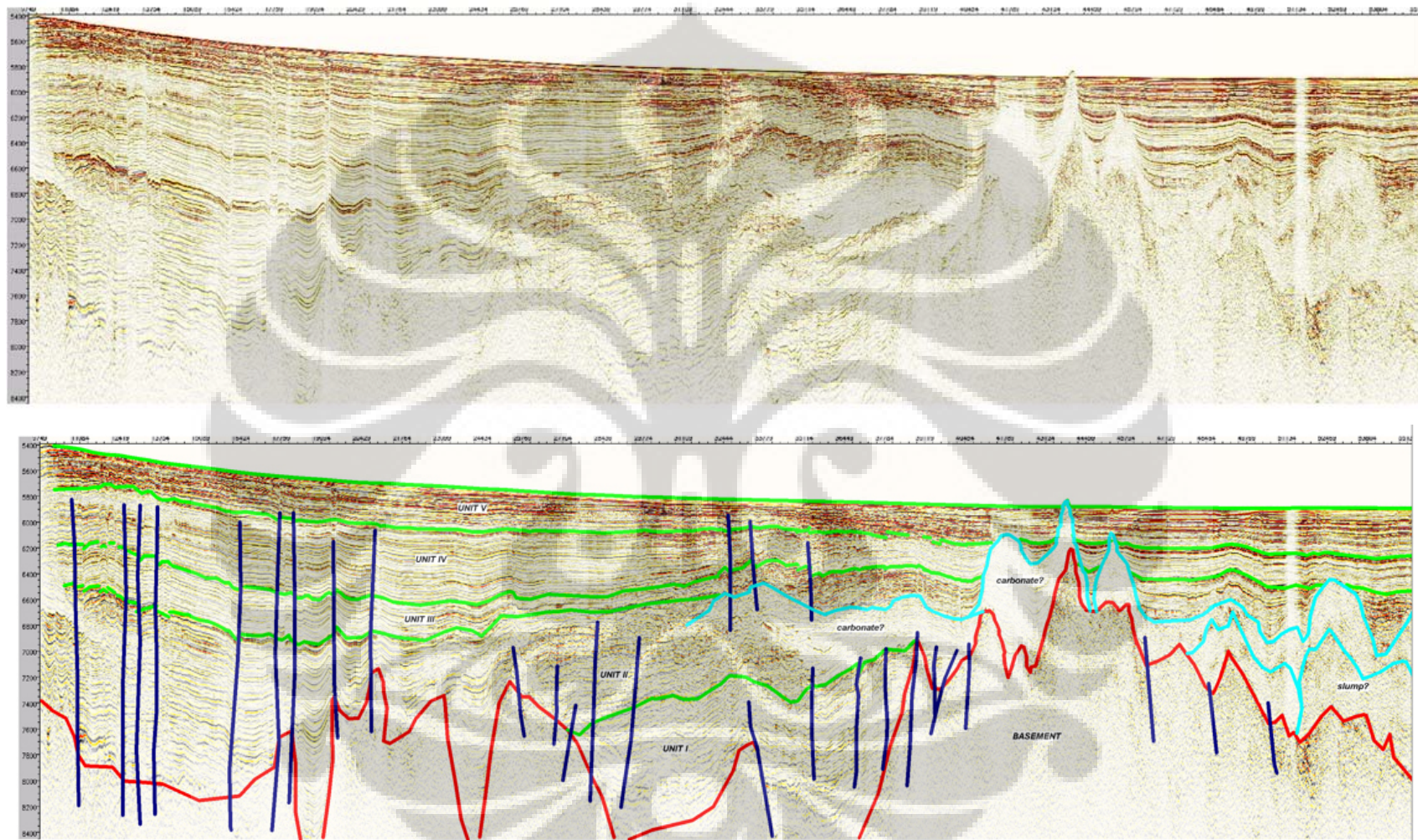
Dari studi awal dengan menggunakan seismik refraksi (Curry et al., 1977) di lepas pantai Jawa dan Bali, telah ditunjukkan kecepatan seismik sebesar 6.2 km/detik dengan ketebalan 18 km, yang saat itu diinterpretasikan sebagai *symtomatic of thickened oceanic crust*. Kecepatan seismik sebesar 6.9 km/s diinterpretasikan sebagai *magmatic island arc crust* (Hamilton, 1979). Menurut Van der Werff (1996), penebalan kerak samudera tersebut telah tergabung dengan *outer arc high*. Sementara Veevers & Coteril (1978), menganggap penebalan kerak samudera di daerah ini berjenis *oceanic epilith* yang berada di bawah Cekungan Lombok dan merupakan suatu parameter geodinamik baru. Penebalan kerak samudera ini memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan kerak samudera pada umumnya dan lebih resisten terhadap subduksi karena adanya *buoyancy* yang lebih tinggi. Meningkatnya *convergence rate* sejak Miosen dan

diikuti oleh datangnya *Scott Plateau* ke sistem subduksi (Pliosen hingga sekarang) menyebabkan timbulnya gaya kopling yang kuat antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia; mengakibatkan pengangkatan *outer arc high* dan bagian selatan cekungan busur muka.

Perubahan struktur maupun geomorfologi di area ini berhubungan dengan proses transisi dari subduksi busur samudera atau pulau ke tumbukan busur benua atau pulau, yang dimulai sejak 3 juta tahun yang lalu, seiring dengan datangnya *Scott Plateau* (Hamilton, 1979). Van der Werf (1996) berpendapat bahwa Pulau Sumba yang terletak di selatan busur vulkanik yang diwakili oleh Sumbawa dan Flores, telah menempel pada busur muka sebagai *microcontinent* sejak Oligosen Akhir atau Miosen Awal. Adanya *mud diapirs* juga yang terlihat pada data seismik yang menunjukkan adanya proses *dewatering* di busur muka (Van Weering et al., 1989; Van der Werff, 1995). Bentuk *mud volcano* ini kerap ditemukan di sepanjang *convergent margin* dan telah dipetakan di sepanjang busur Sunda-Banda (Van der Werff, 1995). *Mud volcano* umumnya juga mendorong gas *methane* dan gas lainnya ke luar selain mendorong air dan lumpur. Dengan demikian keberadaan *mud volcano* ini memainkan peranan penting pada proses aliran cairan pada zona subduksi. Sumber cairan ini bisa berasal dari beberapa meter sampai beberapa kilometer di bawah dasar laut (Kopf, 2002), sehingga hal ini termasuk bagian dari parameter yang mempengaruhi proses subduksi di bawah Cekungan Busur Muka.

