ANALISIS SENSITIVITAS APROKSIMASI *AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE* (AVA) TERHADAP RESERVOAR HIDROKARBON BATUPASIR TERSATURASI *IMPURITIES* PADA LAPANGAN "GEMURUH" CEKUNGAN SUMATERA SELATAN

(Skripsi)

Oleh

M. Daffa Hafizh Alfasa

1965051001

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2023

ANALISIS SENSITIVITAS APROKSIMASI *AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE* (AVA) TERHADAP RESERVOAR HIDROKARBON BATUPASIR TERSATURASI *IMPURITIES* PADA LAPANGAN "GEMURUH" CEKUNGAN SUMATERA SELATAN

Oleh

M. DAFFA HAFIZH ALFASA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2023

ABSTRAK

ANALISIS SENSITIVITAS APROKSIMASI *AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE* (AVA) TERHADAP RESERVOAR HIDROKARBON BATUPASIR TERSATURASI IMPURITIES PADA LAPANGAN "GEMURUH" CEKUNGAN SUMATERA SELATAN

Oleh

M. Daffa Hafizh Alfasa

Lapangan "GEMURUH" merupakan salah satu lapangan hidrokarbon yang terletak pada Sub-Cekungan Jambi, Cekungan Sumatera Selatan. Reservoar pada lapangan ini sebagian besar merupakan reservoar gas tersaturasi *impurities* karbondioksida yang tersisipkan pada Formasi *Lower* Talangakar dengan lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*, *fluvial-meandering*, *fluvial-braided*. Kehadiran *impurities* dalam reservoar hidrokarbon dapat memiliki dampak signifikan terhadap produksi hidrokarbon. Oleh karena itu diperlukan pemetaan/karakterisasi terhadap *impurities* karbondioksida tersebut. Untuk melakukan pemetaan/*impurities* tersebut maka dilakukan pemodelan menggunakan metode seismik dengan pendekatan *Amplitude Variation with Angle*/*Offset* (AVO/AVA). Namun, hingga saat ini pemodelan kelas AVO/AVA hanya berfokus pada reservoar *sand gas* tanpa saturasi *impurities* karbondioksida. Oleh karena itu, melalui penelitian ini dilakukan pengamatan sensitivitas 12 aproksimasi AVO/AVA terhadap *impurities* karbondioksida pada reservoar untuk mendapatkan satu aproksimasi yang paling sensitif dan bisa menjadi dasar dalam pemodelan kelas AVO/AVA terbaru. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa sifat sensitivitas aproksimasi AVO/AVA berbeda pada setiap lingkungan pengendapan, namun memiliki pola koefisien refleksi yang relatif sama pada setiap sudut datang gelombang seismik. Pada lingkungan *coastal-deltaic*, Aproksimasi Aki dan Richard adalah aproksimasi yang paling sensitif terhadap *impurities* karbondioksida, sedangkan pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* adalah Aproksimasi Goodway Pertama, keduanya akan sangat sensitif pada sudut datang gelombang seismik 35^0. Kemudian, Pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*, dengan didasarkan oleh Aproksimasi Aki dan Richard maka dibentuk kelas AVO/AVA reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida sedangkan untuk lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* pembentukan kelas AVO/AVA didasarkan pada Aproksimasi Goodway Pertama.

Kata Kunci: Reservoar Hidrokarbon, *Impurities* Karbondioksida, *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA).

ABSTRACT

SENSITIVITY ANALYSIS OF AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE (AVA) APPROXIMATIONS TO SANDSTONE HYDROCARBON RESERVOIRS SATURATED WITH IMPURITIES IN THE "GEMURUH" FIELD SOUTH SUMATRA BASIN

By

M. Daffa Hafizh Alfasa

The "GEMURUH" field is one of the hydrocarbon fields located in the Jambi Sub-Basin, South Sumatra Basin. The reservoir in this field mostly comprises gas-saturated with carbon dioxide impurities embedded in the Lower Talangakar Formation, deposited in coastal-deltaic, fluvial-meandering, and fluvial-braided environments. The presence of impurities in hydrocarbon reservoirs can have a significant impact on hydrocarbon production. Therefore, mapping and characterization of these carbon dioxide impurities are necessary. To conduct the mapping/characterization of these impurities, modeling is performed using the seismic method with the Amplitude Variation with Angle/Offset (AVO/AVA) approach. However, until now, AVO/AVA modeling classes have focused solely on gas-saturated sand reservoirs without carbon dioxide impurity saturation. Therefore, this research aims to observe the sensitivity of 12 AVO/AVA approximations to carbon dioxide impurities in the reservoir to identify the most sensitive approximation, serving as the basis for the latest AVO/AVA modeling class. Based on the research conducted, it is found that the sensitivity characteristics of AVO/AVA approximations differ in each depositional environment but exhibit relatively similar reflection coefficient patterns at each seismic wave arrival angle. In the coastal-deltaic environment, the Aki and Richard approximations are the most sensitive to carbon dioxide impurities, while in the fluvial-meandering depositional environment, the Goodway First Approximation is highly sensitive, especially at a seismic wave arrival angle of 35^0. Subsequently, based on the Aki and Richard approximations in the coastal-deltaic depositional environment, an AVO/AVA class for hydrocarbon reservoirs saturated with carbon dioxide impurities is formed. Meanwhile, for the fluvial-meandering depositional environment, the formation of the AVO/AVA class is based on the Goodway First Approximation.

Keywords: Hydrocarbon Reservoir, Carbon dioxide Impurities, Amplitude Variation with Offset/Angle (AVO/AVA).

Judul Skripsi	:	**ANALISIS SENSITIVITAS APROKSIMASI *AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE* (AVA) TERHADAP RESERVOAR HIDROKARBON BATUPASIR TERSATURASI *IMPURITIES* PADA LAPANGAN "GEMURUH" CEKUNGAN SUMATERA SELATAN**
Nama Mahasiswa	:	M. Daffa Hafizh Alfasa
Nomor Pokok Mahasiswa	:	1965051001
Program Studi	:	Teknik Geofisika
Fakultas	:	Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.	**Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.**
NIP. 19700120 200003 1001	NIP. 19661222 199603 1001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 19691230 199802 1001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.**

Sekretaris : **Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.**

Anggota : **Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 19750928 200112 1002

Tanggal Ujian Skripsi : **8 Desember 2023**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis dalam skripsi ini dengan judul "Analisis Sensitivitas Aproksimasi *Amplitude Variation with Angle* (AVA) Terhadap Reservoar Hidrokarbon Batupasir Tersaturasi *Impurities* Pada Lapangan "GEMURUH" Cekungan Sumatera Selatan" adalah murni dibuat oleh saya sendiri berdasarkan pemikiran saya, bukan merupakan karya yang pernah dilakukan orang lain kecuali kutipan tertentu yang tertulis dalam skripsi ini sebagaimana telah disebutkan menurut sumbernya dalam daftar pustaka secara jelas sesuai kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

M. Daffa Hafizh Alfasa
NPM. 1965051001

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Liwa Lampung Barat pada 30 Juli 2001, sebagai anak pertama dari tiga bersaudara dan merupakan putra dari Bapak Nurhalimi dan Ibu Dewi Nopitasari. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 3 Liwa hingga tahun 2013, kemudian penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Liwa Kabupaten Lampung Barat hingga tahun 2019. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi negeri di Universitas Lampung di Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur Prestasi Khusus (PK) pada tahun 2019.

Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi kemahasiswaan. Pada tahun 2021-2022 menjadi anggota bidang Sosial Budaya Masyarakat pada Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana), selanjutnya pada tahun tersebut juga aktif menjabat sebagai *vice president* pada *Society Exploration of Geophysicist Student Chapter University of Lampung* (SEG SC Unila). Selain itu, penulis juga aktif mengikuti kegiatan di luar kampus seperti mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) dari Kemendikbudristek. Pada pertengahan tahun 2022 penulis melakukan Kerja Praktik di PT Aneka Tambang Tbk yang berlokasi di Jakarta yang kemudian dilanjutkan melakukan Magang Perusahaan di PT Elnusa Tbk, PT Pertamina Hulu Energi, PT Medco Energi Internasional Tbk, dan pada akhir tahun 2023 penulis melaksanakan Tugas Akhir di PetroChina International yang merupakan salah satu perusahaan minyak dan gas bumi terbesar di dunia yang berasal dari China. Kemudian, penulis berhasil menyelesaikan penelitian untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada 8 Desember 2023.

PERSEMBAHAN

Puji syukur saya panjatkan pada Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk:

AYAH DAN IBU TERCINTA

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, doa, dukungan, motivasi, semangat dan segala dukungan lainnya yang tidak terhingga

ADIK-ADIK TERCINTA

Terimakasih atas segala doa, semangat dan dukungannya.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Semua pihak yang terlibat dalam proses pembuatan dan penyusunan skripsi ini. saya ucapkan terimakasih banyak.

MOTTO HIDUP

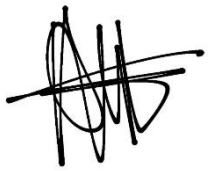
“Jadilah mata air yang jernih yang memberikan kehidupan kepada sekitarmu”
-B.J. Habibie

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusunan skripsi dengan judul **ANALISIS SENSITIVITAS APROKSIMASI *AMPLITUDE VARIATION WITH ANGLE* (AVA) TERHADAP RESERVOAR HIDROKARBON BATUPASIR TERSATURASI *IMPURITIES* PADA LAPANGAN "GEMURUH" CEKUNGAN SUMATERA SELATAN** dapat terselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada berbagai pihak yang sudah terlibat dan membantu penulis dalam penggarapan skripsi ini hingga akhirnya rampung. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam skripsi ini sehingga penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun sebagai evaluasi kedepannya demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga apa yang tertulis dalam skripsi ini dapat memberikan manfaat terlebih menambah wawasan dan pengetahuan bagi penulis dan juga khalayak umum.

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

Penulis



M Daffa Hafizh Alfasa

NPM. 1965051001

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan karunianya penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Jurusan Teknik Geofisika. Tak lupa shalawat seta salam penulis selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'alaihi wasallam* yang menjadi suri tauladan bagi kita semua.

Adapun dalam proses pelaksanaan hingga penyusunan Skripsi ini penulis sangat menyadari bahwa banyak sekali pihak yang terlibat, untuk itu dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terimakasih kepada:

1. **Allah SWT**, Tuhan Yang Maha Esa. Berkat segala rahmat, karunia dan anugerah-Nya baik berupa kesehatan dan kemudahan dalam setiap langkah serta jalan yang dilalui oleh penulis.
2. **Kedua orang tua yakni bapak dan ibu tercinta, Bapak Nurhalimi dan Ibu Dewi Nopitasari**. Yang tidak henti – hentinya memberikan kasih sayang, semangat, motivasi, do'a, saran, masukan, dan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung.
3. **Bapak Karyanto. S.Si., M.T**. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. **Bapak Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T**. selaku dosen Pembimbing 1 Skripsi di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan masukan, saran dan pengarahan selama proses pelaksanaan dan penyusunan Skripsi ini
5. **Bapak Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.** selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan pengarahan dengan penuh kesabaran dan kebaikan hati

dalam membimbing serta memberikan kritik, masukan dan motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.

6. **Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.** selaku penguji yang telah meluangkan waktunya dan senantiasa memberikan masukan, kritik dan saran.
7. **Bapak Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.** Selaku pembimbing akademik yang telah memberikan arahan dalam pengambilan keputusan selama proses pendidikan di Teknik Geofisika.
8. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan dan staf akademik Jurusan Teknik Geofisika.
9. **Bapak M Noor Alamsyah dan Mohammad Risyad** selaku mentor dan pembimbing dari Petrochina International Jabung Ltd yang selalu memberi arahan, *sharing* ilmu, dan tak pernah lelah menanyakan *progress* penelitian penulis. Terima Kasih atas ilmu yang Bapak berikan, semoga menjadi amal jariyah sebagai pemberat amal kebaikan di akhirat
10. Keluarga Besar Teknik Geofisika 2019 yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih banyak karena telah menjadi motivasi dan memberikan semangat serta doa selama pembuatan laporan ini berlangsung.
11. Semua pihak yang telibat selama pelaksanaan kegiatan Tugas Akhir ini dimana telah memberikan kesempatan, bantuan dan pengalaman yang sangat luar biasa, sekali lagi penulis ucapkan terimakasih banyak. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati terima kasih untuk semua ilmu yang diberikan.

Bandar Lampung, 12 Desember 2023

Penulis

M. Daffa Hafizh Alfasa

NPM. 1965051001

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

PERSETUJUAN ..... **iv**

PENGESAHAN ..... **v**

PERNYATAAN ..... **vi**

RIWAYAT HIDUP ..... **vii**

PERSEMBAHAN ..... **viii**

MOTTO HIDUP ..... **ix**

KATA PENGANTAR ..... **x**

SANWACANA ..... **xi**

DAFTAR ISI ..... **xiii**

DAFTAR GAMBAR ..... **xvi**

DAFTAR TABEL ..... **xx**

I. PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Tujuan Penelitian 2

1.3 Batasan Masalah 2

1.4 Manfaat Penelitian 3

II. TINJAUAN PUSTAKA **4**

2.1 Lokasi Penelitian 4

2.2 Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan 5

2.3 Formasi Talangakar 5

III. TEORI DASAR **9**

3.1 *Impurities* 9

3.2 *Well Logging* dan *Drill Stem Test* 11
3.3 Elektrofasies 12
3.4 Metode Seismik 13
3.5 Penjalaran Gelombang Seismik 14
3.5.1 Asas Fermat 14
3.5.2 Hukum Snellius 15
3.5.3 Prinsip Huygens 16
3.6 Tipe Gelombang Seismik 17
3.7 Elastisitas Batuan dan Hubungannya Dengan Gelombang Seismik .. 19
3.7.1 Elastisitas Batuan 19
3.7.2 Deformasi Batuan Akibat Gelombang P dan S 21
3.8 *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA) 22
3.8.1 Aproksimasi AVO/AVA Aki dan Richard 30
3.8.2 Aproksimasi AVO/AVA Shuey 31
3.8.3 Aproksimasi AVO/AVA Stolt dan Weglein 32
3.8.4 Aproksimasi AVO/AVA Smith dan Gidlow 33
3.8.5 Aproksimasi AVO/AVA Fatti 34
3.8.6 Aproksimasi AVO/AVA Verm dan Hilterman 34
3.8.7 Aproksimasi AVO/AVA Goodway Pertama 35
3.8.8 Aproksimasi AVO/AVA Gray Pertama 36
3.8.9 Aproksimasi AVO/AVA Gray Kedua 37
3.8.10 Aproksimasi AVO/AVA Goodway Kedua 38
3.8.11 Aproksimasi AVO/AVA Ursenbach dan Stewart 38
3.8.12 Aproksimasi AVO/AVA Mavko 39
IV. METODE PENELITIAN 41
4.1 Lokasi dan Waktu Penelitian 41
4.2 Perangkat Lunak 43
4.3 Data Penelitian 43
4.3.1 Data Sumur 39
4.3.2 Data *Drill Stem Test* 44
4.3.3 Data *Marker* 47
4.4 Prosedur Penelitian 48

4.4.1 Analisis Aproksimasi dan Pembuatan Kerangka Pemodelan 48
4.4.1.1 Analisis Aproksimasi 48
4.4.1.2 Pembuatan Kerangka Pemodelan 49
4.4.2 Inventarisasi dan Pengolahan Data 52
4.4.2.1 Inventarisasi Data 52
4.4.2.2 Pengolahan Data 58
4.4.3 Analisis Sensitivitas dan Pengelompokan Kelas AVO/AVA 64
4.4.3.1 Analisis Sensitivitas 64
4.4.3.2 Pengelompokan Model Kelas AVO/AVA 66
4.5 Diagram Alir Penelitian 67
V. HASIL DAN PEMBAHASAN 70
5.1 Analisis Perbedaan Aproksimasi 70
5.2 Analisis Model Secara Kualitatif 74
5.2.1 Lingkungan Pengendapan *Coastal-Deltaic* 78
5.2.2 Lingkungan Pengendapan *Fluvial Meandering* 87
5.2.3 Lingkungan Pengendapan *Fluvial-Braided* 91
5.3 Analisis Model Secara Kuantitatif 101
5.3.1 Lingkungan Pengendapan *Coastal-Deltaic* 101
5.3.2 Lingkungan Pengendapan *Fluvial Meandering* 102
5.4 Model Kelas AVO/AVA 103
VI. KESIMPULAN DAN SARAN 106
6.1 Kesimpulan 106
6.2 Saran 107
DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar **Halaman**

1. Cekungan Sumatera Selatan (Bishop, 2001).....4
2. Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan (Ginger dan Fielding, 2005).....5
3. Lingkungan pengendapan dan fasies Formasi Talangakar Bawah (Ginger dan Fielding, 2005).....6
4. Tipe lingkungan pengendapan yang diinterpretasikan pada Formasi Talangakar Bawah (Ginger dan Fielding, 2005).....7
5. Komponen kimia *natural gas* (CCEI, 2013).....9
6. Struktur kimia *crude oil* (Neamah, 2014).....10
7. Skema proses *well logging* (Ellis dan Singer, 2008).....11
8. Skema *drill stem test* (Hodzic *et al*, 2019).....12
9. Bentuk-bentuk dasar *log gamma ray* dalam penentuan fasies (Serra, 1989).....13
10. Seismik refleksi (Aschroft, 2011).....14
11. Asas Fermat (Rawlinson *et al*, 2003).....15
12. Penjalaran gelombang melalui batas dua medium menurut Hukum Snellius (Shearer *et al*, 2009).....16
13. Prinsip Huygens (Asparini, 2011).....17
14. Gelombang badan a). Gelombang primer, b). Gelombang sekunder (Cox *et al*, 2020).....18
15. Arah perambatan gelombang primer dan sekunder pada akuisisi seismik (Russell, 2009).....19
16. Hubungan modulus elastik (a). Young modulus, b). Bulk modulus, c). Shear modulus, d). Axial modulus (Reynolds, 1998).....21
17. Deformasi batuan akibat gelombang P dan gelombang S (Goodway, 2001) .22
18. Penjalaran gelombang seismik dari berbagai sudut (AAPG, 2015).....23

19. *Seismic trace* – konvolusi antara koefisien refleksi dan *wavelet source* (Kearey *et al*, 2002) 24
20. Klasifikasi anomali AVO/AVA pada *sand gas* (Rutherford dan William, 1989) 26
21. Respon AVO/AVA pada berbagai model lapisan batuan (Chicostepski dan Kasperska, 2014)..... 27
22. Respon anomali AVO/AVA berbagai model dengan satu aproksimasi (Sarkar dan Svatek, 1993)..... 27
23. Respon AVO/AVA berbagai aproksimasi dengan menggunakan satu model lapisan batuan (Fathalian dan Innanen, 2015) 28
24. Tampilan data *well logging* salah satu sumur penelitian di dalam *software* Hampson-Russell 43
25. Laporan data *drill stem test* (DST) pada setiap sumur..... 45
26. *Input* parameter aproksimasi pada kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based*..... 48
27. *Template* grafik *forward modelling* beserta hasil pemodelannya untuk kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based*..... 49
28. Validasi kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based* 50
29. Alur inventarisasi data kecepatan gelombang p, kecepatan gelombang s, dan densitas dari kombinasi (a) data *drill stem test* dan (b) data *well logging* 51
30. *Input* data kecepatan gelombang p, kecepatan gelombang s, dan densitas setiap reservoar ke masing-masing aproksimasi 58
31. Contoh perhitungan salah satu aproksimasi AVO/AVA pada beberapa reservoar..... 59
32. *Forward modelling* 12 aproksimasi AVO/AVA dengan data beberapa reservoar..... 60
33. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $0\text{-}70^0$..... 61
34. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $0\text{-}35^0$..... 61
35. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $35\text{-}70^0$... 62
36. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $0\text{-}70^0$ pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan 63

37. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan 63
38. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 35-70^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan...64
39. Analisis sensitivitas aproksimasi AVO/AVA secara kualitatif.....65
40. Diagram alir pembuatan kerangka pemodelan aproksimasi AVO.....67
41. Diagram alir inventarisasi dan pengolahan data AVO/AVA untuk menentukan aproksimasi yang sensitif terhadap CO_2 dan pemodelannya 68
42. Contoh hasil *forward modelling* Aproksimasi Goodway Pertama untuk sudut datang 0-70^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 75
43. Contoh hasil *forward modelling* Aproksimasi Goodway Pertama untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 76
44. Contoh hasil *forward modelling* Aproksimasi Goodway Pertama untuk sudut datang 35-70^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 77
45. Infografis model aproksimasi AVO/AVA untuk lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*.....79
46. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Aki dan Richard untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*.....80
47. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*.....81
48. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Stolt dan Weglein untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 82
49. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Smith dan Gidlow untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 85
50. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Ursenbach dan Stewart untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 86
51. Infografis model aproksimasi AVO/AVA untuk lingkungan pengendapan *fluvial-meandering*.....87
52. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Goodway Pertama untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* 89
53. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Gray Pertama untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* 90

54. Infografis model aproksimasi AVO/AVA untuk lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....92
55. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Aki dan Richard untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....94
56. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided* 95
57. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Stolt dan Weglein untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....96
58. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Smith dan Gidlow untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....97
59. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Ursenbach dan Stewart untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....98
60. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Goodway Pertama untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....99
61. Analisis *forward modelling* Aproksimasi Gray Pertama untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.....100
62. Kelas AVO/AVA reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 104
63. Kelas AVO/AVA reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* 105

DAFTAR TABEL

Tabel **Halaman**

1. Rangkuman variasi aproksimasi AVO/AVA dari berbagai literatur (Thomas *et al*, 2016) 25
2. Daftar lambang dan singkatan pada beberapa aproksimasi AVO/AVA..... 28
3. Jadwal kegiatan penelitian tugas akhir 42
4. Informasi kelengkapan data sumur 44
5. Informasi batasan lapisan pengendapan pada Formasi *Lower* Talangakar..... 46
6. Data *drill stem test* (DST) pada setiap sumur 52
7. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 54
8. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* 56
9. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided* 57
10. Nilai koefisien refleksi Aproksimasi A pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 66
11. Analisis perbedaan aproksimasi AVO/AVA 72
12. Rangkuman sensitivitas aproksimasi AVO/AVA terhadap *impurities* karbondioksida pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* 84
13. Rangkuman sensitivitas aproksimasi AVO/AVA terhadap *impurities* karbondioksida pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* 88
14. Perubahan pola dan besaran koefisien refleksi reservoar pada setiap aproksimasi dengan *angle of incidence* tertentu 93
15. Nilai koefisien refleksi Aproksimasi Aki dan Richard pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* untuk sudut datang $0\text{-}35^0$ 101

16. Nilai koefisien refleksi Goodway Pertama pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering* untuk sudut datang $0\text{-}35^0$.....102

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Lapangan “GEMURUH” merupakan salah satu lapangan hidrokarbon yang terletak pada Sub-Cekungan Jambi, Cekungan Sumatera Selatan. Sebagian besar lapangan ini merupakan reservoar gas yang *impurities* karbondioksida. *Impurities* dalam konteks reservoar hidrokarbon merujuk pada kontaminan atau senyawa-senyawa lain yang terkandung dalam cairan atau batuan hidrokarbon. Kehadiran *impurities* dalam reservoar hidrokarbon dapat memiliki dampak signifikan terhadap produksi dan penyimpanan, teknik produksi, serta pengolahan dan pemasaran hidrokarbon.

Menurut Santos *et al* (2021), dalam upaya melakukan pemetaan atau karakterisasi sebuah reservoar pada umumnya diperlukan tiga tahapan utama yaitu *geological study*, *exploratory wells*, dan *production tests*. Namun, Rutherford dan William (1989) melakukan sebuah penelitian menggunakan metode seismik yang didasarkan pada analisis *Amplitude Variation with Offset*/*Angle* (AVO/AVA) seismik untuk memodelkan sebuah reservoar gas. Analisis AVO/AVA yang dilakukan didasarkan pada hasil *forward modelling* menggunakan persamaan matematis aproksimasi AVO/AVA Shuey (1985) dengan data kecepatan gelombang primer, kecepatan gelombang sekunder, dan densitas pada lapangan Gulf Mexico. Hingga saat ini, pemodelan kelas AVO/AVA Rutherford dan William (1989) ini menjadi acuan bagi para *seismic interpreter* untuk mengetahui kandungan sebuah reservoar hanya menggunakan metode seismik. Namun, pemodelan kelas AVO/AVA hasil penelitian ini hanya fokus pada reservoar *sand gas* tanpa saturasi *impurities* karbondioksida.

Pada saat penelitian ini dibuat, belum ditemukan penelitian mengenai pemodelan kelas AVO/AVA untuk reservoar hidrokarbon batupasir yang tersaturasi *impurities*. Oleh karena itu, melalui penelitian ini dilakukan pemodelan kelas AVO/AVA terbaru yang dapat menjadi acuan dalam pemodelan reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida khususnya pada lapangan "GEMURUH".

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan *forward modelling* 12 aproksimasi AVO/AVA reservoar hidrokarbon batupasir tersaturasi *impurities* karbondioksida untuk dilakukan proses analisis sensitivitas secara kualitatif berdasarkan pola amplitudo pada setiap sudut datang gelombang seismik dan secara kuantitatif berdasarkan perbandingan besaran koefisien refleksi antar reservoar pada satu pemodelan aproksimasi.
2. Menentukan aproksimasi AVO/AVA yang paling sensitif terhadap *impurities* karbondioksida pada 3 lingkungan pengendapan.
3. Menentukan kelas AVO/AVA berdasarkan pengelompokan besaran saturasi *impurities* karbondioksida menggunakan hasil *forward modelling* aproksimasi yang paling sensitif.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada metode seismik dengan pendekatan AVO/AVA dan menggunakan data reservoar yang tersaturasi *impurities* karbondioksida.
2. Aproksimasi *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA) yang dilakukan analisis adalah 12 aproksimasi dengan persamaan matematis yang sudah baku terdiri dari aproksimasi AVO/AVA Aki dan Richard, Shuey, Stolt dan Weglein, Smith dan Gidlow, Fatti, Verm dan Hilterman, Goodway Pertama, Gray Pertama, Gray Kedua, Goodway Kedua, Ursernbach dan Stewart, dan Mavko.

3. Penelitian ini merupakan sebuah penelitian *forward modelling* sehingga data yang digunakan pada poin nomor dua merupakan *real wells data* yang telah dilakukan analisis *well logging* dan *drill stem test.* Oleh karena itu zona reservoar beserta kandungannya sudah diketahui.
4. Daerah penelitian merupakan zona reservoar *impurities* karbondioksida yang berada pada Lapangan "Gemuruh", Cekungan Sumatera Selatan pada Formasi *Lower* Talangakar dengan lingkungan pengendapan *Coastal-Deltaic, Fluvial-Meandering, Fluvial-Braided.*

1.4. Manfaat Penelitian

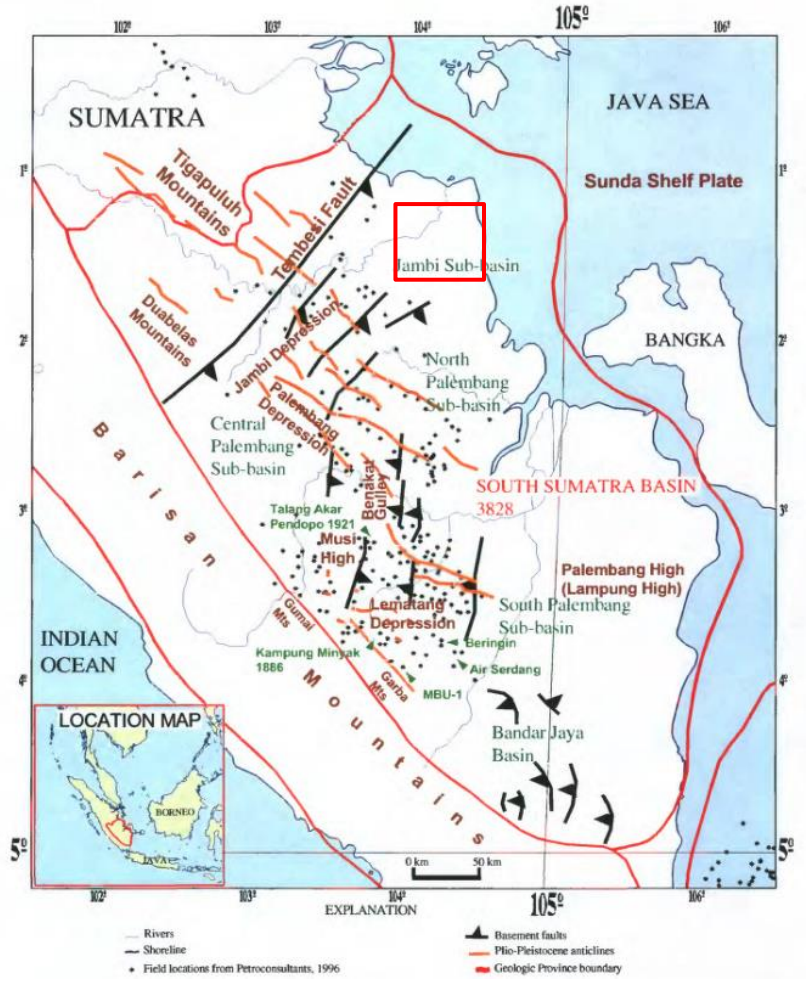
Adapun manfaat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk mengetahui bagaimana respon amplitudo seismik yang terbentuk saat gelombang seismik menjalar pada sudut datang tertentu pada reservoar hidrokarbon *impurities* karbondioksida.
2. Hasil pemodelan dan pengelompokan kelas AVO/AVA dari penelitian ini dapat digunakan untuk interpretasi reservoar hidrokarbon *impurities* karbondioksida selanjutnya.
3. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan pemilihan aproksimasi AVO/AVA yang efektif untuk proses analisis AVO/AVA lebih lanjut dan spesifik pada jenis reservoar tertentu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penelitian

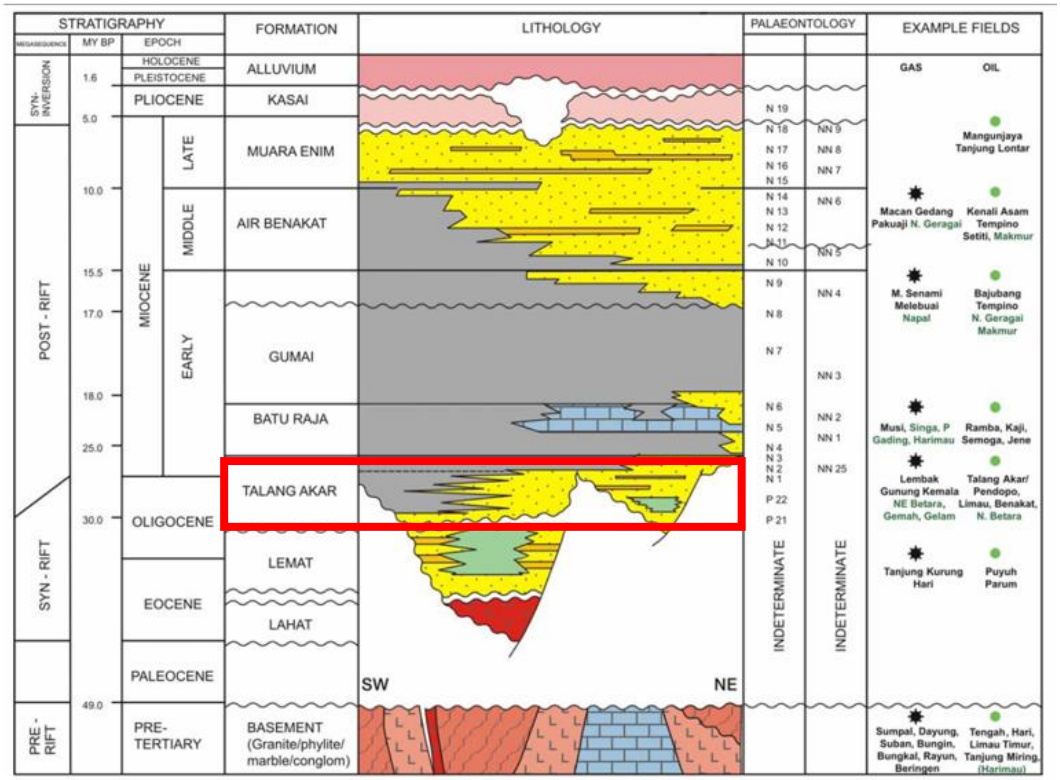
Lokasi penelitian berada di area lapangan "GEMURUH" yang terletak di Sub-Cekungan Jambi, bagian dari Cekungan Sumatera Selatan sebagaimana ditunjukkan dalam **Gambar 1.** Fokus utama penelitian ini adalah lapisan hidrokarbon yang terletak di Formasi *Lower* Talangakar yang berada kurang lebih pada kedalaman 5400 – 6400 ft di bawah permukaan bumi.



Gambar 1. Cekungan Sumatera Selatan (Bishop, 2001)

2.2. Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan

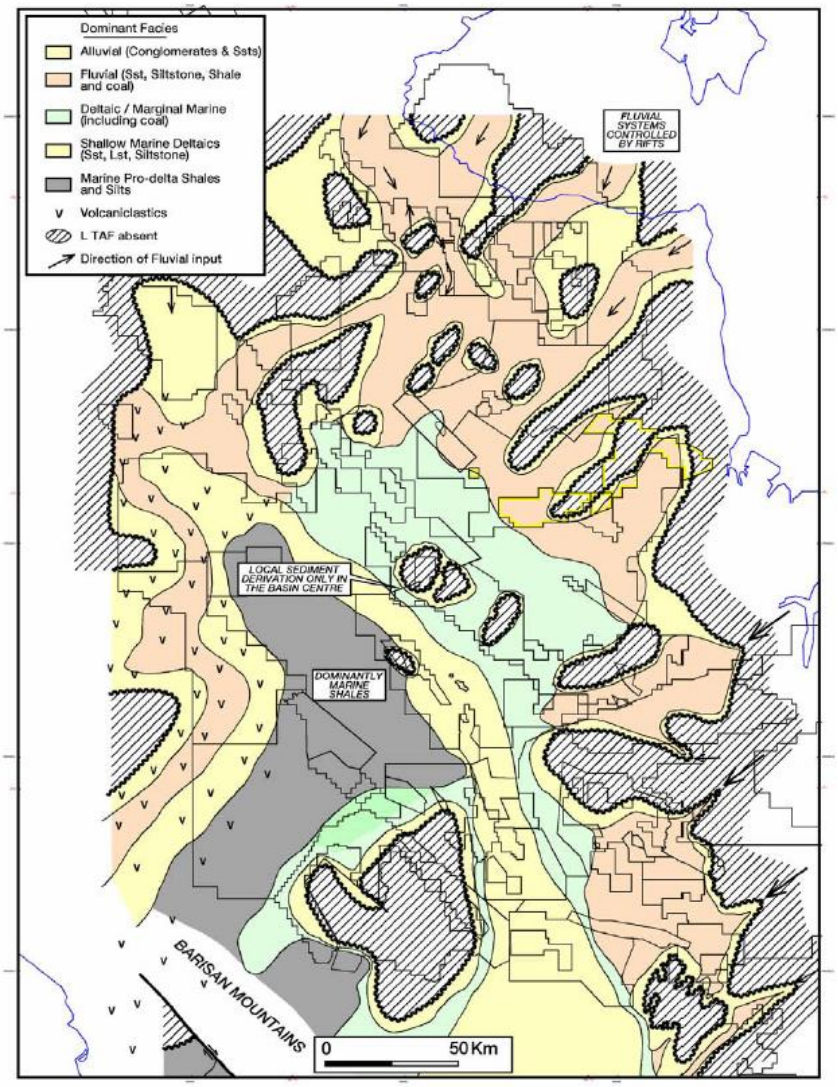
Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan terdiri dari beberapa formasi, dimulai dari formasi yang paling tua sebagai batuan dasar/*basement* hingga yang termuda yaitu Formasi Kasai yang ditunjukkan pada **Gambar 2.**



Gambar 2. Stratigrafi Cekungan Sumatera Selatan (Ginger dan Fielding, 2005)

2.3. Formasi Talangakar

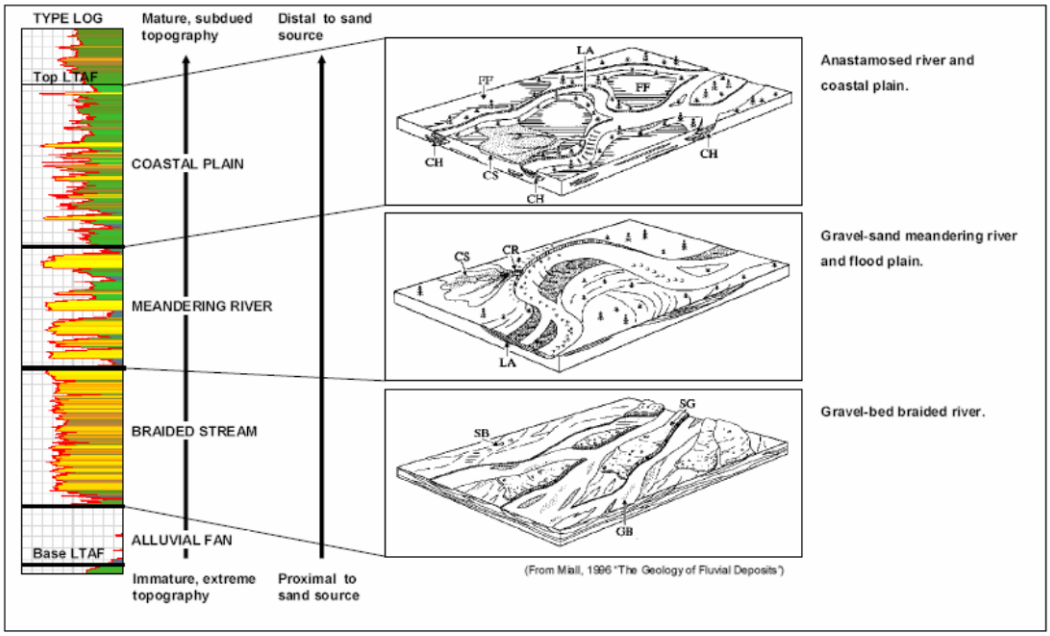
Formasi Talangakar diperkirakan berumur antara oligosen akhir dan miosen awal. Setelah diendapkan secara tidak selaras di bawah Formasi Lahat, formasi ini diendapkan selaras di atas Formasi Gumai, yang juga merupakan anggota Basal Telisa atau Formasi Baturaja. Litologi formasi ini biasanya terdiri dari batulanau, pasir, dan sisipan batugamping yang diendapkan di lingkungan laut dangkal hingga transisi. Studi menunjukkan bahwa formasi ini terendapkan pada kondisi *fluvial-deltaic*. Formasi Talangakar terdiri dari dua bagian, yaitu bagian atas dan bawah. bagian bawah Formasi yang terdiri dari batu pasir kasar, serpih, dan sisipan batubara yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. dan bagian atas formasi yang terdiri dari perselingan antara batupasir dan serpih.



Gambar 3. Lingkungan pengendapan dan fasies Formasi Talangakar Bawah (Ginger dan Fielding, 2005).

Tipe lingkungan pengendapan yang diinterpretasikan pada Formasi Talangakar adalah *coastal*, *meandering*, *braided* yang ditunjukkan pada **Gambar 4.** Reservoar *sandstone* dengan kualitas yang baik terkonsentrasi dalam saluran *alluvial fan* dan *meandering*. Terdapat hubungan spasial antara fasies sungai dengan waktu sejak dimulainya topografi *rift* dan jarak dari sumber sedimen. Kualitas reservoar yang buruk dalam endapan *alluvial proximal* dengan porositas sekitar 10-15% (tergantung pada kedalaman) dan permeabilitas dalam rentang 1-50 mD. Sebaliknya, kualitas reservoar baik dalam endapan yang terdeposit cukup jauh dari area sumber sedimen memiliki kematangan tekstur dan mineralogi sedang hingga

tinggi, tetapi masih dalam lingkungan energi tinggi. Di sini, porositas terkonsentrasi pada rentang 15-29%, dengan permeabilitas dari 100-3000 mD. Di sebelah barat cekungan, peningkatan kandungan vulkanik mengakibatkan penurunan porositas yang terbatas dan penurunan yang nyata dalam permeabilitas karena penyumbatan celah pori oleh *authigenic clay*. Oleh karena itu, *sandstone* berkualitas terbaik terletak di bagian timur, menjauh dari vulkanik busur pulau kontemporer, di mana laju aliran ≤ 3000 bopd tercatat (Ginger and Fielding, 2005).