4.3. Lintasan BGR06-307

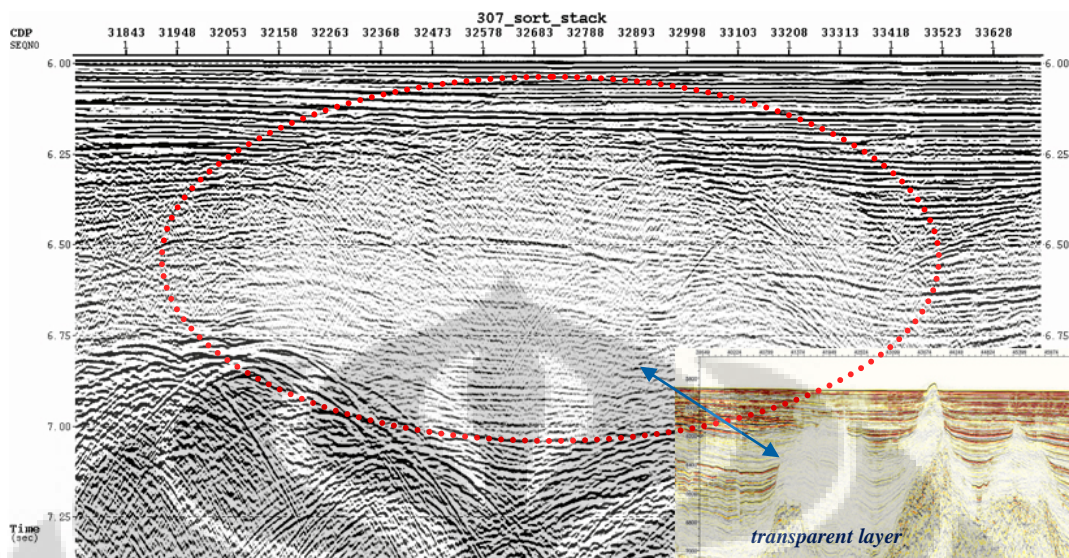
Berdasarkan interpretasi terhadap penampang seismik Lintasan BGR06-307 hasil pengolahan data, unit stratigrafi seismik yang dapat mewakili kondisi Cekungan Lombok tersusun atas *acoustic basement* sebagai dasarnya dengan lima unit stratigrafi yang menunjukkan proses sedimentasi utamanya. Struktur perlipatan dan patahan intensif terjadi pada pinggir cekungan dan umumnya memotong unit stratigrafi. Hasil interpretasi tersebut tertera dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Penampang seismik Lintasan BGR06-307.

Acoustic basement memiliki ciri refleksi yang transparan, terpotong oleh struktur patahan membentuk *horst* dan *graben*, lembah bawah laut, dan punggung bawah laut. Sikuen seismik yang merupakan stratigrafi dari perlapisan batuan sedimen tersusun atas lima unit. Unit I merupakan sedimen pengisi cekungan dengan bentuknya yang mengisi di atas tinggian *basement* maupun lembahnya, dengan ciri refleksi agak transparan tetapi even seismik sudah cukup jelas, kontinyu, pada bagian pinggir cekungan sebelah barat mengalami perlipatan dan pensesaran yang intensif. Unit II diendapkan membentuk perlapisan sejajar, dicirikan oleh even seismik yang kuat, pada pinggir barat cekungan juga terlipat dan terpatahkan kuat. Unit III diendapkan membentuk perlapisan sejajar, pada bagian tengah menipis, even seismik cukup jelas dan kontinyu. Unit IV dicirikan dengan refleksi amplitudo yang jelas dan terdiri dari perlapisan sejajar. Unit V dicirikan oleh even seismik yang sangat jelas dan perlapisannya melingkupi ke seluruh cekungan dengan bentuk perlapisan sejajar. Struktur perlipatan dan patahan intensif terjadi di bagian pinggir sebelah barat cekungan dan memotong *basement* serta perlapisan sedimen.

Kenampakan seismik yang berbeda terlihat oleh hadirnya *transparent layer* berbentuk *mound* yang kemungkinan merupakan bongkah *olistostromes* karbonat yang menimbun tidak selaras tinggian *basement*. Juga terdapat beberapa even seismik yang tidak menerus dan geometrinya memotong stratigrafi. kemungkinan merupakan endapan *slump* hasil *gravity settling* proses turbidit. Menurut hasil *onboard processing*, *transparent layer* diinterpretasikan sebagai *platform reef*. Fenomena ini tidak seperti umumnya bahwa kenampakan *reef* atau *carbonate buildup* menunjukkan amplitudo yang kuat pada penampang seismik dengan bentuk yang khas. Berdasarkan hasil pengolahan data seismik, terlihat masih adanya kontinuitas atau penerusan dari horison-horison di dalam *transparent layer* tersebut secara lateral (Gambar 4.5).