Gambar 4. Tipe lingkungan pengendapan yang diinterpretasikan pada Formasi Talangakar Bawah (Ginger dan Fielding, 2005).

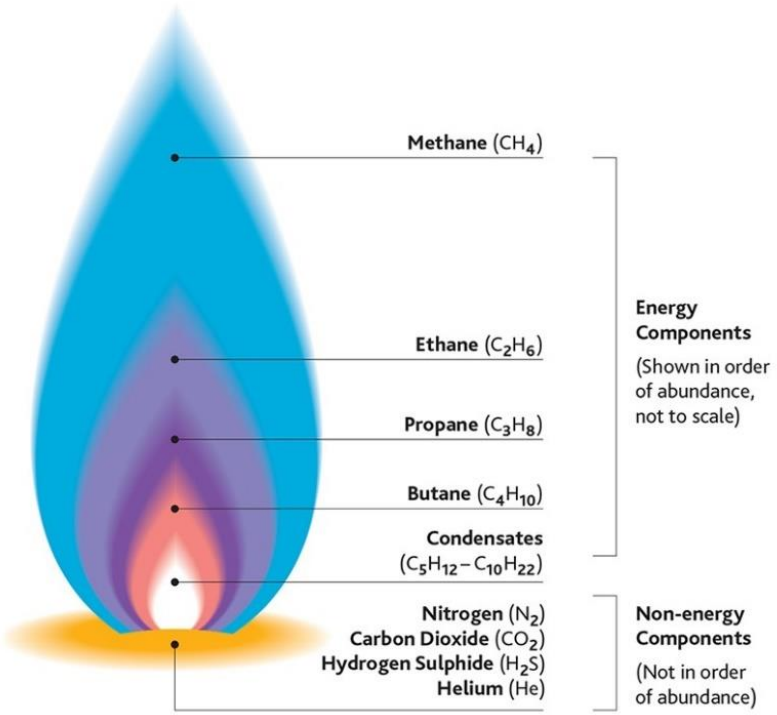
Kemudian, kandungan karbondioksida yang bervariasi dalam gas hidrokarbon telah ditemui di seluruh cekungan Sumatera Selatan. Kandungan karbondioksida yang moderat hingga rendah mendominasi dalam reservoar Formasi Talangakar, dan data δC13 menunjukkan bahwa batubara termal yang belum matang secara umur (75 - 120°C) adalah sumber utamanya. Pada kedalaman yang sedikit lebih dalam (>150°C), karbondioksida dihasilkan oleh metamorfisme karbonat pada suhu rendah, dan di tempat Formasi Baturaja tenggelam secara dalam, seperti di Lapangan Singa, ini mungkin menjelaskan kandungan karbondioksida yang lebih tinggi. Reaksi mineral metamorfik terus berlanjut ke kedalaman yang lebih dalam (350°C dan seterusnya) dengan karbonat, granit, dan lempung kapur menghasilkan

lebih banyak karbondioksida δC13 yang khas, ini merupakan sumber utama karbondioksida di Sumatera Selatan, terutama di atas cekungan yang dalam dimana karbonat ada di dalam batuan dasar pada masa *pre-tertiary basement* (misalnya di bawah Cekungan Pusat Jambi) (Ginger and Fielding, 2005).

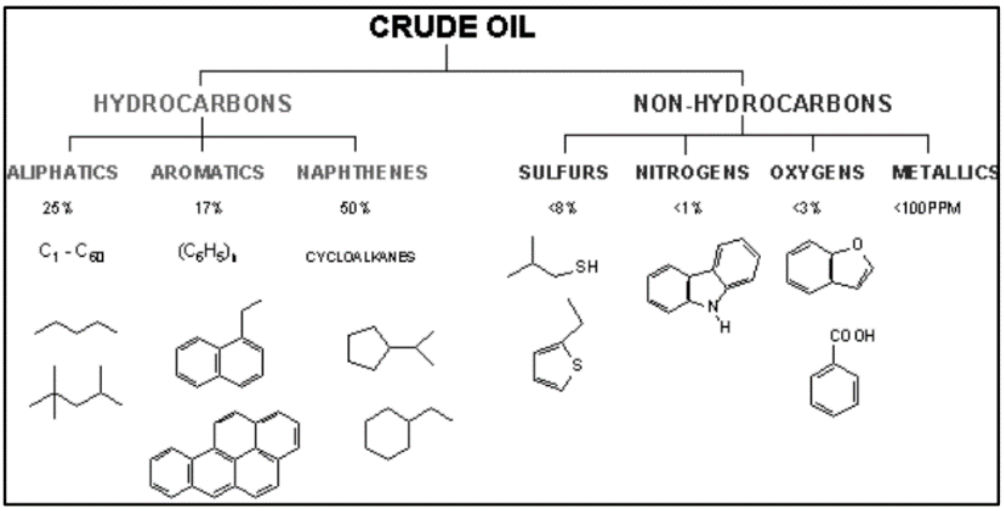
III. TEORI DASAR

3.1. *Impurities*

Impurities dalam hidrokarbon mengacu pada senyawa-senyawa non-hidrokarbon yang hadir bersama dengan hidrokarbon di dalam sebuah reservoar. Nitrogen, karbondioksida, hidrogen sulfida, dan air adalah beberapa *impurities* yang paling umum ditemukan dalam hidrokarbon (Choubineh *et al*, 2018). Keberadaan *impurities* ini dapat berdampak negatif pada sifat fisik, kimia, dan kinerja hidrokarbon, serta dapat menyebabkan masalah dalam proses pemurnian dan penggunaan hidrokarbon tersebut. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5.** Dan **Gambar 6.** Bahwa pada *natural gas* dan *crude oil* terdapat komponen non-energi atau non-hidrokarbon.



Gambar 5. Komponen kimia *natural gas* (CCEI, 2013)



Gambar 6. Struktur kimia *crude oil* (Neamah, 2014).

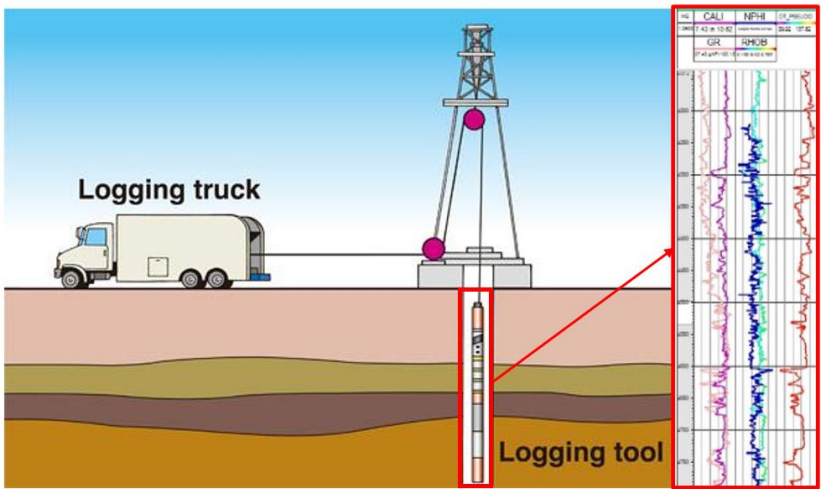
Karbondioksida (CO_2) dapat berada di reservoar hidrokarbon melalui beberapa mekanisme dan proses geologi yang terjadi selama jutaan tahun. Beberapa cara umum dimana karbondioksida dapat berada di reservoar meliputi proses geologi alam, aktivitas *geothermal*, proses tektonik, dan proses antropogenik.

Dalam kaitannya dengan reservoar hidrokarbon. karbondioksida dapat berinteraksi dengan batuan di dalam reservoar gas, seperti batuan karbonat dan *sandstone*, dan interaksi ini dapat memengaruhi sifat elastis batuan (Goldberg, 2014; Gluyas & Swarbrick, 2011). Reaksi kimia antara karbondioksida dan mineral-mineral batuan, seperti karbonatisasi, dapat terjadi, memengaruhi volume dan sifat elastisitas batuan (Tiab & Donaldson, 2015; Mavko *et al*, 2009). Karbondioksida juga dapat berinteraksi dengan mineral-mineral dalam batuan *sandstone*, seperti kuarsa. Reaksi dengan mineral-mineral tertentu dapat menyebabkan perubahan volumetrik pada mineral tersebut, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi sifat elastis batuan secara keseluruhan. Pengaruh karbondioksida terhadap sifat elastis batuan juga melibatkan perubahan porositas, permeabilitas, pertukaran ion, dan efek pembengkakan yang dapat dijelaskan dengan prinsip-prinsip termodinamika dan mekanika elastisitas (Dvorkin & Nur, 1996; Dewhurst & Nur, 2003; Sarout & Koutsoukos, 2013). Dalam konteks mekanika elastisitas, sifat elastis batuan dijelaskan oleh moduli elastisitas seperti *modulus young*, *modulus bulk*, dan *modulus shear*. *Modulus young* menggambarkan perubahan panjang batuan dalam

respons terhadap tegangan tarik, *modulus bulk* berkaitan dengan perubahan volume, dan *modulus shear* berkaitan dengan tegangan geser.

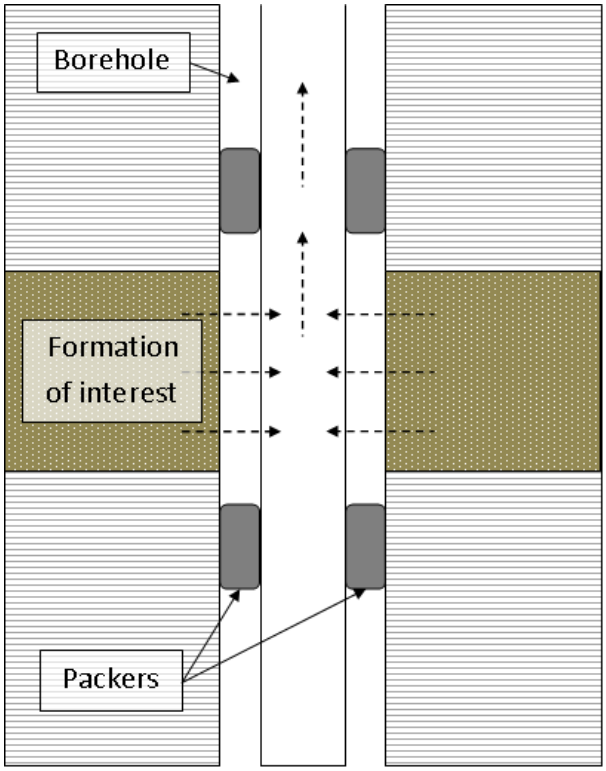
3.2. *Well Logging* dan *Drill Stem Test*

Well logging adalah metode yang mencatat beberapa parameter fisik formasi terhadap kedalaman. Parameter seperti resistansi listrik, radioaktivitas alami, atau kandungan hidrogen dapat diukur sehingga karakteristik produksi penting seperti porositas, saturasi air, *pay thickness*, dan litologi dapat ditentukan. Prinsip kerja metode ini dengan menggunakan *logging instrument* (yang disebut sondes) diturunkan ke dalam lubang bor pada kabel listrik berlapis (yang disebut *wireline*). Pembacaan diambil saat alat ditarik naik lubang. Informasi ditransmisikan ke atas melalui kabel di mana diproses oleh komputer *on-board* dan direkam pada pita magnetik dan film fotografi. Pada unit *logging* yang lebih lama, sinyal di lubang diterapkan oleh rangkaian analog sebelum direkam. *Well logging* dapat dibagi menjadi dua area: *open hole* dan *cased hole*. *Open hole* dilakukan setelah pengeboran, sebelum *casing* dipasang. Tujuan dari *open hole* adalah untuk mengevaluasi semua lapisan yang ditembus untuk keberadaan minyak dan gas. *Open hole* memberikan informasi yang lebih dapat diandalkan tentang karakteristik produksi dibandingkan dengan *cased hole*. *Cased hole* memberikan informasi tentang *cement job quality*, *casing corrosion*, karakteristik aliran fluida, dan kinerja reservoar (Lyons *et al*, 2010).



Gambar 7. Skema *well logging* (Ellis dan Singer, 2008).

Drill Stem Test (DST) adalah suatu bentuk penyelesaian sementara dari sumur yang dirancang untuk menentukan produktivitas dan sifat fluida sebelum penyelesaian sumur. Meskipun DST dapat dilakukan dalam *uncased hole* (*open hole*) atau *in cased hole* (*perforation tests*), namun *uncased hole* (*open hole*) lebih umum digunakan. Susunan alat yang terdiri dari *packer*, katup uji, dan katup penyeimbang diturunkan pada pipa bor ke posisi berlawanan dengan formasi yang akan diuji. *Packer* membesar ke lubang untuk memisahkan bagian annular yang diisi lumpur dari interval target, dan katup uji memungkinkan fluida formasi masuk ke dalam pipa bor selama pengujian. Katup penyeimbang memungkinkan penyeimbangan tekanan setelah pengujian sehingga packer dapat ditarik. DST dapat memberikan indikasi berharga tentang produktivitas komersial dari sebuah sumur (Lyons *et al*, 2010).

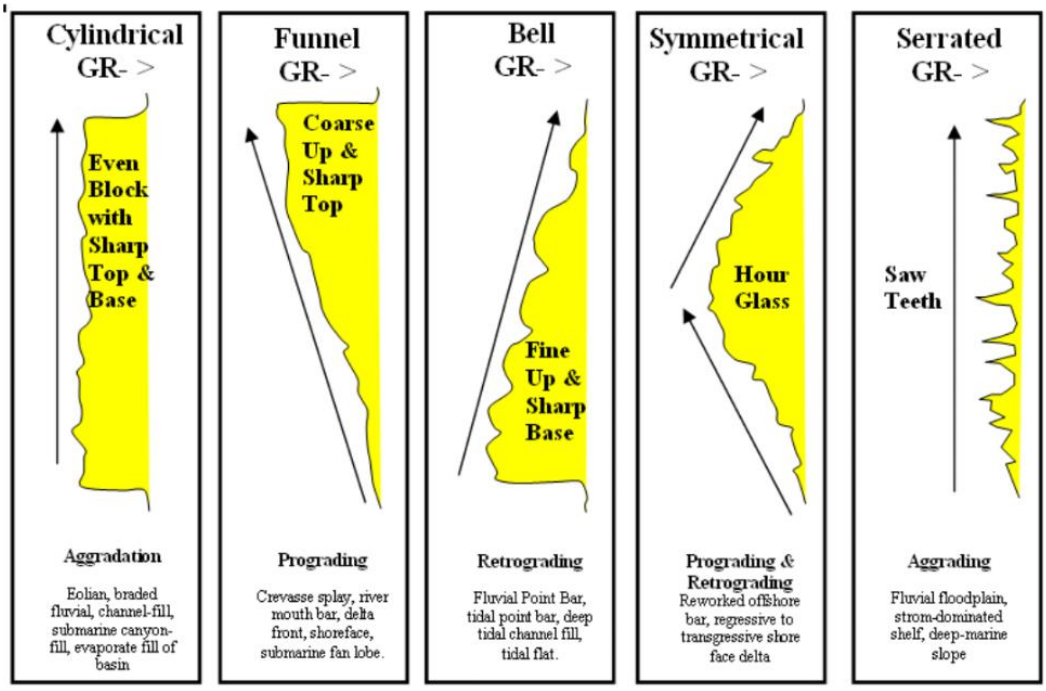


Gambar 8. Skema *drill stem test* (Hodzic *et al*, 2019).

3.3. Elektrofasies

Salah satu cara untuk menentukan lingkungan pengendapan adalah dengan menggunakan data log geofisika. Log adalah data informasi tentang batuan yang

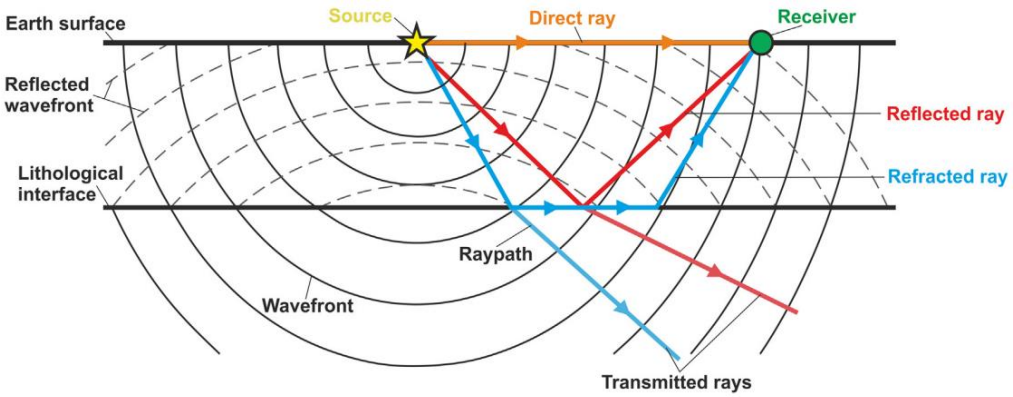
diakuisisi secara *insitu*, yang dapat digunakan sebagai acuan untuk identifikasi litologi dan korelasi geologi. Untuk menentukan jenis litologi dan korelasinya, biasanya digunakan kombinasi antara log SP, *gamma ray*, dan *resistivity*. Beberapa elemen dasar yang relevan atau bahkan atribut lingkungan pengendapannya dapat diidentifikasi dari data log. Menurut O. Serra (1989), bentuk log dasar termasuk *cylindrical*, *irregular*, *bell*, *funnel*, *symmetrical*, dan *asymmetrical*. Bentuk log di atas dapat dilihat pada **Gambar 9.**



Gambar 9. Bentuk-bentuk dasar *log gamma ray* dalam penentuan fasies (Serra, 1989).

3.4. Metode Seismik

Metode seismik didasarkan pada respon bumi terhadap gelombang seismik yang merambat dari suatu gelombang buatan di permukaan bumi. Sumber gelombang pada permukaan bumi melepaskan energi ke dalam bumi dalam bentuk energi akustik dan dirambatkan ke segala arah. Apabila dalam perambatannya gelombang mengenai bidang batas antara dua medium yang memiliki perbedaan kontras impedansi akustik, maka sebagian energi akan dipantulkan kembali ke permukaan dan sebagian ditransmisikan. (Shearer, 2009).



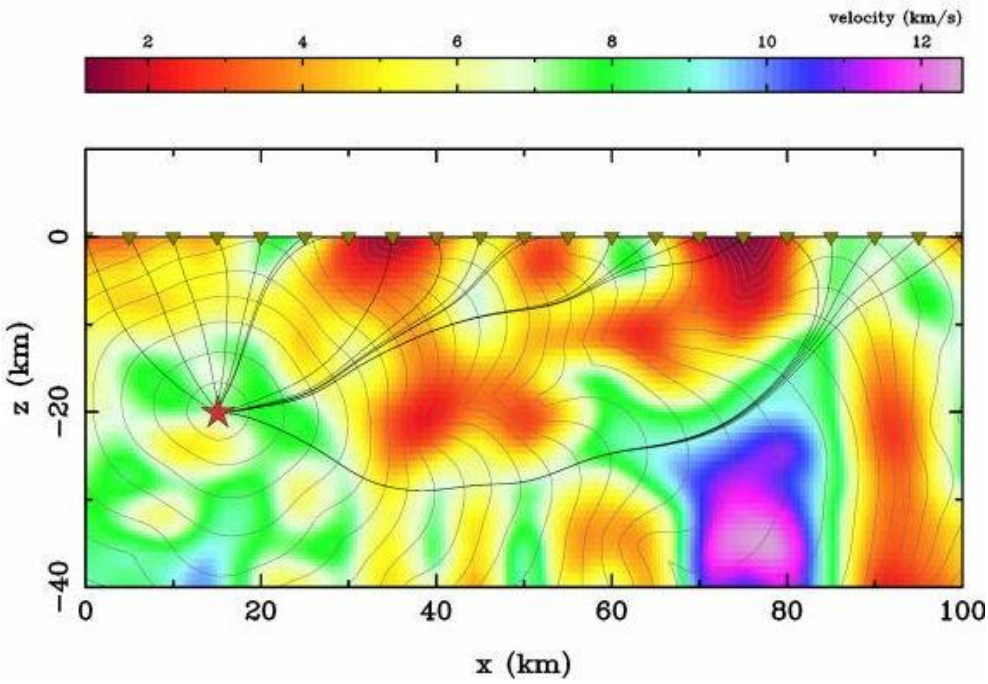
Gambar 10. Seismik refleksi (Aschroft, 2011).