Gambar 4.5. Hasil pengolahan data seismik yang menunjukkan masih adanya kontinuitas atau penerusan dari horison-horison di dalam *transparent layer* tersebut secara lateral

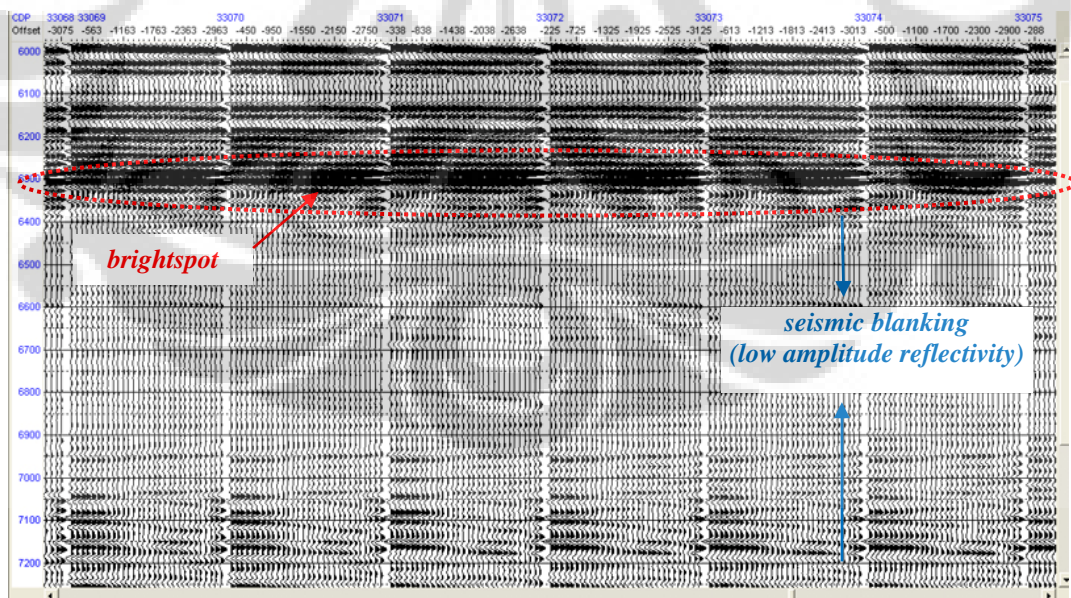
Menurut Van der Werff et al. (1994), Cekungan Lombok tersusun atas *basement* dengan fasies seismik yang *chaotic*, yang terpotong oleh patahan normal hingga hampir vertikal dengan kemiringan berarah utara dan selatan, membentuk struktur *rift*, *horst* dan *graben*. Di atas *basement* pada bagian tengah cekungan terdapat *buried reef* dengan karakter seismiknya yang bergelombang lemah. Perlapisan sedimen di lapisan bawah umumnya tersusun atas batuan-batuan hasil *reworked melange*, turbidit, *pelagic sediment*, sedangkan perlapisan atas terutama tersusun atas turbidit napal, lempung *pelagic*, dan turbidit vulkaniklastik. Umur pengendapan diinterpretasikan berturut-turut dari tua ke muda adalah *basement* berumur Mesozoikum dan perlapisan sedimen cekungan berumur Paleogen – Plio-Pleistosen. Menurut Van der Werff (1996), pembentukan tinggian busur jauh (*outer arc high*) secara paralel mengacu kepada suplai sedimen ke bagian selatan cekungan ini, sedangkan bagian utaranya menerima sedimen dari utara setelah pembentukan busur vulkanik selama masa Miosen Tengah.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Indikasi Hidrokarbon

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap CDP *gather* pada area target, yaitu pada interval CDP 32100 – CDP 33400 dengan kedalaman TWT 5800 – 7700 ms, ditunjukkan adanya bentuk anomali amplitudo lokal yang ditandai dengan munculnya amplitudo yang cukup kuat berupa *brightspot*, terutama terdapat di atas kenampakan dari *seismic blanking* atau *transparent layer*. *Seismic blanking* ditunjukkan dengan refleksi amplitudo internal yang rendah yang kontras dengan lapisan di atasnya yang menunjukkan kenampakan *brightspot* yang memiliki anomali yang menguat dengan bertambahnya jarak *offset* atau sudut datangnya (Gambar 5.1).



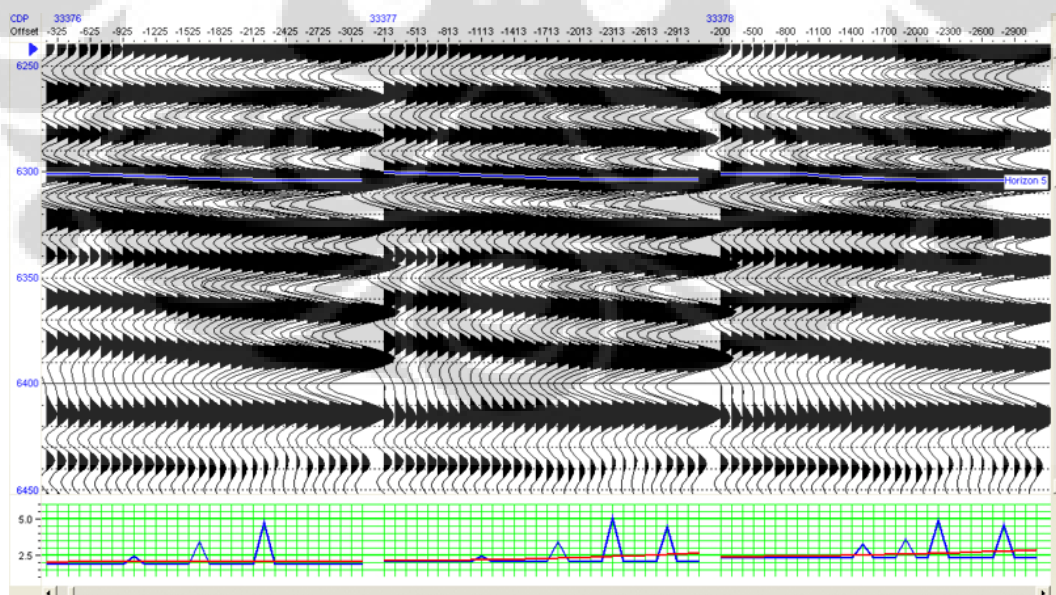
Gambar 5.1. *Seismic blanking* dengan refleksi amplitudo rendah yang kontras dengan lapisan di atasnya yang menunjukkan kenampakan *brightspot*.

Adanya *brightspot* dengan bentuk anomali amplitudo lokal yang kuat tersebut dapat menjadi indikator langsung terhadap kehadiran hidrokarbon dalam area target. Fenomena ini yang kemudian dilanjutkan dengan melakukan pengujian indikator hidrokarbon tersebut melalui analisis AVO.

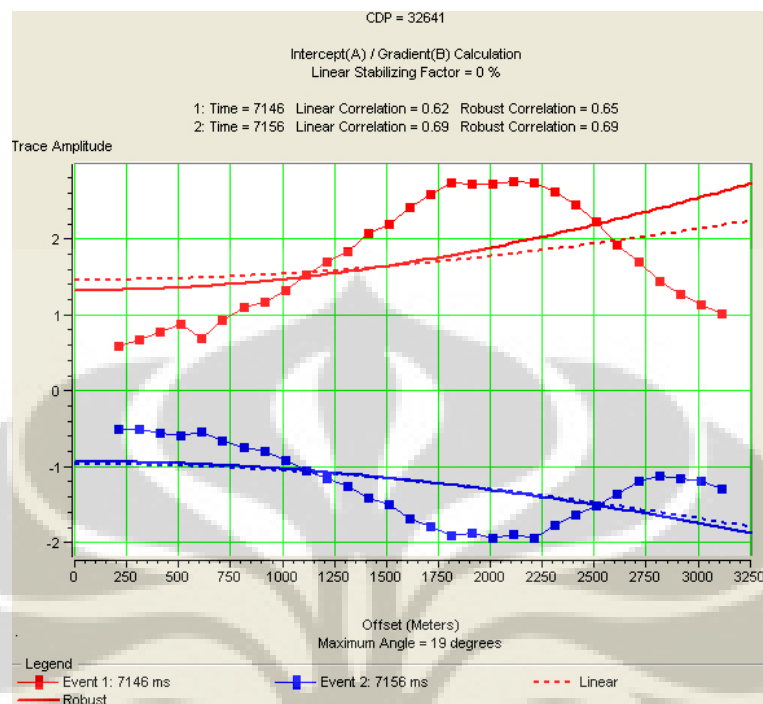
5.2. Analisis AVO

Analisis AVO dimulai dari tahapan pengolahan data CDP *gather* pada target area hingga penentuan horison sebagai lokasi anomali yang akan dilakukan *gradient analysis*, *gradient stack*, dan atribut AVO, serta pemodelan *gas sand*.

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap CDP *gather*, ditunjukkan adanya beberapa *brightspot* yang memiliki indikasi hidrokarbon, yaitu CDP 33068 – 33078 pada TWT 6280 – 6310 ms (Horizon 2), CDP 32639 – 32646 pada TWT 7120 – 7168 (Horizon 4), dan CDP 33340 – 33400 pada TWT 6150 – 6400 (Horizon 5) seperti terlihat pada Gambar 5.2. Dari hasil *gradient analysis*-nya, juga ditunjukkan respon amplitudo yang cenderung semakin membesar dengan bertambahnya *offset* (Gambar 5.3).



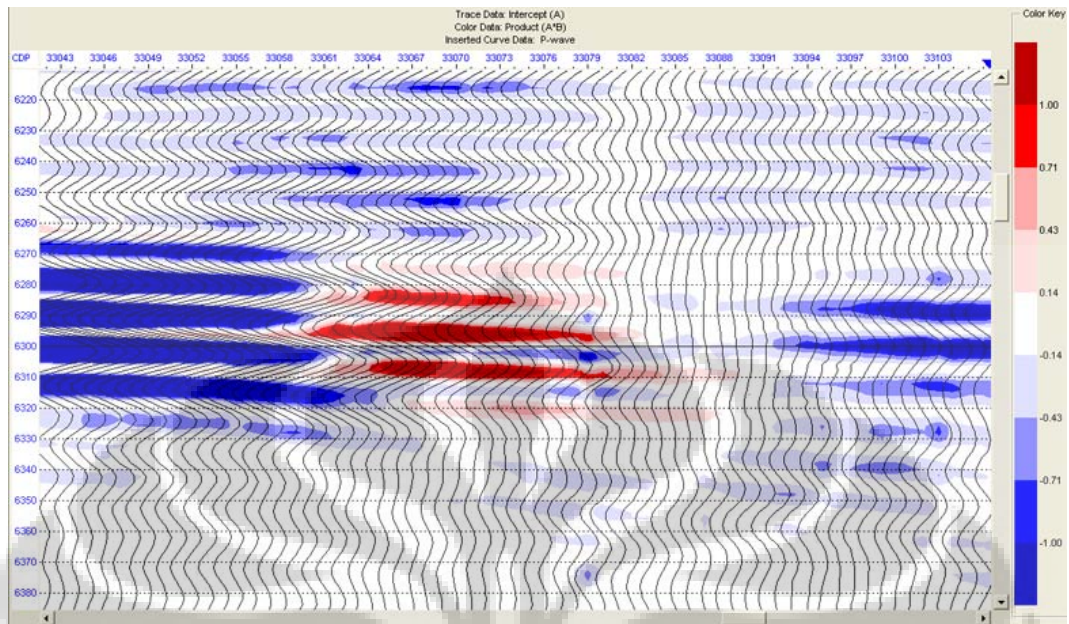
Gambar 5.2. Respon amplitudo yang semakin membesar dengan bertambahnya *offset* pada Horizon 5.