Dalam eksplorasi seismik dikenal dua macam metode, yaitu metode seismik refleksi (*seismic reflection*) dan metode seismik refraksi (*seismik refraction*). Pada umumnya seismik refleksi digunakan untuk mendeteksi struktur bawah permukaan yang berada jauh di bawah permukaan. Dengan kata lain, gelombang ini memilik cakupan rekaman struktur bawah permukaan yang cukup jauh dengan menggunakan frekuensi rendah (*low frequents*). Metode seismik refleksi mengukur waktu yang diperlukan suatu impuls getar untuk melaju dari sumber getar, terpantul oleh batas-batas formasi geologi, dan kembali ke permukaan tanah pada suatu *receiver*. Refleksi dari suatu horizon geologi mirip dengan gema pada suatu muka tebing atau jurang. Metode ini banyak dimanfaatkan untuk keperluan eksplorasi perminyakan, penetuan sumber gempa, ataupun mendeteksi struktur lapisan tanah. Seismik refleksi hanya mengamati gelombang pantul yang datang dari batas-batas formasi geologi (Danusaputro, 2010).

3.5 Penjalaran Gelombang Seismik

3.5.1 Asas Fermat

Jika gelombang merambat di bawah permukaan tanah, maka gelombang akan memilih jejak yang tercepat menurut prinsip Fermat. Oleh karena itu, jika gelombang melewati sebuah medium yang memiliki variasi kecepatan gelombang seismik, maka gelombang tersebut cenderung melewati zona kecepatan tinggi dan menghindari zona kecepatan rendah, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 11** (Jamady, 2011).



Gambar 11. Asas Fermat (Rawlinson *et al*, 2003)

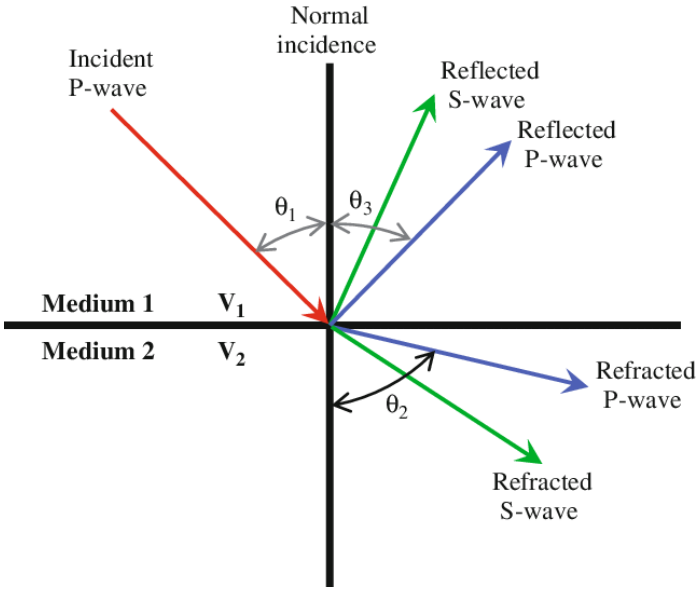
3.5.2 Hukum Snellius

Hukum ini menyatakan jika suatu berkas gelombang P datang mengenai permukaan bidang batas antara dua medium yang berbeda maka sebagian energi gelombang tersebut akan dipantulkan (*reflected*) dan ditransmisikan (*refracted*) sebagai gelombang P dan gelombang S (Sheriff dan Geldart, 1995). Ketika suatu gelombang datang dari medium dengan kecepatan yang lebih rendah ke medium dengan kecepatan yang lebih tinggi maka gelombang tersebut akan menjauhi garis normal dan jika gelombang datang dari medium dengan kecepatan lebih tinggi ke medium dengan kecepatan rendah maka gelombang tersebut akan mendekati garis normal.

Persamaan matematis hukum ini adalah sebagai berikut:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

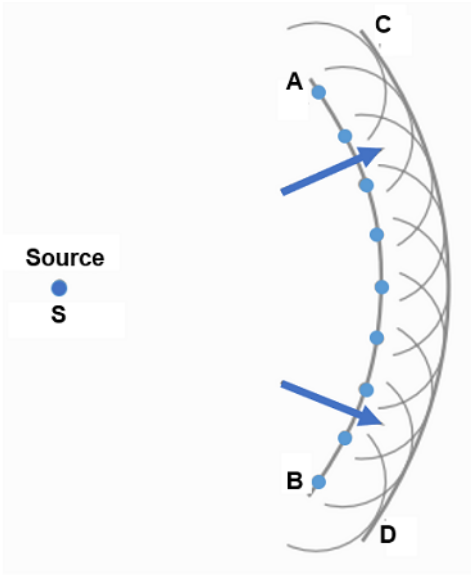
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (2)$$



Gambar 12. Penjalaran gelombang melalui batas dua medium menurut Hukum Snellius (Shearer *et al*, 2009).

3.5.3 Prinsip Huygens

Prinsip Huygens menjelaskan bahwa ketika gelombang melewati suatu celah atau titik maka pada setiap titik tersebut dapat menjadi suatu sumber gelombang yang baru. Mekanisme dari gelombang tersebut yakni sebuah pulsa seismik akan kehilangan energi seiring dengan bertambahnya kedalaman. Perumpamaan celah pada seismik yakni adanya patahan atau rekahan pada daerah bawah permukaan.



Gambar 13. Prinsip Huygens (Asparini, 2011).

3.6 Tipe Gelombang Seismik

Terdapat dua tipe gelombang seismik, yaitu gelombang badan (*body wave)* dan gelombang permukaan (*surface wave)*. Gelombang badan adalah gelombang yang merambat dalam badan medium, baik di dalam medium maupun di permukaan medium. Sedangkan, gelombang permukaan adalah gelombang yang menjalar pada permukaan bidang batas medium.

Pada penelitian ini, gelombang yang dibahas secara spesifik adalah gelombang badan (*body wave*). Terdapat 2 tipe gelombang badan yaitu gelombang P(primer/longitudinal) dan gelombang S (sekunder/transversal). Gelombang P merupakan gelombang yang merambat paling cepat dan merupakan yang pertama kali terekam di stasiun seismik. Gelombang ini menekan dan menarik partikel sehingga bergerak sejajar dengan arah gelombang P tersebut. Sedangkan gelombang S merupakan gelombang dimana gerakan partikel medium yang dilewatinya adalah tegak lurus dengan arah penjalaran gelombangnya. Gerak perambatan gelombang P dan S dapat dilihat pada **Gambar 14 dan Gambar 15.**

Menurut Veeken (2007) beberapa energi dari Gelombang P dikonversi menjadi energi Gelombang S pada titik refleksi (Gambar Hukum Snellius). Gelombang P dapat merambat pada benda padat, cair dan gas. Secara matematik, Gelombang P ditulis sebagai berikut (Priyono, 2006):

$$Vp = \sqrt{\frac{k+4/3\mu}{\rho}} \qquad (3)$$

Dimana:

Vp = Kecepatan gelombang primer

k = Modulus *bulk* (Menyatakan *Incompressibility*)

μ = Konstanta *lame* (Menyatakan *Rigidity*)

ρ = Densitas

Gelombang S hanya merambat dalam benda padat dan tiba setelah Gelombang P dengan kecepatan yang bervariasi. Secara matematik, Gelombang S ditulis sebagai berikut (Priyono, 2006):

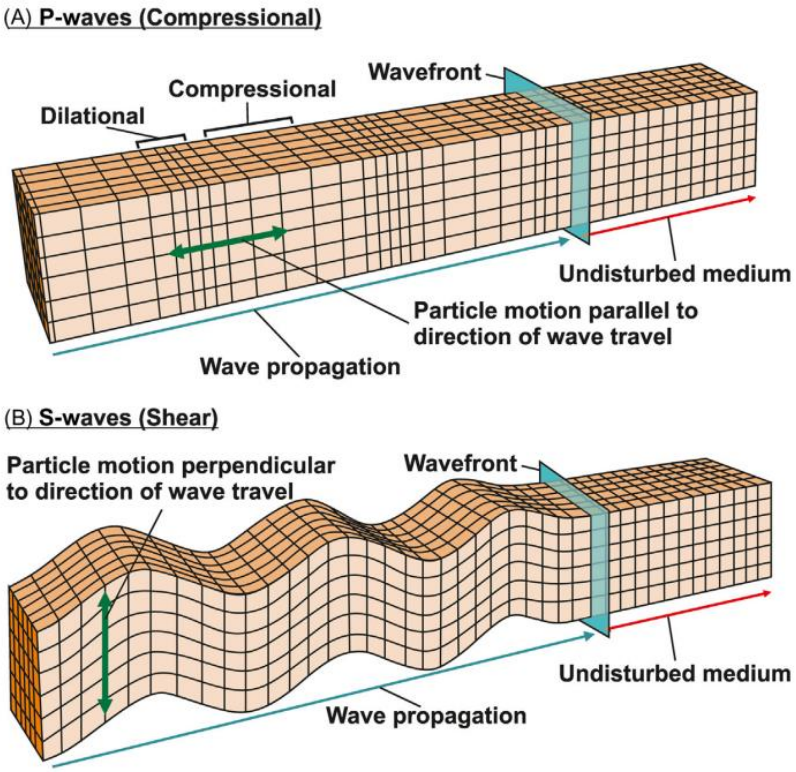
$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \qquad (4)$$

Dimana:

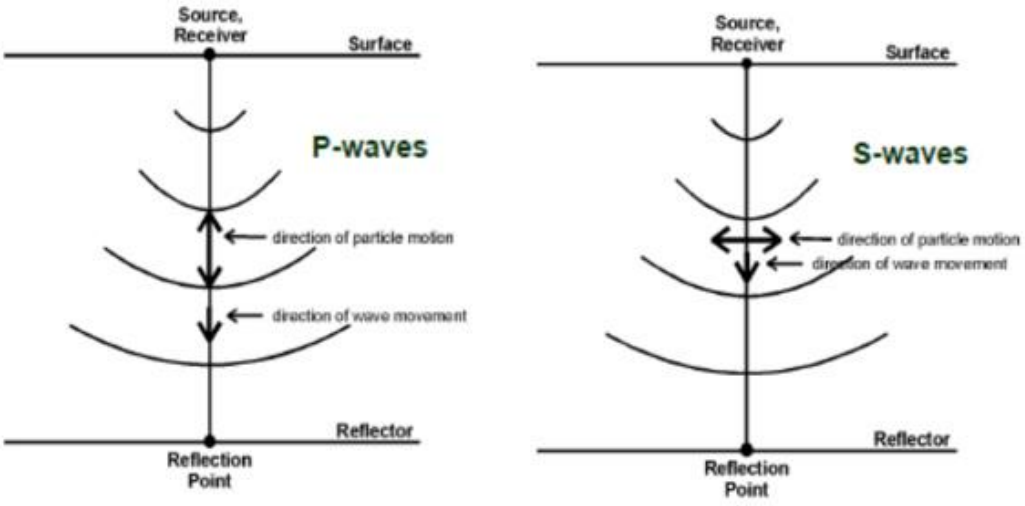
Vs = Kecepatan gelombang sekunder

μ = Konstanta *lame* (Menyatakan *Rigidity*)

ρ = Densitas



Gambar 14. Gelombang badan a). gelombang primer, b). gelombang sekunder (Cox *et al*, 2020)



Gambar 15. Arah perambatan gelombang primer dan sekunder pada akuisisi seismik (Hampson dan Russell, 2009).

3.7 Elastisitas Batuan dan Hubungannya Dengan Gelombang Seismik

Karakteristik kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) gelombang seismik dalam penelitian ini sangat terkait dengan teori elastisitas batuan.

3.7.1 Elastisitas Batuan

Gaya internal dan deformasi yang terjadi pada bagian material batuan dapat digambarkan melalui perambatan gelombang seismik pada batuan; deformasi tiga dimensi disebut *strain*, dan gaya internal yang terjadi pada bagian material tersebut disebut *stress*, yang berhubungan dengan elastisitas benda padat (Shearer *et al*., 2009).

Stress yaitu gaya yang bekerja terhadap satuan luas (*Force/Area*). *Stress* terdiri dari dua komponen, yang pertama yaitu *right angle to surface* (normal atau *dilatation stress*) dan yang kedua yaitu pada bidang *surface* (*shear stress*). *Strain* yaitu hasil deformasi akibat gaya stress tersebut yang ditunjukkan sebagai perubahan panjang (atau volume). Berdasarkan *Hooke's Law*, *stress* dan *strain* tersebut bergantung secara linear λ dan batuan akan bersifat plastis dan *ductile* (Reynolds, 1998).

Dua Parameter Lame secara lengkap mendeskripsikan hubungan linear *stress-strain* dalam *isotropic solid* (Shearer, 2009).

1. Modulus Young (E) merupakan rasio *stress* ekstensi terhadap hasil *strain* ekstensi untuk silinder yang ditarik di kedua sisinya:

$$E = \frac{Longitudinal\ Stress\ \Delta F/A}{Longitudinal\ Strain\ \Delta L/L} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$E = \frac{(3\lambda+2\mu)\mu}{\lambda+\mu} \quad (6)$$

2. Modulus Bulk (k) merupakan rasio tekanan hidrostatik terhadap perubahan volume, merupakan pengukuran inkompresibilitas suatu material:

$$E = \frac{Volume\ Stress\ \Delta P}{Volume\ Strain\ \Delta v/v} \quad (7)$$

$$k = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (8)$$

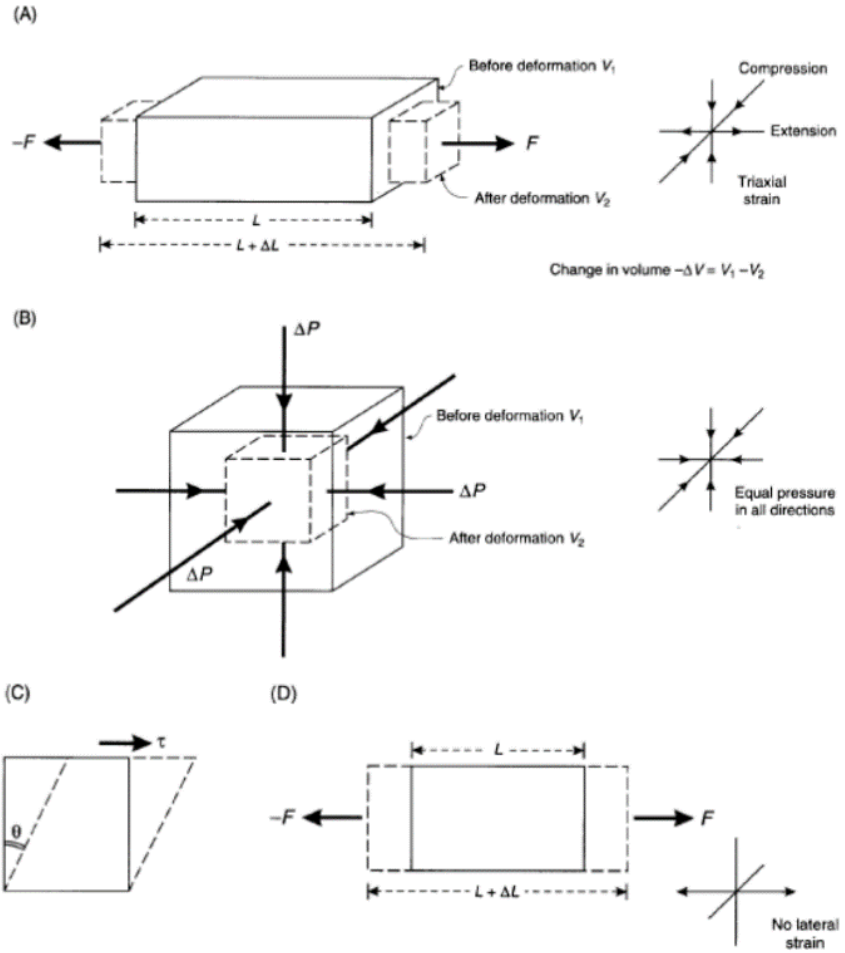
3. Modulus Shear (Rigiditas) merupakan Konstanta Lame yang diekspresikan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{Shear\ stress\ \tau}{Shear\ stress\ \varepsilon} \quad (9)$$

(μ = 1-7 x 104 MPa; μ = 0 untuk fluida)

4. *Poisson's Ratio* merupakan Rasio antara perubahan silinder yang di tarik di kedua ujungnya terhadap ekstensi longitudinal, yang ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

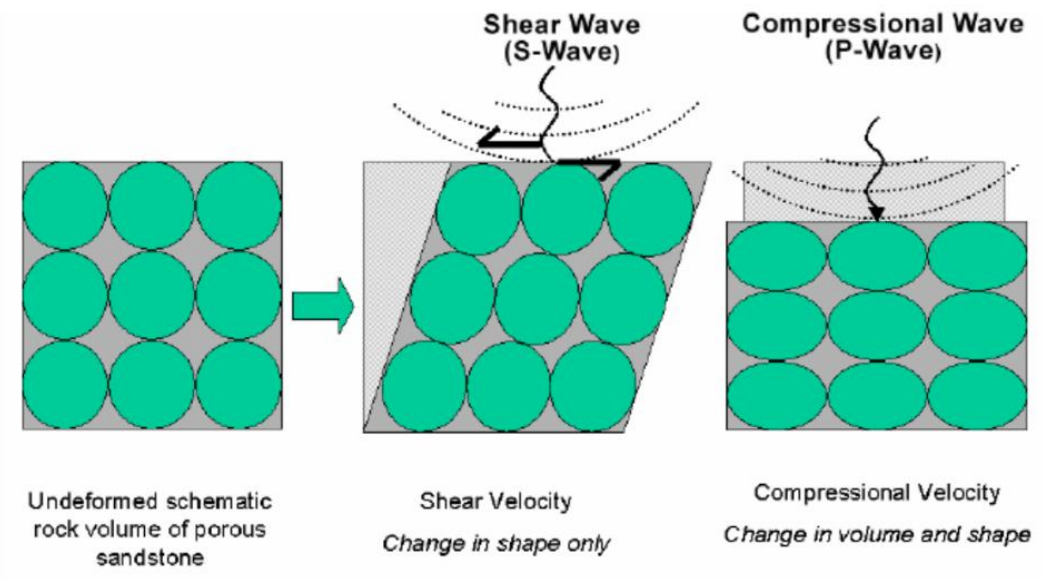
$$\sigma = \frac{\lambda}{2\ (\lambda+\mu)} \quad (10)$$



Gambar 16. Hubungan modulus elastik a). *Young modulus*, b). *Bulk modulus*, c). *Shear modulus*, d). *Axial modulus* (Reynolds, 1998).