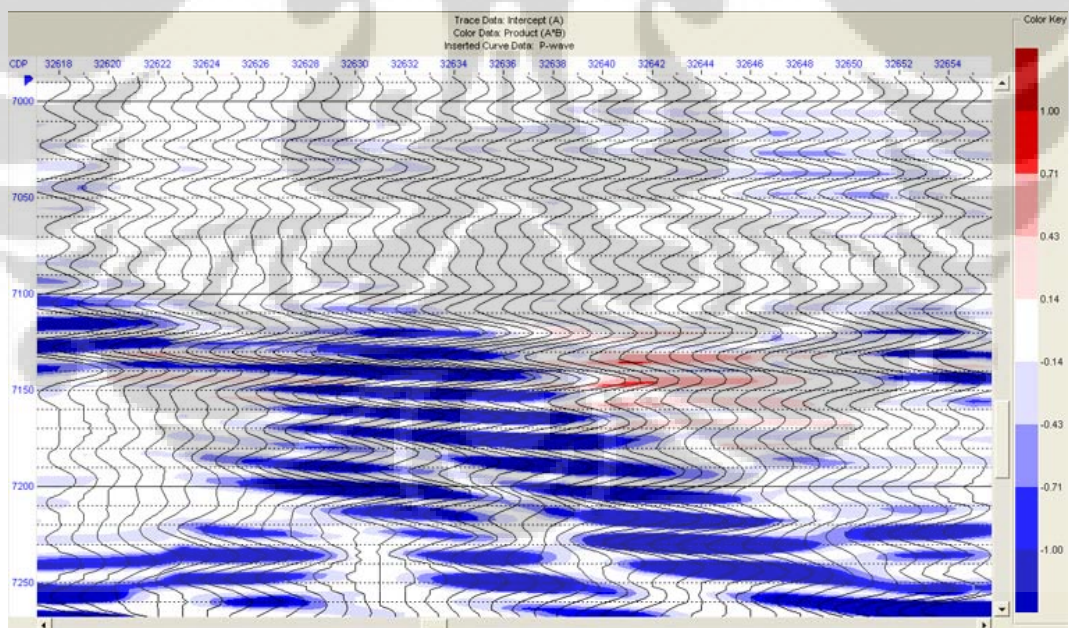
Gambar 5.3. Hasil *gradient analysis* yang menunjukkan respon amplitudo yang semakin membesar dengan bertambahnya *offset* pada Horizon 4.

5.2.1. Penampang *Gradient Stack (Product A*B)*

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan atribut AVO, ditunjukkan bahwa hasil perkalian antara *Intercept* (A) dengan *Gradient* (B) menghasilkan penampang *Gradient Stack* data *Product (A*B)* yang menunjukkan adanya kenampakan anomali AVO. Peningkatan amplitudo terhadap *offset* ditandai dengan warna merah yang menunjukkan respon AVO positif. Sedangkan warna biru, menunjukkan adanya respon penurunan amplitudo atau disebut memiliki respon AVO negatif. Anomali AVO yang terlihat cukup baik adalah terdapat pada TWT 6280 – 6310 ms dalam CDP 33068 – 33078 (Horizon 2) yang terletak di atas zona *transparent layer* (Gambar 5.4) dan pada Horizon 4 dalam CDP 32639 – 32646 pada TWT 7120 – 7168 (Gambar 5.5) yang terletak di bawah *transparent layer* dengan kenampakan *brighspot* pada CDP gathernya.



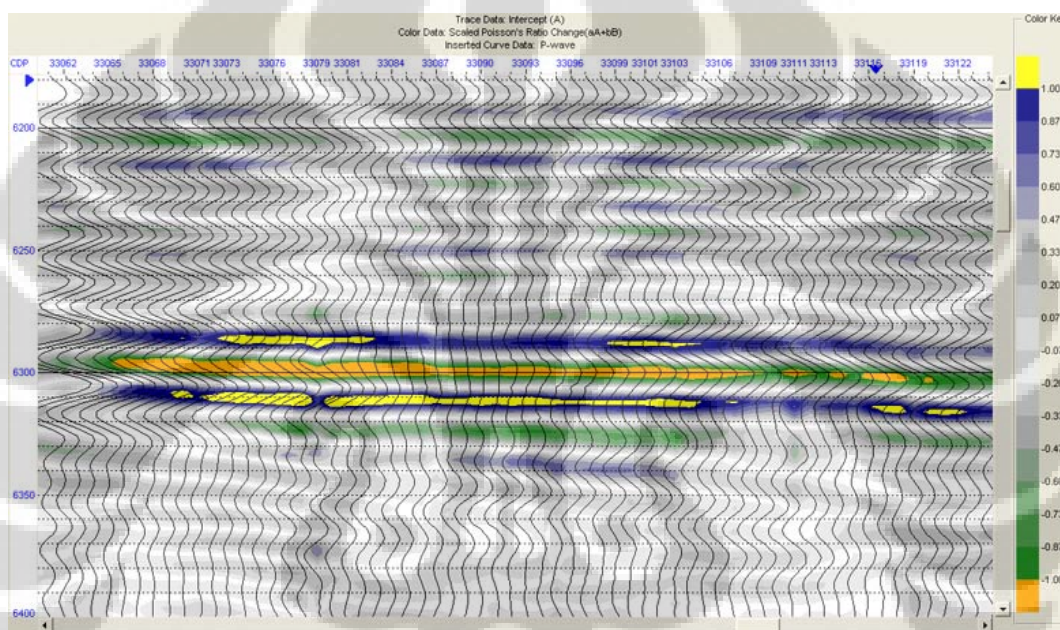
Gambar 5.4. Penampang *Product (A*B)* menunjukkan kenampakan anomali AVO yang ditandai dengan warna merah yang menunjukkan respon AVO positif pada Horizon 2.



Gambar 5.5. Respon AVO positif juga terdapat dalam TWT 7100 – 7200 ms pada CDP 32638 – 32646 Horizon 4 yang terletak di bawah *transparent layer*.

5.2.2. Penampang *Pseudo Poisson's Ratio* (A+B)

Penampang *Pseudo Poisson's Ratio Stack* (A+B) dilakukan dengan menggunakan data input *Intercept* dan *Gradient*, kemudian menjumlahkannya dengan menggunakan persamaan Shuey. *Pseudo Poisson's Ratio* yang tinggi ditunjukkan dengan warna kuning yang dapat menjadi indikator keberadaan gas (Gambar 5.6).



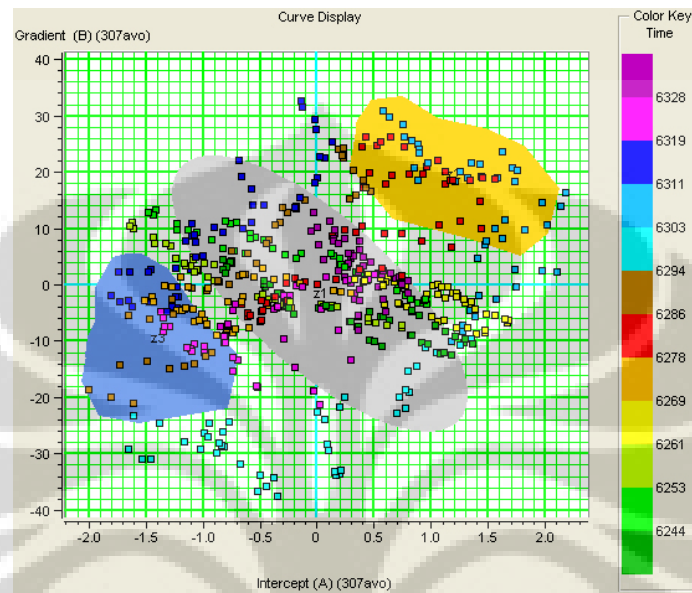
Gambar 5.6. *Pseudo Poisson's Ratio* yang tinggi ditunjukkan dengan warna kuning yang dapat menjadi indikator keberadaan gas pada Horizon 2.

5.2.3. *Crossplot Intercept* (A) dan *Gradient* (B)

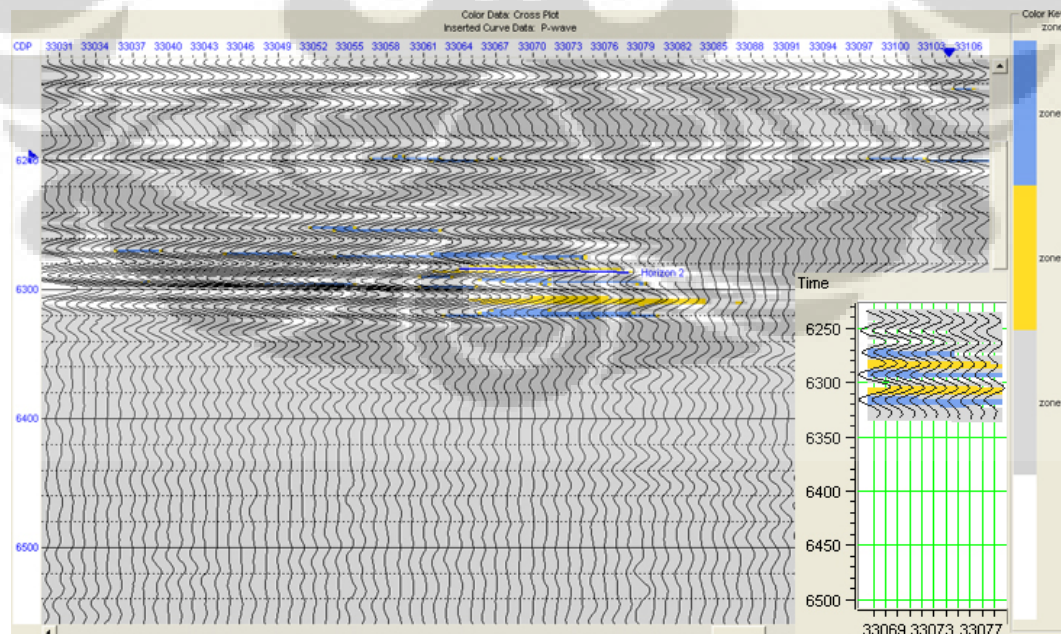
Crossplot antara atribut reflektivitas *normal incidence* (*Intercept*) pada sumbu-x dan *Gradient* pada sumbu-y digunakan untuk menentukan kelas *gas sand* berdasarkan zonasi yang dilakukan mengikuti klasifikasi Rutherford dan Williams (1989). Anomali AVO yang menunjukkan indikasi adanya *gas sand* adalah yang berada di luar area *trend* dari plot data tersebut.

Anomali amplitudo yang akan diplot ke dalam *crossplot* tersebut adalah di Horizon 2 pada TWT 6280 – 6310 ms dalam CDP 33068 – 33078. Hasilnya mengindikasikan adanya *gas sand* kelas III atau *Low Impedance Contrast Sand* seperti terlihat dalam Gambar 5.7. Hasil *crossplot* tersebut kemudian dituangkan

ke dalam penampang *stack* yang akan menunjukkan adanya anomali pada zona 2 (*base*) dan zona 3 (*top*) seperti tertera pada Gambar 5.8.



Gambar 5.7. *Crossplot* untuk melakukan zonasi penentuan kelas *gas sand* berdasarkan klasifikasi Rutherford dan William (1989).