3.7.2 Deformasi Batuan Akibat Gelombang P dan S

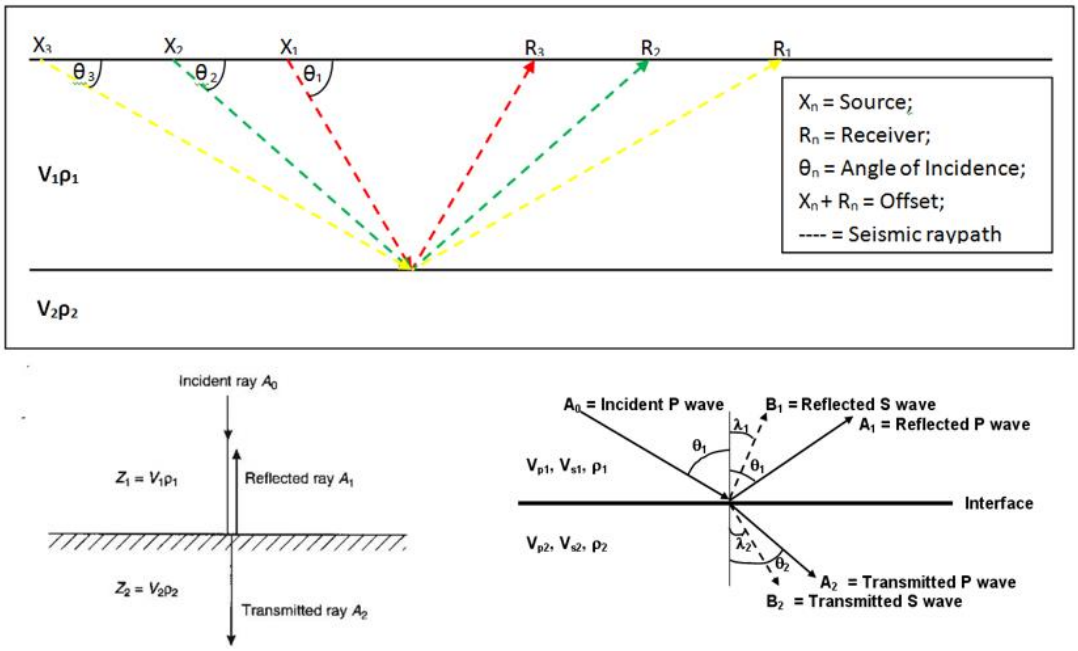
Deformasi batuan berkorelasi dengan arah rambat gelombang primer dan sekunder. Gelombang primer, juga dikenal sebagai gelombang kompresional atau gelombang longitudinal, merambat melalui batuan dengan cara menekan dan meregangkan partikel-partikel dalam medium. Gelombang sekunder yang juga dikenal sebagai gelombang geser atau gelombang transversal, merambat melalui batuan dengan cara merambat secara lateral, yaitu tegak lurus terhadap arah perambatan.



Gambar 17. Deformasi batuan akibat gelombang P dan gelombang S (Goodway, 2001).

3.8 *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA)

Metode *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA) dalam seismik adalah teknik analisis yang mempelajari perubahan amplitudo gelombang seismik relatif terhadap *offset* atau *angle of incidence*. Ini digunakan untuk mengidentifikasi properti fisik dari lapisan batuan di bawah permukaan bumi, seperti kepadatan, kecepatan gelombang, dan impedansi akustik, yang penting dalam mengevaluasi potensi reservoar minyak dan gas serta untuk memahami struktur bawah permukaan (Castagna *et al*, 1997).



Gambar 18. Penjalaran gelombang seismik dari berbagai sudut (AAPG, 2015)**.**

Untuk memodelkan *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA), Zoeppritz (1919) mengembangkan pendekatan yang menggunakan matriks untuk menghitung amplitudo pantulan gelombang seismik pada antarmuka dua lapisan batuan yang berbeda. Pendekatan ini melibatkan matriks yang memperhitungkan parameter fisik seperti kecepatan gelombang, kepadatan, dan impedansi akustik dari kedua lapisan batuan. Dengan menggunakan persamaan Zoeppritz, para geofisikawan dapat mengestimasi perubahan amplitudo gelombang seismik dalam respons terhadap perubahan sudut datang gelombang seismik. Analisis koefisien refleksi parameter tersebut dituliskan dalam bentuk persamaan matriks dalam fungsi sudut sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Rp(\theta_1) \\ Rs(\theta_1) \\ Tp(\theta_1) \\ Ts(\theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\phi_1 & -\sin\theta_2 & \cos\phi_2 \\ -\cos\theta_1 & \sin\phi_1 & -\cos\theta_2 & -\sin\phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{\alpha_1}{\beta_1}\cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2\alpha_1\beta_2^{\,2}}{\rho_1\alpha_2\beta_1^{\,2}}\sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2\alpha_1\beta_2}{\rho_1\beta_1}\cos 2\phi_2 \\ \cos 2\phi_1 & -\frac{\beta_1}{\alpha_1}\sin 2\phi_1 & -\frac{\rho_2\alpha_2}{\rho_1\alpha_1}\cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2\beta_2}{\rho_1\alpha_1}\sin 2\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dengan:

Rp = Amplitudo gelombang P refleksi; θ_1 = Sudut datang gelombang P

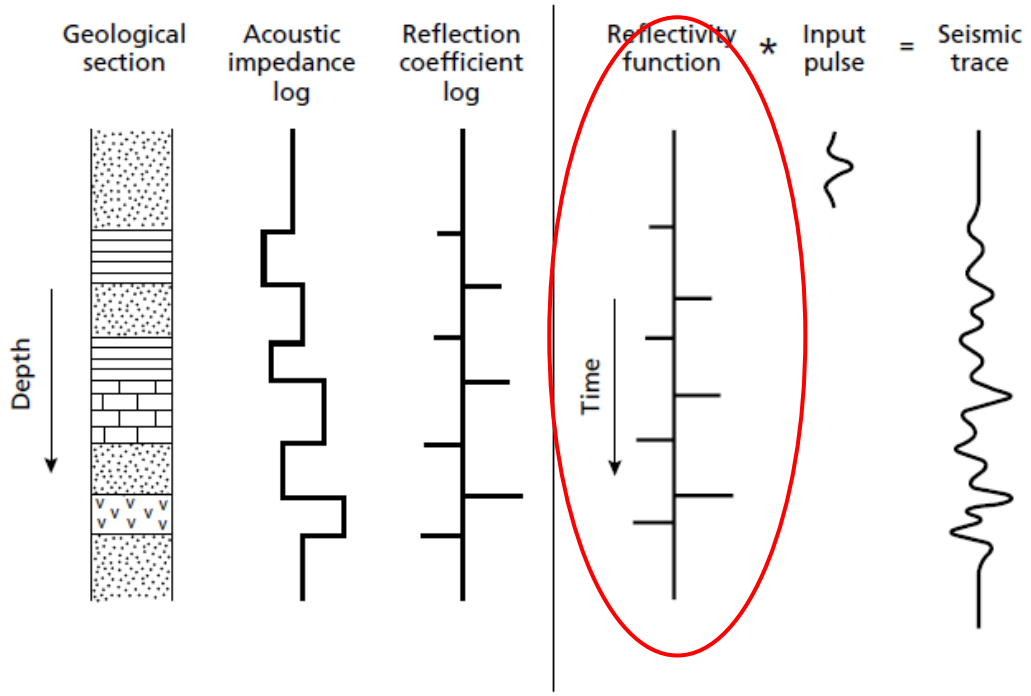
Rs = Amplitudo gelombang S refleksi; θ_2 = Sudut bias gelombang P

Tp = Amplitudo gelombang P transmisi; $\emptyset_1$ = Sudut pantul gelombang S

Ts = Amplitudo gelombang S transmisi; $\emptyset_1$ = Sudut bias gelombang S

α = Kecepatan gelombang P; ρ = densitas; β = Kecepatan gelombang S

Dapat dilihat pada **Gambar 19.** Reaksi antara perlapisan batuan terhadap kecepatan gelombang dan koefisien refleksi yang dikonvolusikan terhadap *wavelet* menghasilkan *trace* seismik dalam rentang waktu yang dikenal sebagai fungsi reflektivitas, di mana amplitudo *spike trace* berkorelasi dengan koefisien refleksi (Kearey *et al*, 2002).



Gambar 19. *Seismic trace* - konvolusi antara koefisien refleksi dan *wavelet source* (Kearey *et al*, 2002).

Namun, AVO/AVA merupakan metode yang kompleks sehingga banyak pendekatan/aproksimasi yang dikembangkan untuk dapat memodelkan respons amplitudo gelombang seismik terhadap perubahan sudut jatuh tersebut. Masing-masing aproksimasi memiliki kompleksitas matematika yang berbeda dan menyediakan pendekatan yang unik dalam menganalisis respons elastis batuan. Setiap jenis aproksimasi AVO ini juga memiliki kelebihan dan kelemahan tertentu, serta memberikan informasi tambahan yang berbeda terkait dengan sifat-sifat

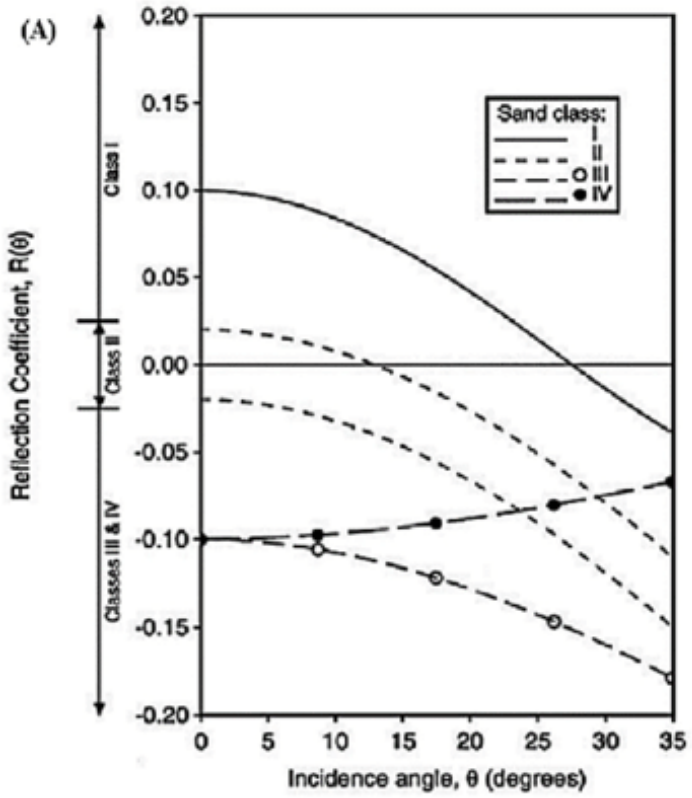
reservoar. Beberapa aproksimasi mungkin lebih tepat digunakan untuk mengidentifikasi jenis batuan atau litologi tertentu, sementara yang lain mungkin lebih fokus pada estimasi kandungan hidrokarbon dalam reservoar.

Tabel 1. Rangkuman variasi aproksimasi AVO/AVA dari berbagai literatur (Thomas *et al*, 2016).

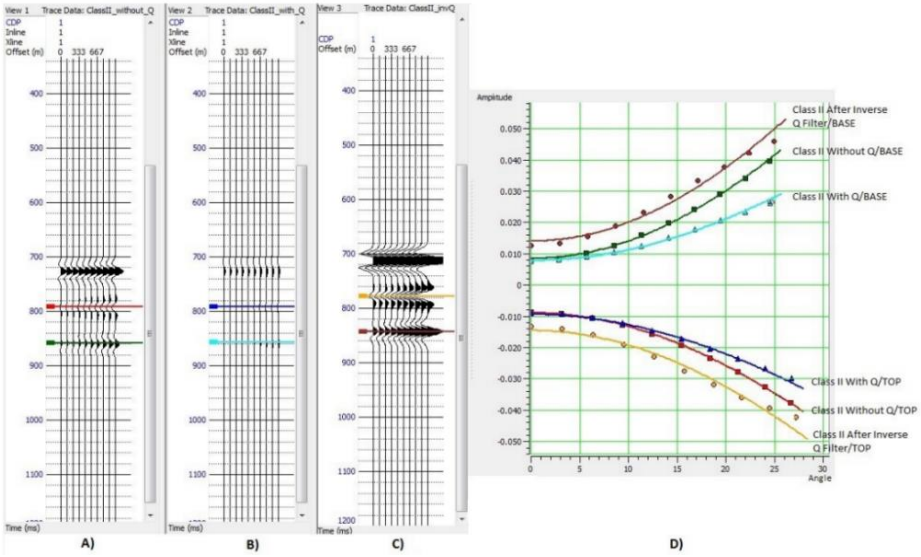
No	Reference	Equation
0	Aki and Richards, 2002, p. 148	$R(p)=\frac{1}{2}\left(1-4\beta^2p^2\right)\frac{\Delta\rho}{\rho}+\frac{1}{2\cos^2 i}\frac{\Delta\alpha}{\alpha}-4\beta^2p^2\frac{\Delta\beta}{\beta}$
1	A&R familiar form, Mavko et al., 2009, p. 101	$R(\theta)=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V_P}{V_P}+\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)+\left[\frac{1}{2}\frac{\Delta V_P}{V_P}-2k\left(2\frac{\Delta V_S}{V_S}+\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)\right]\sin^2\theta+\frac{1}{2}\frac{\Delta V_P}{V_P}\left(\tan^2\theta-\sin^2\theta\right)$
2	Shuey, 1985, abstract	$R(\theta)=R_0+\left[A_0R_0+\frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}\right]\sin^2\theta+\frac{1}{2}\frac{\Delta V_P}{V_P}\left(\tan^2\theta-\sin^2\theta\right)$
3	Verm & Hilterman, 1995, Eq. 1	$R(\theta)=NI\cos^2\theta+PR\sin^2\theta\,;\;\; NI=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V_P}{V_P}+\frac{\Delta\rho}{\rho}\right),\;\; PR=\frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}$
4	Fatti et al., 1994, Eq. 3; (correctly attributed to Gidlow et al., 1992.)	$R(\theta)=\frac{1}{2}\frac{\Delta I_P}{I_P}\left(1+\tan^2\theta\right)-4k\frac{\Delta I_S}{I_S}\sin^2\theta-\left[\frac{1}{2}\frac{\Delta\rho}{\rho}\tan^2\theta-2k\frac{\Delta\rho}{\rho}\sin^2\theta\right]$
5	Goodway et al., 1997. This form of the equation is ours.	$R(\theta)=\frac{\Delta(\lambda\rho)}{\lambda\rho}\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{2}k\right)\sec^2\theta+\frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho}k\left(\frac{1}{2}\sec^2\theta-2\sin^2\theta\right)-\frac{\Delta\rho}{2\rho}\left[\tan^2\theta-4k\sin^2\theta\right]$
6	Stolt and Weglein, 1985, eq. 15, as given by Buland and Omre, 2003	$R(\theta)=\frac{1}{2}\left(1+\tan^2\theta\right)\frac{\Delta\alpha}{\alpha}-4k\sin^2\theta\frac{\Delta\beta}{\beta}+\frac{1}{2}\left(1-4k\sin^2\theta\right)\frac{\Delta\rho}{\rho}$
7	Gray et al., 1999, Eq. 1	$R(\theta)=\frac{\Delta K}{K}\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{3}k\right)\sec^2\theta+\frac{\Delta\mu}{\mu}k\left(\frac{1}{3}\sec^2\theta-2\sin^2\theta\right)+\frac{\Delta\rho}{\rho}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{4}\sec^2\theta\right)$
8	Goodway, 2001, Eq. (c)	$R(\theta)=\left(1+\tan^2\theta\right)\frac{\Delta V_P}{2V_P}-4k\sin^2\theta\frac{\Delta\mu}{2\mu}+\frac{\Delta\rho}{2\rho}$
9	Gray et al., 1999, Eq. 2	$R(\theta)=\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{2}k\right)\sec^2\theta+\frac{\Delta\mu}{\mu}k\left(\frac{1}{2}\sec^2\theta-2\sin^2\theta\right)+\frac{\Delta\rho}{\rho}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{4}\sec^2\theta\right)$
10	Ursenbach and Stewart, 2008, Eq. 33	$R(\theta)=\left[1+\frac{4k\cos^2\theta-1}{5}\sin^2\theta\right]\left(\frac{1}{\cos^2\theta}\right)R_I-8k\sin^2\theta R_J$
11	Smith and Gidlow, 1987, Eq. 6	$R(\theta)=\frac{5}{8}\frac{\Delta V_P}{V_P}-k\left(4\frac{\Delta V_S}{V_S}+\frac{1}{2}\frac{\Delta V_P}{V_P}\right)\sin^2\theta+\frac{1}{2}\frac{\Delta V_P}{V_P}\tan^2\theta$

Berdasarkan variasi aproksimasi tersebut, para ilmuwan melakukan penelitian bagaimana respon AVO/AVA pada berbagai model lapisan batuan. Pada **Gambar 20.** Rutherford dan Williams (1989) mengklasifikasikan AVO untuk *sand gas* berdasarkan koefisien reflektivitas gelombang P dengan sudut datang normal menggunakan aproksimasi Shuey. Pada **Gambar 21.** Chicostepski & Kasperska (2014) memberikan contoh bagaimana model AVO/AVA setiap lapisan pada *real seismic data*. Kemudian, pada **Gambar 22.** Sarkar dan Svatek (1993) melakukan

pemodelan AVO/AVA menggunakan sebuah aproksimasi dengan data beberapa lapisan batuan dan mendapatkan hasil bahwa setiap lapisan batuan memiliki sensitivitas koefisien refleksi yang berbeda. Selain itu, pada **Gambar 23.** Fathalian dan Innanen (2015) juga melakukan uji sensitivitas beberapa aproksimasi AVO/AVA menggunakan data satu lapisan batuan dan mendapatkan hasil bahwa ada beberapa aproksimasi yang bernilai hampir sama dan ada yang jauh berbeda.

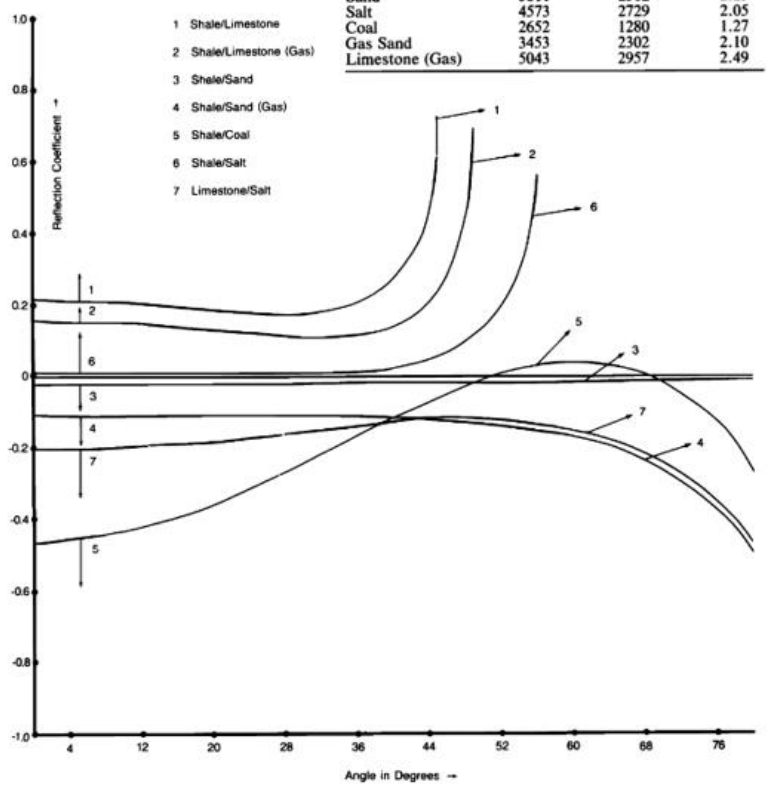


Gambar 20. Klasifikasi anomali AVO/AVA pada *sand gas* (Rutherford dan William, 1989)

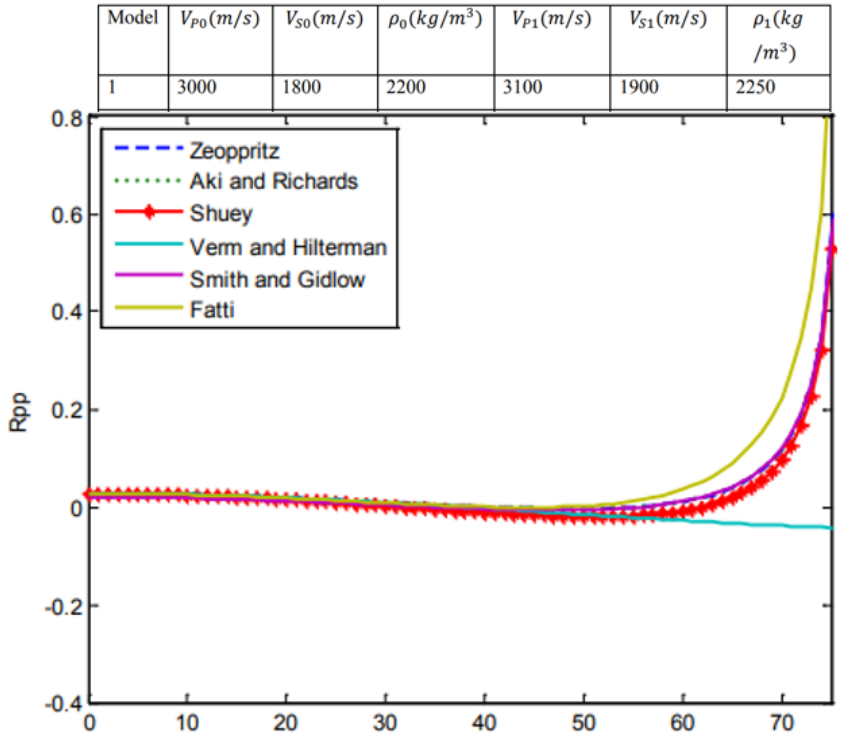


Gambar 21. Respon AVO/AVA pada berbagai model lapisan batuan (Chicostepski dan Kasperska, 2014).