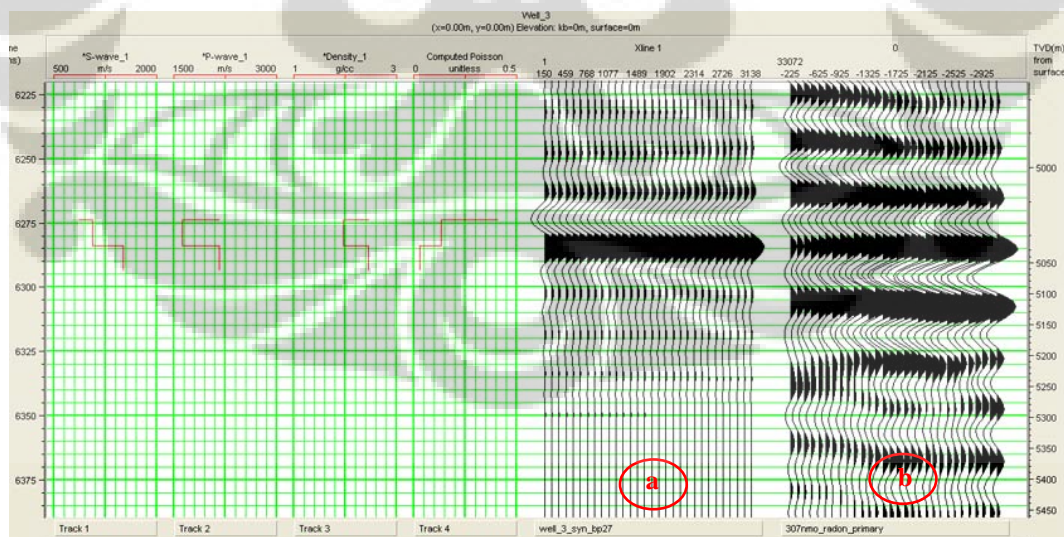
Gambar 5.8. Hasil *crossplot* yang dituangkan ke dalam penampang *stack*, menunjukkan adanya anomali pada zone 2 (*base*) dan zone 3 (*top*). Inset: Gambar penampang hasil *crossplot* yang lebih detail menunjukkan anomali tersebut.

5.3. Pemodelan *Gas Sand*

Penentuan model dan estimasi parameter fisis terhadap respon seismik digambarkan oleh sintetik seismogram terhadap *offset* atau sudut datang. Dengan menggunakan pendekatan Zoeppritz sebagai penghubung antara model geologi dengan data seismik, maka akan ditentukan bentuk model sintetiknya dengan nilai parameter fisik berupa kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas (ρ) dari suatu lapisan target, sehingga bentuk respon gelombang seismik yang melewati lapisan tersebut dapat diketahui.

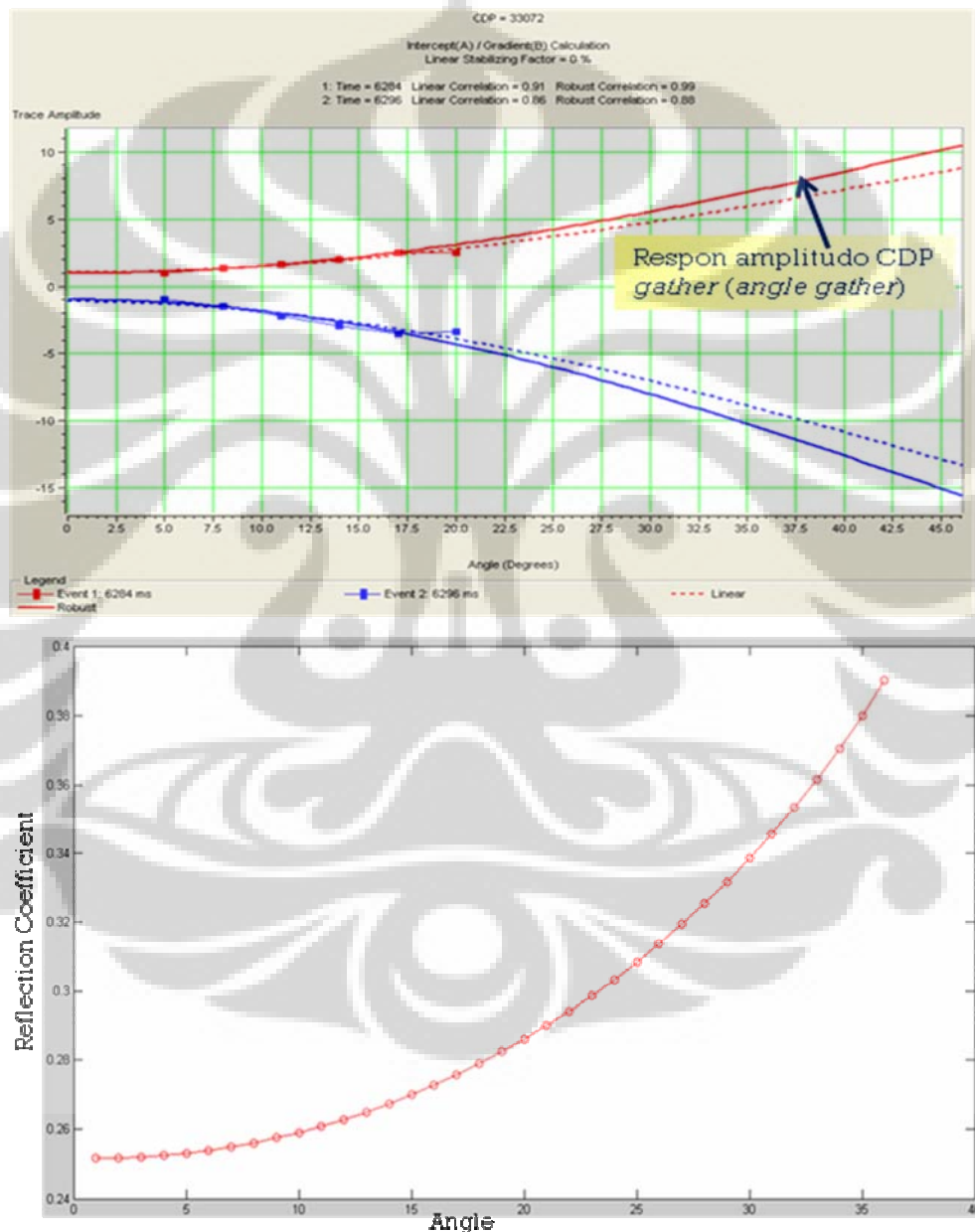
Pembuatan modelnya dilakukan berdasarkan konsep analisis AVO dengan membuat model *gas sand* yang berasosiasi pada anomali AVO. Cara yang dipergunakan adalah dengan memasukkan data V_p , V_s , dan densitas (ρ), sehingga dapat dilakukan pencocokan antara koefisien refleksi data model dengan data riil yang hasil *synthetic gather*-nya dapat dilihat dalam Gambar 5.9. Dalam hal ini, dipilih Horizon 2 sebagai lapisan target untuk dibuat model sintetiknya.

Berdasarkan pemodelan CDP *gather* sintetik, didapatkan nilai untuk $V_p = 1615$ m/s; $V_s = 1050$ m/s; $\rho = 1.95$ g/cc; dan Rasio Poisson (σ) = 0,134.



Gambar 5.9. Model respon seismik hasil pemodelan (a) dibandingkan dengan data riil (b).

Respon grafik *Amplitudo Versus Offset* dari pemodelan seismik jika dibandingkan dengan data riil memiliki arah trend yang mirip seperti terlihat dalam Gambar 5.10, sehingga diasumsikan bahwa dari data model yang dibuat dapat digunakan sebagai parameter data untuk lokasi penelitian.



Gambar 5.10. Perbandingan *gradient analysis* CDP gather (*angle gather*) dan kurva koefisien refleksi model dengan menggunakan persamaan Zoeppritz di horison 2.

BAB VI

KESIMPULAN

- 1) Lokasi penelitian yaitu Cekungan Busur Muka Lombok memiliki indikasi kehadiran hidrokarbon dalam lapisan batuan sedimennya.
- 2) Berdasarkan hasil pengolahan data seismik dan pengamatan terhadap CDP *gather* pada area target interval CDP 32100 – CDP 33400 dengan TWT 5800 – 7700 ms, terdapat kenampakan *brightspot* yang menjadi indikator langsung terhadap kehadiran hidrokarbon.
- 3) Berdasarkan hasil analisis AVO, indikasi hidrokarbon utama berada pada CDP 33068 – 33078 pada TWT 6280 – 6310 ms (Horizon 2) dan CDP 32639 – 32646 pada TWT 7120 – 7168 (Horizon 4) yang termasuk ke dalam *gas sand* kelas III atau *Low Impedance Contrast Sand* (Klasifikasi Rutherford dan Williams, 1989).
- 4) Berdasarkan pemodelan CDP *gather* sintetis, didapatkan nilai untuk $V_p = 1615$ m/s; $V_s = 1050$ m/s; $\rho = 1.95$ g/cc; dan Rasio Poisson (σ) = 0,134.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, A and P.G. Richard. 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W.H. Freeman & Co.
- Castagna, J.P. 1993. *Petrophysical Imaging using AVO*. The Leading Edge 12, 172-178p.
- Castagna, J.P., H.W. Swan., D.J. Foster. 1998. *Framework for AVO Gradient and Intercept Interpretation*. Geophysics 63, 948-956p.
- Canning, A. 2000. *Introduction to AVO Theory*. Paradigm Geophysical.
- Chiburis, E. S. Leaney., C. Skidmore., C. Frank. S. Mc Hugo. 1993. *Hydrocarbon Detection with AVO*. Oilfield Review.
- Gardner, G.H.F., L.W. Gardner., A.R. Gregory. 1974. *Formation Velocity and Density – The Diagnostic Basis for Stratigraphic Traps*. Geophysics 39, 770-780p.
- Hamilton, W. 1979. *Tectonics of the Indonesia Regions*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1078.
- Hampson, Russell. 1999. *AVO Theory*. Hampson-Russell Software Service Ltd.
- Hampson, Russell. 2007. *AVO Workshop*. Hampson-Russell Software Service Ltd.
- Koesoemadinata, R.P. 1980. *Geologi Minyak dan Gas Bumi*. Jilid I Edisi ke-2. Institut Teknologi Bandung.
- Muller, C., S. Neben. 2006. *Seismic and Geoacoustic Investigation Along The Banda Arc Transittion*. Research Cruise SO 190 Leg 1. Cruise Report and Preliminary Result. BGR & BPPT, unpublsh.
- Munadi, Suprajitno. 1993. *AVO dan Eksplorasi Gas*. Lembaran Publikasi LEMIGAS, No.1, hal 3-13.
- Munadi, Suprajitno. 2006. *Kajian Kecepatan Penjalaran Gelombang Seismik*. Lembaran publikasi LEMIGAS.
- Ostrander, W.J. 1984. *Plane Wave Reflection Coefficients for Gas Sands at Non Normal Angles of Incidence*. Geophysics 49, 1637-1648p.
- Rutherford, S and R. Williams. 1989. *Amplitude Versus Offset Variation in Gas Sands*. Geophysics 54, 680-688p.
- Shuey, R.T. 1985. *A Simplification of Zoeppritz Equations*. Geophysics 50, 609-614p.
- Taib, M.I.T. 2000. *Aplikasi Geofisika Terapan pada Geologi Kelautan*; Diskusi Panel Bersama Menteri Eksplorasi Laut dan Perikanan. Departemen Kelautan dan Perikanan & Institut Teknologi Bandung.

- Van Weering, Tj.C.E., D. Kusnida., S. Tjokrosapoetro., S. Lubis., P. Kridoharto., S. Munadi. 1989. *The Seismic Structure of The Lombok and Savu Forearc Basins, Indonesia*. Netherland Journal of Sea Research 24, 251-262p.
- Yilmaz, Osdogan. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysics.
- Van der Werf, W., D. Kusnida., H. Prasetyo., Tj. C. E. van Weering. 1994. *Origin of the Sumba Forearc Basement*. Marine and Petroleum Geology 11 No. 3, 363-374p.
- Van der Werf, W., H. Prasetyo., D. Kusnida., Tj. C. E. van Weering. 1994. *Seismic Stratigraphy and Cenozoic Evolution of The Lombok Forearc Basin, Eastern Sunda Arc*. Marine Geology 117, 119-134p.
- Van der Werff, W. 1996. *Variation in Forearc Basin Development along the Sunda Arc, Indonesia*. Journal of Southeast Asian Earth Sciences 14 No. 5, 331-349p.