Lithology	*P*-Wave velocity (m/s)	*S*-Wave velocity (m/s)	Density (gms/cc)
Shales	3811	2263	2.40
Limestone	5335	2957	2.65
Sand	3811	2302	2.25
Salt	4573	2729	2.05
Coal	2652	1280	1.27
Gas Sand	3453	2302	2.10
Limestone (Gas)	5043	2957	2.49



Gambar 22. Respon anomali AVO/AVA berbagai model dengan satu aproksimasi (Sarkar & Svatek, 1993)



Gambar 23. Respon AVO/AVA berbagai aproksimasi dengan menggunakan satu model lapisan batuan (Fathalian & Innanen, 2015).

Untuk memahami bagaimana variasi aproksimasi AVO/AVA yang ada pada **Tabel 1.** Maka akan dijelaskan pada *sub-bab* berikutnya. Kemudian, pada **Tabel 2.** Dijelaskan mengenai istilah matematis dari beberapa persamaan matematis aproksimasi AVO/AVA untuk memudahkan dalam memahami aproksimasi-aproksimasi tersebut.

Tabel 2. Daftar lambang dan singkatan pada beberapa Aproksimasi AVO/AVA.

No	Lambang	Singkatan	Aproksimasi Yang Memakai Lambang Pertama Kali
1	Vp_1	Nilai Kecepatan Gelombang P (*Upper Layer*)	Aki dan Richard
2	Vs_1	Nilai Kecepatan Gelombang S (*Upper Layer*)	Aki dan Richard
3	ρ_1	Densitas (*Upper Layer*)	Aki dan Richard
4	Vp_1	Nilai Kecepatan Gelombang P (*Lower Layer*)	Aki dan Richard
5	Vs_1	Nilai Kecepatan Gelombang S (*Lower Layer*)	Aki dan Richard
6	ρ_1	Densitas (Lower *Layer*)	Aki dan Richard
7	α	Nilai Rata-Rata Kecepatan Gelombang P	Aki dan Richard
8	$\Delta\alpha$	Selisih Nilai Kecepatan Gelombang P *Upper Layer* dan *Lower Layer*	Aki dan Richard
9	β	Nilai Rata-Rata Kecepatan Gelombang S	Aki dan Richard

No	Lambang	Singkatan	Aproksimasi Yang Memakai Lambang Pertama Kali
10	$\Delta\beta$	Selisih Kecepatan Gelombang S *Upper Layer* dan *Lower Layer*	Aki dan Richard
11	θ	Nilai Rata-Rata Sudut Datang dan Sudut Transmisi	Aki dan Richard
12	φ_1	Nilai Sudut Datang	Aki dan Richard
13	φ_2	Nilai Sudut Transmisi	Aki dan Richard
14	$R_{pp}(\varphi_1)$	Nilai Koefisien Refleksi Pada Sudut Datang	Aki dan Richard
15	R_0	Koefisien Refleksi Pada Sudut Datang 0^0	Shuey
16	A_0	Koefisien Amplitudo AVA Pada Sudut Datang 0^0	Shuey
17	γ_1	Rasio Kecepatan Gelombang Sekunder Terhadap Gelombang Primer *Upper Layer*	Shuey
18	γ_2	Rasio Kecepatan Gelombang Sekunder Terhadap Gelombang Primer *Lower Layer*	Shuey
19	γ	Nilai Rata-Rata Kecepatan Gelombang Sekunder Terhadap Gelombang Primer *Upper Layer* dan *Lower Layer*	Shuey
20	σ_1	Nilai *Poisson's Ratio Upper Layer*	Shuey
21	σ_2	Nilai *Poisson's Ratio Lower Layer*	Shuey
22	σ	Nilai Rata-Rata *Poisson's Ratio Upper Layer* dan *Lower Layer*	Shuey
23	B	Faktor Perubahan Densitas dan Kecepatan Batuan di Sepanjang Bidang Batas Antar *Upper Layer* dan *Lower Layer*	Shuey
24	k	Nilai Efek *Multiple Scattering*	Stolt dan Weglein
25	ΔIp	Perubahan Impedansi Akustik Gelombang Primer	Fatti
26	Ip	Impedansi Akustik Gelombang Primer *Upper Layer*	Fatti
27	CIs	Perubahan Impedansi Akustik Gelombang Sekunder	Fatti
28	Is	Impedansi Akustik Gelombang Sekunder *Upper Layer*	Fatti
29	NI	Normal Incidence	Verm dan Hilterman
30	PR	*Poisson's Reflectivity*	Verm dan Hilterman
31	λ_1	Nilai *Modulus Lame* Pada *Upper Layer*	Goodway Pertama
32	λ_2	Nilai *Modulus Lame* Pada *Lower Layer*	Goodway Pertama
33	λ	Nilai Rata-Rata *Modulus Lame Upper Layer* dan *Lower Layer*	Goodway Pertama
34	μ_1	Nilai *Modulus Shear* Pada *Upper Layer*	Goodway Pertama
35	μ_2	Nilai *Modulus Shear* Pada *Lower Layer*	Goodway Pertama
36	μ	Nilai Rata-Rata *Modulus Shear Upper Layer* dan *Lower Layer*	Goodway Pertama
37	K_1	Nilai *Modulus Bulk* Pada *Upper Layer*	Gray Pertama
38	K_2	Nilai *Modulus Bulk* Pada *Lower Layer*	Gray Pertama
39	K	Nilai Rata-Rata *Modulus Bulk Upper Layer* dan *Lower Layer*	Gray Pertama
40	ΔK	Selisih Nilai *Modulus Bulk Upper Layer* dan *Lower Layer*	Gray Pertama
41	$\Delta\lambda$	Selisih Nilai *Modulus Lame Upper Layer* dan *Lower Layer*	Gray Kedua

No	Lambang	Singkatan	Aproksimasi Yang Memakai Lambang Pertama Kali
42	Δμ	Selisih Nilai *Modulus Shear Upper Layer* dan *Lower Layer*	Gray Kedua
43	Rt	*Target Layer*	Ursenbach dan Stewart
44	Rj	*Jacket Layer*	Ursenbach dan Stewart

3.8.1 Aproksimasi AVO/AVA Aki dan Richard

Aki dan Richard (1980) membuat sebuah pendekatan AVO/AVA untuk menyederhanakan persamaan Zoeppritz yang ditunjukkan pada persamaan 11. Aproksimasi Richards ini digunakan untuk mengestimasikan perubahan amplitudo pantulan gelombang P (primer) dengan mempertimbangkan perbedaan dalam parameter geofisika dasar, yaitu kecepatan gelombang P (α), kecepatan gelombang S (β), dan densitas (ρ) antara dua lapisan batuan yang berbeda.

$$R_{pp}(\varphi_1) = [\frac{1}{2}(1 + \tan^2 \Theta)] \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - [4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\Theta] \frac{\Delta\beta}{\beta} + [\frac{1}{2}(1 - 4\sin^2\Theta)] \frac{\Delta\rho}{\rho} \qquad (12)$$

Dengan:

$\Delta\alpha = Vp_2 - Vp_1$, $\alpha = \frac{Vp_2 + Vp_1}{2}$

$\Delta\beta = Vs_2 - Vs_1$, $\beta = \frac{Vs_2 + Vs_1}{2}$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2 + \rho_1}{2}$

$\Theta = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}$

$\varphi_2 = \sin (\frac{Vp_2}{Vp_1} \text{Sin } \varphi_1)^{-1}$

Secara *detail* bentuk *three terms* persamaan Aki dan Richard (1980) dapat dijelaskan sebagai berikut:

- $\frac{1}{2}(1 + \tan^2 \Theta)] \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$: Bagian pertama dari rumus ini menggambarkan kontribusi dari perubahan kecepatan gelombang P (Δα) yang terjadi pada lapisan batuan. Faktor (1 + tan2 Θ) menggambarkan efek sudut datang gelombang.
- $[4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\Theta] \frac{\Delta\beta}{\beta}$: Bagian kedua rumus ini berhubungan dengan perubahan kecepatan gelombang S (Δβ) dalam batuan dan juga mempertimbangkan efek dari sudut datang ($\sin^2\Theta$).

- $[\frac{1}{2}(1- 4\sin^2\theta)]\ \frac{\Delta\rho}{\rho}$: Bagian ketiga rumus ini mencerminkan kontribusi perubahan densitas ($\Delta\rho$) antara dua lapisan batuan dengan mempertimbangkan sudut datang gelombang ($\sin^2\theta$).

3.8.2 Aproksimasi AVO/AVA Shuey

Chris A. Shuey (1985) mengembangkan transformasi AVO (Amplitude-Versus-Offset) yang mengintegrasikan parameter Poisson's ratio ke dalam persamaan. Hal ini dilakukan untuk memberikan model yang lebih lengkap dan akurat dalam menggambarkan bagaimana amplitudo gelombang seismik berubah sebagai fungsi dari offset (jarak antara sumber seismik dan penerima). Shuey (1985) melakukan transformasi AVO *approximation* ke dalam rumus yang bergantung pada parameter kecepatan gelombang P (primer), densitas, dan *poisson's ratio*. Kemudian Shuey mengaplikasikan aproksimasi yang dibuat pada lapangan *gas sand* di Gulf Mexico.

$$R_{pp}(\varphi_1) = R_0 + [A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}] \sin^2\theta + \frac{1}{2}\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(\tan^2\theta - \sin^2\theta) \quad (13)$$

Dengan:

$R_0 = \frac{1}{2}(\frac{\Delta Vp}{Vp} + \frac{\Delta\rho}{\rho})$, $A_0 = B - 2(1+B)\frac{1-2\sigma}{1-\sigma}$

$\gamma_1 = \frac{Vs_1}{Vp_1}$, $\gamma_2 = \frac{Vs_2}{Vp_2}$

$\gamma = \frac{\gamma 1 + \gamma 2}{2}$, $\sigma_1 = \frac{\frac{1}{\gamma_1} - 2}{2(\frac{1}{\gamma_1^2} - 1)}$

$\sigma_2 = \frac{\frac{1}{\gamma_2} - 2}{2(\frac{1}{\gamma_2^2} - 1)}$, $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$

$B = \frac{\frac{\Delta Vp}{Vp}}{\frac{\Delta Vp}{Vp} + \frac{\Delta\rho}{\rho}}$, $\theta = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}$,

$\varphi_2 = \sin(\frac{Vp_2}{Vp_1}\sin\varphi_1)^{-1}$

3.8.3 Aproksimasi AVO/AVA Stolt dan Weglein

Stolt dan Weglein (1985) melakukan pendekatan AVO/AVA dengan mempertimbangkan efek *multiple scattering* (k) serta kecepatan gelombang S pada amplitudo pantulan. *Multiple scattering* pada gelombang seismik adalah fenomena dimana gelombang seismik mengalami beberapa kali hamburan atau perpantulan di dalam medium batuan yang kompleks, yang mengakibatkan perubahan pola perambatan gelombang tersebut. Dalam proses multiple scattering, gelombang seismik dapat mengalami hamburan dari berbagai heterogenitas, retakan, atau batuan yang memiliki struktur kompleks di sepanjang jalur perambatan.

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{1}{2}(1+\tan^2\theta)\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4k\sin^2\theta\frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{1}{2}(1-4k\sin^2\theta)\frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (14)$$

Dengan:

$\Delta\alpha = Vp_2 - Vp_1$, $\alpha = \frac{Vp_2+Vp_1}{2}$

$\Delta\beta = Vs_2 - Vs_1$, $\beta = \frac{Vs_2+Vs_1}{2}$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$

$\theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\sin\varphi_1\right)^{-1}$

$k = \left(\frac{Vs1}{Vp1}\right)^2$

3.8.4 Aproksimasi AVO/AVA Smith dan Gidlow

Smith dan Gidlow (1987) melakukan pendekatan AVO dengan tidak memasukkan secara eksplisit densitas di dalam rumus matematisnya dikarenakan beberapa alasan sebagai berikut:

- Sederhana dan Praktis: Salah satu tujuan aproksimasi AVO adalah menyederhanakan analisis seismik agar dapat digunakan di lapangan dengan praktis. Dalam banyak situasi eksplorasi minyak dan gas bumi, kecepatan gelombang P dan S seringkali lebih mudah diukur atau diestimasi dibandingkan dengan densitas. Oleh karena itu, dengan mengabaikan densitas, persamaan menjadi lebih sederhana dan lebih mudah digunakan di lapangan.
- Efek Kecil pada AVO: Dalam banyak kasus, perubahan kecepatan gelombang P dan S memiliki dampak yang lebih besar pada amplitudo gelombang seismik

yang dipantulkan daripada perubahan densitas. Densitas seringkali tidak memiliki kontribusi yang signifikan terhadap variasi amplitudo dalam konteks AVO. Oleh karena itu, mempertimbangkan hanya kontras kecepatan gelombang P dan S masih dapat memberikan hasil yang cukup akurat dalam banyak situasi eksplorasi minyak dan gas bumi.

- Kompleksitas Tambahannya: Memasukkan densitas dalam persamaan AVO dapat meningkatkan kompleksitas persamaan secara signifikan. Hal ini dapat membuat analisis lebih sulit dan memerlukan data yang lebih lengkap dan akurat tentang densitas batuan, yang mungkin tidak selalu tersedia atau sulit diukur di lapangan.

Berikut merupakan aproksimasi Smith dan Gidlow:

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{5}{8}\frac{\Delta Vp}{Vp} - k\left(4\frac{\Delta Vs}{Vs} + \frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp}\right)\sin^2\theta + \frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp}\tan^2\theta \quad (15)$$

Dimana:

$\Delta\alpha = Vp_2 - Vp_1$, $\quad \alpha = \frac{Vp_2+Vp_1}{2}$

$\Delta\beta = Vs_2 - Vs_1$, $\quad \beta = \frac{Vs_2+Vs_1}{2}$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\quad \rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$

$\theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\quad \varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\,\mathrm{Sin}\,\varphi_1\right)^{-1}$

Smith dan Gidlow (1987) dalam penelitiannya menggunakan aproksimasi yang telah mereka buat pada sebuah lapangan gas. Pada penelitiannya didapatkan data bahwa *water-bearing sandstone* dan *shale* cenderung berada pada *trend* yang sama dengan batupasir yang mengandung gas.

3.8.5 Aproksimasi AVO/AVA Fatti

Fatti *et al* (1987) melakukan pendekatan AVO dengan mempertimbangkan kontras impedansi gelombang P dan gelombang S (ΔIp dan ΔIs). $\frac{\Delta Ip}{Ip}$ Ini adalah kontras relatif impedansi akustik antara dua lapisan batuan yang berdekatan di bawah permukaan. ΔIp adalah perubahan dalam impedansi akustik, dan Ip adalah

impedansi akustik di batuan asal. $\frac{\Delta Is}{Is}$ Ini adalah kontras relatif impedansi akustik gelombang S (sekunder) antara dua lapisan batuan yang berdekatan di bawah permukaan. ΔIs adalah perubahan dalam impedansi akustik gelombang S, dan Is adalah impedansi akustik gelombang S di batuan asal.

Berikut merupakan Aproksimasi AVO/AVA Fatti *et al* (1987):

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{1}{2}\frac{\Delta Ip}{Ip}(1+\tan^2\Theta) - 4k\frac{\Delta Is}{Is}\sin^2\Theta - [\frac{1}{2}\frac{\Delta\rho}{\rho}\tan^2\Theta - 2k\frac{\Delta\rho}{\rho}\sin^2\Theta] \quad (16)$$

Dimana:

$\Delta Ip = Vp_2\,\rho_2 - Vp_1\,\rho_1$, $\quad Ip = Vp_2\,\rho_2 + Vp_1\,\rho_1$

$\Delta Is = Vs_2\,\rho_2 - Vs_1\,\rho_1$, $\quad Is = Vs_2\,\rho_2 + Vs_1\,\rho_1$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\quad \rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$

$\Theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\quad \varphi_2 = \sin(\frac{Vp_2}{Vp_1}\,\mathrm{Sin}\,\varphi_1)^{-1}$

$k = (\frac{Vs1}{Vp1})^2$

Fatii *et al* (1987) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada lapangan gas Mossel Bay bagian selatan. Pada penelitiannya didapatkan data pantulan faktor fluida amplitudo dengan anomali tinggi terjadi di bagian atas dan dasar *gas-reservoar sandstone*.

3.8.6 Aproksimasi AVO/AVA Verm dan Hilterman

Verm dan Hilterman (1995) mencoba untuk menggambarkan perubahan amplitudo dengan offset dan sudut datangnya dengan menggunakan dua komponen yang berbeda, yaitu komponen *Normal Incidence* (NI) dan komponen *Poisson Reflectivity*/*Far-Offset Poisson Ratio* (PR).

$$R_{pp}(\varphi_1) = NI\cos^2\Theta + PR\sin^2\Theta; \quad (17)$$

Dimana:

$NI = (\frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp} + \frac{\Delta\rho}{\rho})$, $\quad PR = \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}$

$\gamma_1 = \frac{Vs_1}{Vp_1}$, $\gamma_2 = \frac{Vs_2}{Vp_2}$

$\gamma = \frac{\gamma 1 + \gamma 2}{2}$, $\sigma_1 = \frac{\frac{1}{\gamma_1} - 2}{2(\frac{1}{\gamma_1^2} - 1)}$

$\sigma_2 = \frac{\frac{1}{\gamma_2} - 2}{2(\frac{1}{\gamma_2^2} - 1)}$, $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$

$B = \frac{\frac{\Delta Vp}{Vp}}{\frac{\Delta Vp}{Vp} + \frac{\Delta \rho}{\rho}}$, $\theta = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}$,

$\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1} \operatorname{Sin} \varphi_1\right)^{-1}$

Normal Incidence (NI) menggambarkan amplitudo pada sudut datang normal, yaitu ketika gelombang datang secara tegak lurus ke permukaan. *Poisson Reflectivity*/*Far-Offset Poisson Ratio* (PR) menggambarkan amplitudo pada sudut datang yang tidak normal (*non-normal incidence*). PR adalah perubahan relatif dari parameter *Poisson* (σ), yang juga merupakan parameter yang mengukur elastisitas material dan sejauh mana material dapat mengalami kontraksi lateral ketika diberikan tekanan dalam arah longitudinal. Perubahan ini dinyatakan dalam bentuk Δσ.

Verm dan Hilterman (1995) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada sebuah lapangan gas kemudian membuat klasifikasi AVO/AVA dalam beberapa kelas. Pada penelitian ini, Verm dan Hilterman mendapatkan hasil karakter amplitudo seismik pada kelas 3 klasifikasi yang mereka buat sama dengan karakteristik AVO kelas 2 penelitian Shuey (1985).

3.8.7 Aproksimasi AVO/AVA Goodway Pertama

Goodway *et al* (1997) melakukan pendekatan aproksimasi yang dikenal dengan sebutan "Lambda, Mu, Rho" (LMR). LMR mempertimbangkan kontras dalam tiga parameter: impedansi akustik (λρ), impedansi elastis (μρ), dan densitas (ρ). Pendekatan ini lebih kompleks daripada beberapa aproksimasi AVO lainnya karena melibatkan kontribusi dari tiga parameter yang berbeda.

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{1}{2}\frac{\Delta(\lambda\rho)}{\lambda\rho}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}k\right)\sec^2\Theta + \frac{\Delta(\mu\rho)}{\mu\rho}k\left(\frac{1}{2}\sec^2\Theta - 2\sin^2\Theta\right) - \frac{\Delta\rho}{2\rho}\left[\tan^2\Theta - 4k\sin^2\Theta\right] \quad (18)$$

Dimana:

$\lambda_1 = Vp_1^2\rho_1 - [2(Vs_1^2)\rho_1]$, $\lambda_2 = Vp_2^2\rho_2 - [2(Vs_2^2)\rho_2]$

$\lambda = \frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}$, $\mu_1 = Vs_1^2\rho_1$

$\mu_2 = Vs_2^2\rho_2$, $\mu = \frac{\mu_2+\mu_1}{2}$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$,

$\Theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\sin\varphi_1\right)^{-1}$

$k = \left(\frac{Vs_1}{Vp_1}\right)^2$

Goodway *et al* (1997) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada lapangan *shallow gas sand*. Pada penelitiannya, aproksimasi ini dapat menunjukkan zona gas yang berada di antara *shale* dan karbonat dengan jelas.

3.8.8 Aproksimasi AVO/AVA Gray Pertama

Gray *et al* (1999) melakukan pendekatan untuk memodelkan AVO/AVA yang bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih sederhana dan praktis tentang hubungan antara perubahan amplitudo gelombang seismik dengan perubahan dalam parameter *bulk modulus* (K). Modulus bulk adalah salah satu parameter elastisitas yang menggambarkan respons suatu bahan terhadap tekanan hidrostatis. Pendekatan ini merupakan aproksimasi Gray yang pertama.

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{\Delta K}{K}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3}k\right)\sec^2\Theta + \frac{\Delta\mu}{\mu}k\left(\frac{1}{3}\sec^2\Theta - 2\sin^2\Theta\right) - \frac{\Delta\rho}{2\rho}\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\sec^2\Theta\right] \quad (19)$$

Dengan:

$K_1 = Vp_1^2\rho_1 - \frac{4}{3}\mu_1$, $K_2 = Vp_2^2\rho_2 - \frac{4}{3}\mu_1$

$\Delta K = K_2 - K_1$, $K = \frac{K_2+K_1}{2}$,

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$,

$\Theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\sin\varphi_1\right)^{-1}$

$k = \left(\frac{Vs_1}{Vp_1}\right)^2$

Gray *et al* (1999) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada lapangan dengan karakter *shallow gas sand*, Alberta Canada. Berdasarkan penelitiannya, reflektifitas dari λρ sama karakteristiknya dengan Δλ/λ apabila perubahan densitas kecil.

3.8.9 Aproksimasi AVO/AVA Gray Kedua

Gray *et al* (1999) membuat aproksimasi kedua dalam memodelkan AVO/AVA. Pada pendekatan yang kedua ini, Gray mempertimbangkan kontras kecepatan gelombang P ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$) yang menggambarkan sifat inkompresibilitas batuan.

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}k\right)\sec^2\Theta + \frac{\Delta\mu}{\mu}k\left(\frac{1}{2}\sec^2\Theta - 2\sin^2\Theta\right) + \frac{\Delta\rho}{\rho}\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\sec^2\Theta\right) \quad (20)$$

Dimana:

$\lambda_1 = Vp_1^2\rho_1 - [2(Vs_1^2)\rho_1]$, $\lambda_2 = Vp_2^2\rho_2 - [2(Vs_2^2)\rho_2]$

$\lambda = \frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}$, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$

$\mu_1 = Vs_1^2\rho_1$, $\mu_2 = Vs_2^2\rho_2$,

$\mu = \frac{\mu_2+\mu_1}{2}$, $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$,

$\Theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\mathrm{Sin}\,\varphi_1\right)^{-1}$

$k = \left(\frac{Vs_1}{Vp_1}\right)^2$

Gray *et al* (1999) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada lapangan dengan karakter *shallow gas sand*, Alberta Canada. Berdasarkan penelitiannya, reflektivitas dari λρ sama karakteristiknya dengan Δλ/λ apabila perubahan densitas kecil.

3.8.10 Aproksimasi AVO/AVA Goodway Kedua

Goodway *et al* (2001) melakukan penyederhaan rumus matematis dari aproksimasi sebelumnya. Pada aproksimasi ini, Goodway hanya mempertimbangkan kontras kecepatan gelombang P (ΔVp), kontras modulus geser (Δμ), dan kontras densitas (Δρ) dantidak menggunakan konsep lambda, mu, dan rho seperti dalam Aproksimasi AVO Goodway *et al*. (1997), yang menggabungkan lebih banyak parameter elastis dalam persamaannya.

$$R_{pp}(\varphi_1) = (1+\tan^2\theta)\frac{\Delta\alpha}{2\alpha} - 4k\sin^2\theta\frac{\Delta\mu}{2\mu} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (21)$$

Dimana:

$\Delta\alpha = Vp_2 - Vp_1$, $\alpha = \frac{Vp_2+Vp_1}{2}$

$\mu_1 = Vs_1^2\,\rho_1$, $\mu_2 = Vs_2^2\,\rho_2$,

$\mu = \frac{\mu_2+\mu_1}{2}$, $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$

$\theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\sin\varphi_1\right)^{-1}$

$k = \left(\frac{Vs_1}{Vp_1}\right)^2$

Goodway *et al* (2001) mengaplikasikan aproksimasi yang telah dibuat pada lapangan dengan karakter *lower wet sand* dengan *marginal gas saturation*. Pada penelitian ini, didapatkan nilai λρ terendah dengan jelas mengidentifikasi gas pada *wet sand*.

3.8.11 Aproksimasi AVO/AVA Ursenbach dan Stewart

Ursenbach dan Stewart (2008) mencoba untuk memodelkan AVO/AVA dengan menggambarkan perubahan amplitudo gelombang seismik sebagai hasil dari pemantulan pada *target layer* (Rt) dan *jacket layer* (Rj), serta mengakomodasi efek *multiple scattering* (k). *Target layer* adalah lapisan batuan yang menjadi objek utama analisis dalam eksplorasi seismik. Rt adalah koefisien pantulan yang terkait dengan lapisan target. Ini memberikan informasi tentang seberapa banyak energi gelombang seismik yang dipantulkan kembali ke permukaan ketika gelombang

melewati antarmuka lapisan target. Sedangkan *jacket layer* adalah lapisan batuan yang terletak di sekitar lapisan target. Lapisan ini mungkin memiliki sifat-sifat yang berbeda dan bertindak sebagai pembungkus atau pelindung untuk lapisan target. Rj adalah koefisien pantulan yang terkait dengan lapisan jacket. Ini mencerminkan seberapa banyak energi gelombang seismik yang dipantulkan kembali ke permukaan ketika gelombang melintasi antarmuka lapisan *jacket*.

$$R_{pp}(\varphi_1) = (1+ \frac{4k\cos^2\theta-1}{5}\sin^2\theta)\,(\frac{1}{\cos^2\theta})\,Rt - 8k\sin^2\theta\,Rj \tag{22}$$

Dengan:

$Rt = \frac{1}{2}(1+\tan^2\theta)\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$; $Rj = 4\frac{\beta}{\alpha}\sin^2\theta\frac{\Delta\beta}{\alpha}$

$\theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$, $\varphi_2 = \sin(\frac{Vp_2}{Vp_1}\,\mathrm{Sin}\,\varphi_1)^{-1}$

$k = (\frac{Vs_1}{Vp_1})^2$

3.8.12 Aproksimasi AVO/AVA Mavko

Aproksimasi AVO/AVA oleh Mavko *et al* (2009) adalah suatu bentuk dari aproksimasi AVO/AVA Aki dan Richard (1980). Perbedaannya adalah bahwa Mavko *et al* (2009) memberikan formulasi yang lebih terinci atau *familiar form* dari aproksimasi AVO/AVA Aki dan Richard, yang lebih mudah dipahami dan digunakan dalam analisis seismik. Dalam esensi, aproksimasi AVO oleh Mavko *et al* (2009) adalah ekspansi lebih lanjut dari aproksimasi AVO A&R yang memberikan representasi yang lebih rinci tentang bagaimana perubahan amplitudo gelombang seismik dipengaruhi oleh perubahan kecepatan gelombang P, densitas, dan efek *multiple scattering* (k).

$$R_{pp}(\varphi_1) = \frac{1}{2}(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}+\frac{\Delta\rho}{\rho}) + [\frac{1}{2}\frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 2k\,(2\frac{\Delta\beta}{\beta}+\frac{\Delta\rho}{\rho})]\sin^2\theta + \frac{1}{2}\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(\tan^2\theta - \sin^2\theta) \tag{23}$$

Dengan:

$\Delta\alpha = Vp_2 - Vp_1$, $\alpha = \frac{Vp_2+Vp_1}{2}$

$\Delta\beta = Vs_2 - Vs_1$, $\beta = \frac{Vs_2+Vs_1}{2}$

$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho = \frac{\rho_2+\rho_1}{2}$

$\theta = \frac{\varphi_2+\varphi_1}{2}$

$\varphi_2 = \sin\left(\frac{Vp_2}{Vp_1}\,\mathrm{Sin}\,\varphi_1\right)^{-1}$

Perbedaan utama dalam formulasi Mavko *et al*. (2009) adalah penekanan pada bentuk yang lebih terstruktur dari persamaan AVO A&R. Namun, pada dasarnya, keduanya masih bergantung pada konsep dasar yang sama, yaitu hubungan antara perubahan amplitudo gelombang seismik dengan perubahan parameter geofisika dalam lapisan bumi.

IV. METODE PENELITIAN

4.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama dua bulan yang dimulai pada bulan September sampai dengan Oktober 2023 pada salah satu perusahaan minyak dan gas yang terdapat di Indonesia yakni PetroChina International Jabung Ltd pada divisi eksploitasi. Adapun jadwal kegiatan penelitian tugas akhir secara lebih rinci dapat dilihat pada **Tabel 3.**

4.2 Perangkat Lunak

Proses inventarisasi dan pengolahan data pada penelitian ini memanfaatkan perangkat lunak berupa:

1. *Hampson-Russel Suite (HRS-10.2).*

   Software Hampson-Russel digunakan untuk pengolahan data sumur untuk *generate* data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ).
2. *Microsoft Excel*

   Software Microsoft Excel digunakan untuk membuat kerangka pemodelan pengolahan data berdasarkan variasi aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO) dan *forward modelling* data AVO.

Tabel 3. Jadwal kegiatan penelitian tugas akhir.

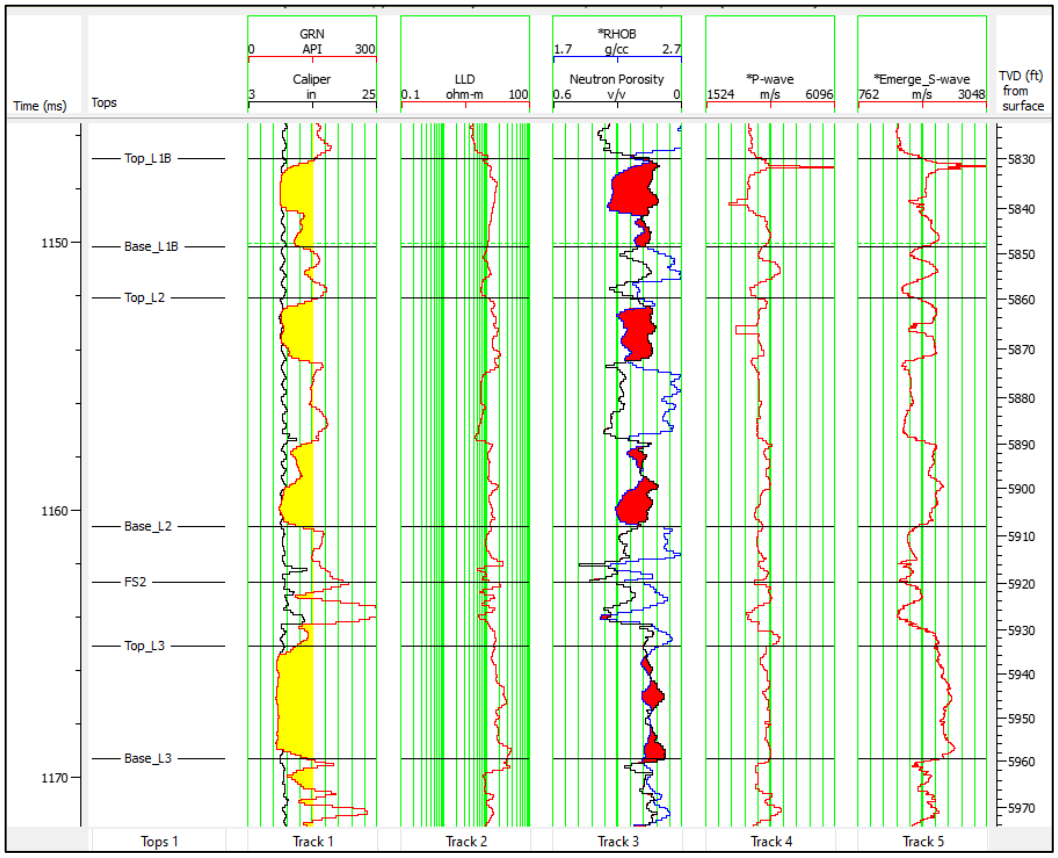
No	Kegiatan	Bulan (Minggu Ke-) dan Rentang Tanggal													
		September				Oktober				November					Desember
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1
		4 s/d 8	11 s/d 15	18 s/d 22	25 s/d 29	2 s/d 6	9 s/d 13	16 s/d 220	23 s/d 27	30 Okt s/d 3	6 s/d 10	13 s/d 17	20 s/d 24	27 s/d 1 Des	4 s/d 8
1	Studi Literatur														
2	Pembuatan Kerangka Pemodelan														
3	Inventarisasi dan Pengolahan Data														
4	Analisis dan Interpretasi Data														
5	Penyusunan Laporan														
6	Presentasi Hasil di Perusahaan														
7	Penyusunan Sripsi														
8	Seminar Proposal														
9	Revisi														
10	Seminar Hasil														
11	Ujian Skripsi														

4.3 Data Penelitian

Dalam proses penelitian ini digunakan data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) yang merupakan hasil *generate* dari proses *well logging* dan *drill stem test* (DST) 12 sumur pada lapangan "GEMURUH" Cekungan Sumatera Selatan, Formasi *Lower* Talangakar (LTAF).

4.3.1 Data Sumur

Data *well logging* yang masih dalam bentuk digital atau di dalam *software* Hampson-Russell digunakan untuk *generate* data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) pada zona reservoar target. Zona target merupakan zona reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida.



Gambar 24. Tampilan data *well logging* salah satu sumur penelitian di dalam *software* Hampson-Russell.

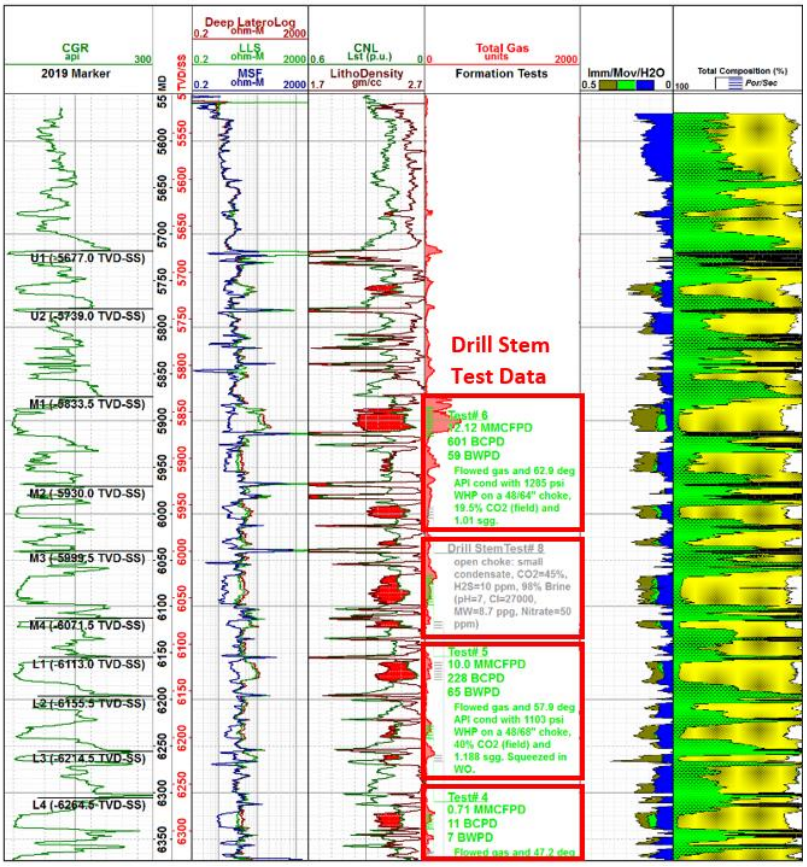
Tabel 4. Informasi kelengkapan data sumur.

No	Sumur	Data Log		
		Kecepatan Gelombang P (Vp)	**Kecepatan Gelombang S (Vs)**	**Densitas (ρ)**
1	GMH-1	√	√	√
2	GMH-2	√	√	√
3	GMH-3	√	√	√
4	GMH-4	√	√	√
5	GMH-8	√	√	√
6	GMH-9	√	√	√
7	GMH-11	√	√	√
8	GMH-17	√	√	√
9	GMH-18	√	√	√
10	GMH-20	√	√	√
11	GMH-36	√	√	√
12	NGMH-1	√	√	√

4.3.2 Data *Drill Stem Test* (DST)

Drill Stem Test (DST) adalah sebuah teknik yang digunakan dalam industri perminyakan untuk mengukur sifat-sifat reservoar bawah tanah saat proses pengeboran sumur minyak atau gas sedang berlangsung. Tujuan utama dari DST adalah untuk memperoleh data tentang tekanan, aliran, komposisi fluida reservoar, dan parameter lainnya di dalam sumur. Pada penelitian ini, data DST diperlukan untuk mengetahui jumlah kandungan minyak, gas, kondensat, dan CO_2 yang ada di setiap reservoar.

Laporan data *drill stem test* sama seperti yang ditampilkan pada **Gambar 25.** Data tersebut kemudian dilakukan inventarisasi dalam bentuk tabel seperti yang ditampilkan pada **Tabel 6.**



Gambar 25. Laporan data *drill stem test* (DST) pada salah satu sumur.

4.3.3 Data *Marker*

Data *marker* berisi informasi kedalaman lapisan batuan atau formasi yang terdapat di area penelitian. Data ini digunakan dalam menentukan batas atas lapisan (*top structure*) dan batas bawah (*base structure*) dari zona – zona yang terdapat pada suatu formasi. Formasi yang menjadi target penelitian ini adalah Formasi *Lower* Talangakar (LTAF) pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* (CSTL-DLT), *fluvial-meandering* (FLV-MDR), dan *fluvial-braided* (FLV-BRD). Komponen data marker yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 5.**

Tabel 5. Informasi batasan lapisan pengendapan pada formasi *Lower* Talangakar.

No	Sumur	Interval		
		CSTL-DLT (Ft)	FLV-MDR (Ft)	FLV-BRD (Ft)
1	GMH-1	5422.38	5801.61	6054.34
2	GMH-2	5485.57	5796.18	6057.09
3	GMH-3	5691.61	6024.12	6216.42
4	GMH-4	5532.2	5826.33	6035.16

No	Sumur	Interval		
		CSTL-DLT (Ft)	FLV-MDR (Ft)	FLV-BRD (Ft)
5	GMH-8	5641.98	5945.77	6154.54
6	GMH-9	5668.68	6005.41	6225.03
7	GMH-11	5741.06	6172.46	6433.43
8	GMH-17	5682.66	6043.3	6341.62
9	GMH-18	5712.48	6116.58	6402.25
10	GMH-20	5777.56	6252.15	6469.05
11	GMH-25	5547.08	5869.85	6067.77
12	GMH-36	5604.02	5918.65	6135.56
13	NGMH-1	5677.88	6120.27	6362.01

4.4 Prosedur Penelitian

Secara umum pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari tiga bagian. Pertama, analisis Aproksimasi *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO dan pembuatan kerangka pemodelan yang terdiri dari 12 Aproksimasi AVO/AVA. Kedua, inventarisasi dan pengolahan data, dimana pada proses ini dilakukan pengolahan data kecepatan gelombang primer (Vp), kecepatan gelombang sekunder (Vs), dan densitas (ρ) reservoar hidrokarbon batupasir yang tersaturasi *impurities* karbondioksida yang berasal dari kombinasi data *well logging* dan *drill stem test* menggunakan kerangka pemodelan yang telah dibuat. Ketiga, analisis sensitivitas dan pengelompokan kelas AVO/AVA.

4.4.1 Analisis Aproksimasi dan Pembuatan Kerangka Pemodelan

Tahapan pertama yang dilakukan adalah melakukan analisis setiap aproksimasi untuk mengetahui persamaan dan perbedaan pada setiap aproksimasi. Kemudian, membuat kerangka pemodelan setiap aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO) menggunakan *software* Microsoft Excel. Kerangka pemodelan ini digunakan untuk *input* data yang diperlukan dalam melakukan *forward modelling* sehingga menghasilkan *output* berupa respon AVO pada setiap model data dan aproksimasi.

4.4.1.1 Analisis Aproksimasi

Pada tahap ini dilakukan studi literatur terhadap 12 Aproksimasi AVO/AVA yang telah dirangkum oleh Thomas *et al* (2016) yang ditunjukkan pada **Tabel 1.** Analisis

dilakukan dengan mempelajari setiap aproksimasi lalu dicari perbedaan parameter yang digunakan, lokasi penelitian, dan hasil penelitian.

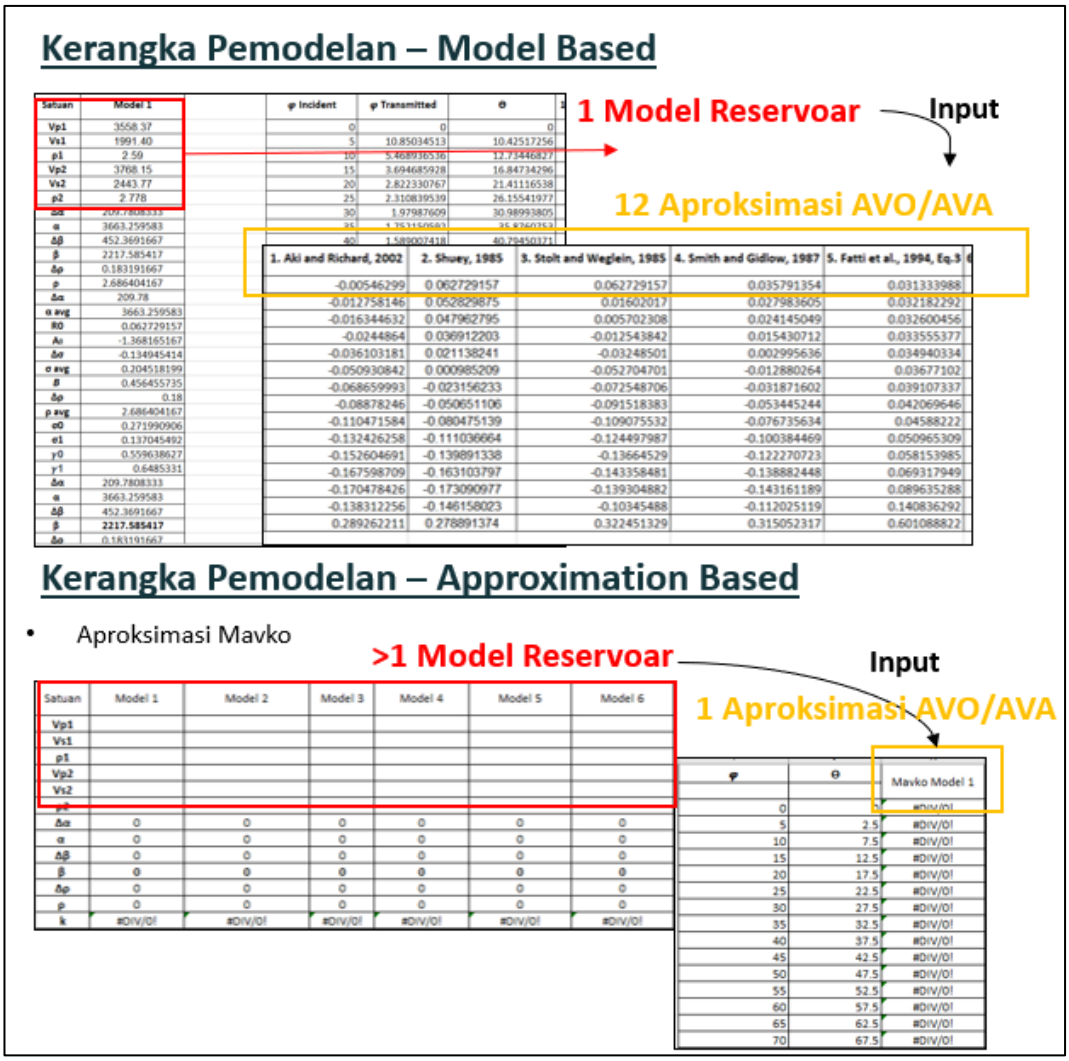
4.4.1.2 Pembuatan Kerangka Pemodelan

Setelah dilakukan analisis terhadap setiap aproksimasi. Tahapan berikut yang dilakukan adalah membuat kerangka pemodelan setiap aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO) menggunakan *software* Microsoft Excel. Kerangka pemodelan ini digunakan untuk *input* data sudut datang gelombang seismik, kecepatan gelombang primer (Vp), kecepatan gelombang sekunder (Vs), dan densitas (ρ) untuk dilakukan *forward modelling* sehingga menghasilkan *output* berupa respon AVO pada setiap model data dan aproksimasi.

Dalam membuat kerangka pemodelan diperlukan beberapa tahap yaitu:

1. *Input* Aproksimasi

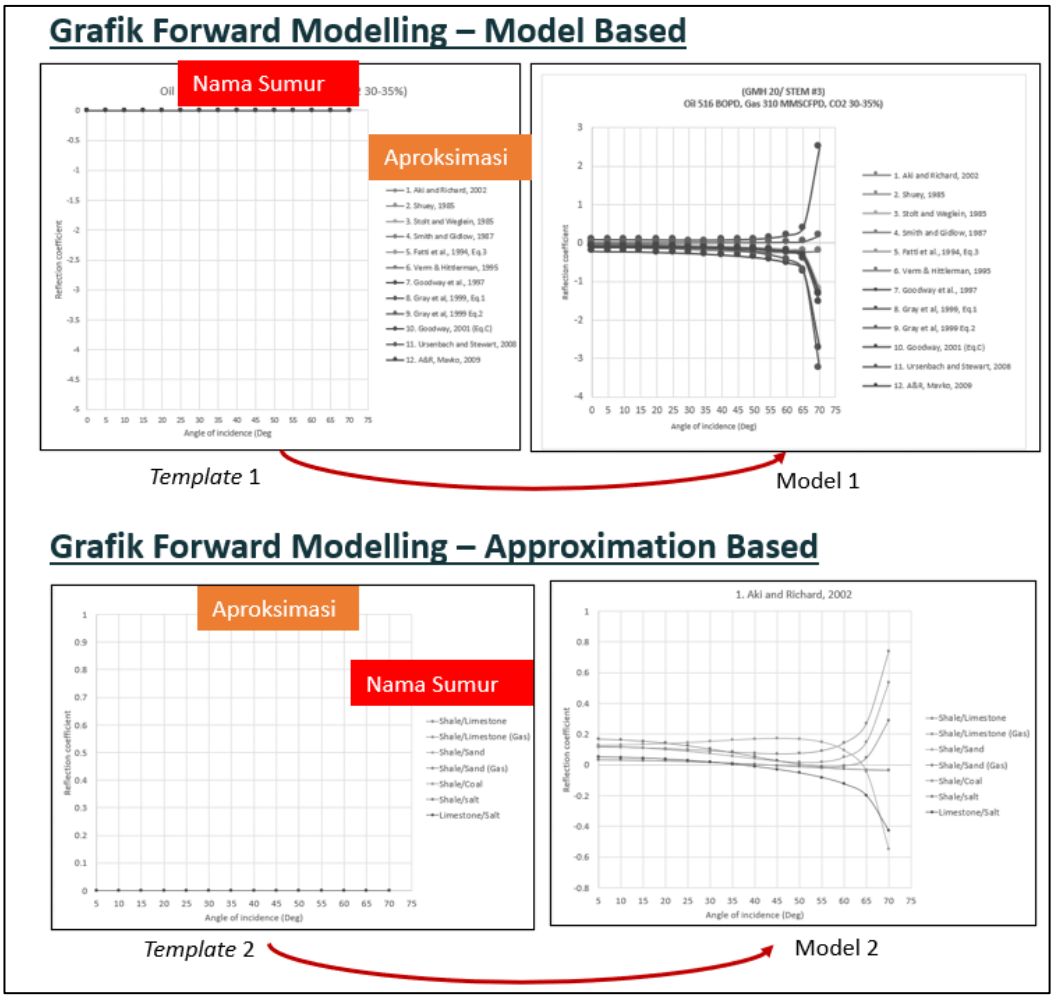
Pada tahap ini, setiap rumus Aproksimasi *Amplitude Variation with Offset/Angle* (AVO/AVA) dilakukan *input* pada *software* Microsoft Excel sesuai dengan parameter-parameter matematisnya. *Input* data dilakukan pada dua kerangka pemodelan. Pertama, kerangka pemodelan *model based*, yaitu kerangka pemodelan yang hanya menggunakan satu model lapisan batuan, tetapi model tersebut akan dibandingkan dengan semua aproksimasi, pemodelan seperti ini sama dengan yang dilakukan oleh Fathalian dan Innanen (2015) yang ditunjukkan pada **Gambar 23**. Kedua, kerangka pemodelan *approximation based*, pemodelan ini menggunakan lebih dari satu model lapisan batuan, tetapi menggunakan satu aproksimasi, sehingga pada pemodelan ini akan dibandingkan berdasarkan semua lapisan batuan, pemodelan seperti ini sama dengan yang dilakukan oleh Sarkar dan Svatek (1993) yang ditunjukkan pada **Gambar 22**.



Gambar 26. *Input* parameter aproksimasi pada kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based*.

2. Pembuatan *Template* Grafik *Forward Modelling*

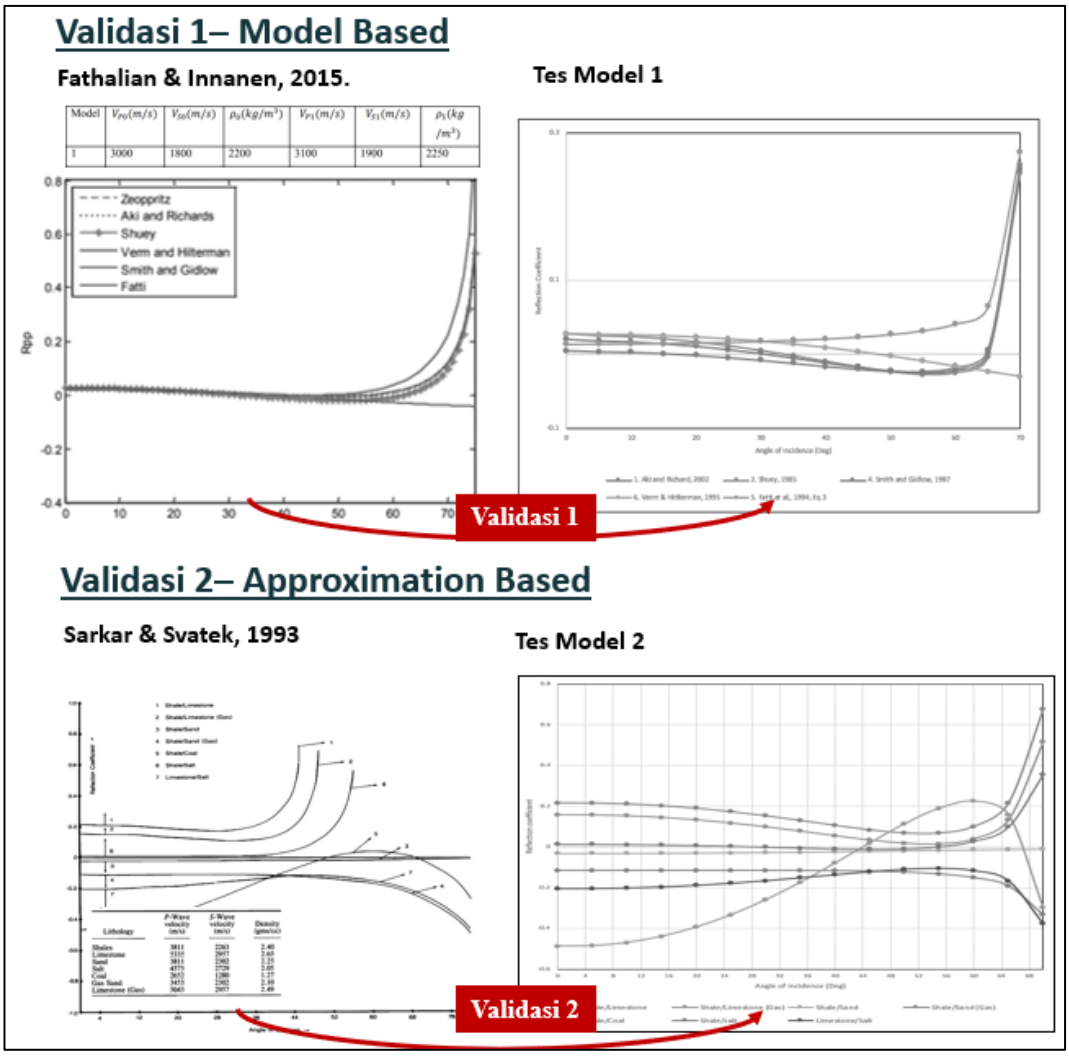
Grafik *forward modelling* data *Amplitude Variation with Offset* (AVO) dimodelkan dengan sumbu x sebagai sudut data gelombang dan sumbu y sebagai koefisien refleksi dari sudut datang gelombang. Kombinasi sumbu x dan sumbu y tersebut menggambarkan bagaimana sifat amplitudo seismik pada masing-masing sudut datang gelombang.



Gambar 27. *Template* grafik *forward modelling* besertanya hasil pemodelannya untuk kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based*.

3. Validasi Kerangka Pemodelan

Untuk memastikan kebenaran *input* aproksimasi dan hasil *forward modelling* pada kerangka pemodelan maka dilakukan validasi. Untum melakukan validasi kerangka pemodelan *model based* maka dilakukan *input data* sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fathalian dan Innanen (2015) sedangkan untuk validasi kerangka pemodelan *approximation based* dilakukan *input data* sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Sarkar dan Svatek (1993). Kerangka pemodelan dianggap benar, apabila pola model yang dibuat memiliki karakterisitik yang sama atau mendekati sama dengan pola model pada penelitian mereka.



Gambar 28. Validasi kerangka pemodelan *model based* dan *approximation based*.

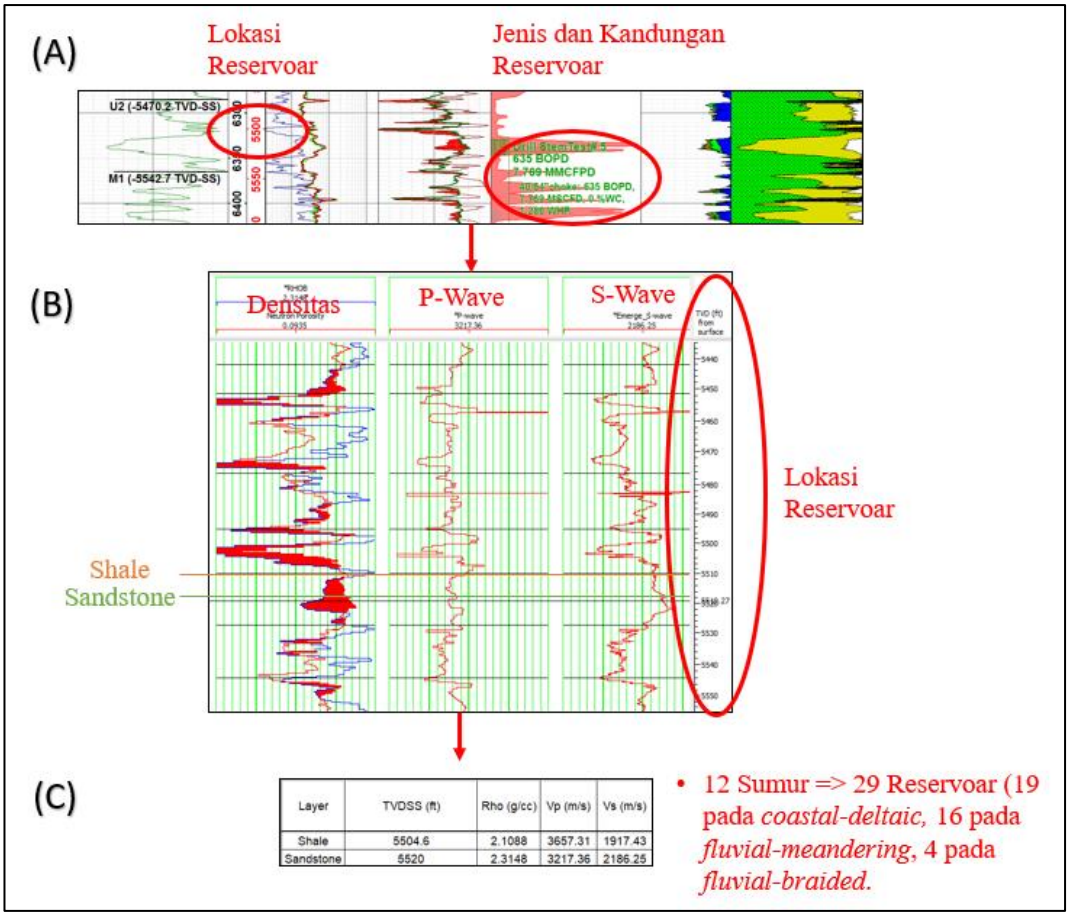
4.4.2 Inventarisasi dan Pengolahan Data

Secara umum, pengolahan data dilakukan dengan inventarisasi data kombinasi *drill stem test* dan *well log*ging lalu dilakukan *input* data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) pada lapisan atas (*shale*) dan lapisan bawah (*sandstone*) suatu bidang batas reservoar ke dalam kerangka pemodelan 12 aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO) kemudian dilakukan *forward modelling*.

4.4.2.1 Inventarisasi Data

Pada tahap ini, data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) pada lapisan atas (*shale*) dan lapisan bawah (*sandstone*) diambil

dari kombinasi data *well logging* menggunakan *software* Hampson-Russell dan data laporan *drill stem test*. Data laporan *drill stem test* digunakan untuk menunjukkan lokasi dan informasi reservoar seperti jenis reservoar dan jumlah kandungan zat kimia yang ada termasuk CO_2. Hasil kombinasi dari kedua data tersebut dapat dilihat pada **Tabel 7. Tabel 8.** Dan **Tabel 9.** Dapat dilihat pada tabel tersebut bahwa parameter kecepatan gelombang primer (Vp) memiliki nilai yang paling besar dibandingkan kecepatan gelombang sekunder (Vs) dan densitas. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter kecepatan gelombang primer akan berperan sangat besar terhadap hasil perhitungan koefisisen refleksi nantinya.



Gambar 29. Alur inventarisasi data kecepatan gelombang p, kecepatan gelombang s, dan densitas dari kombinasi (a) data *drill stem test* dan (b) data *well logging*.

Tabel 6. Data *drill stem test* (DST) pada setiap sumur.

No	Sumur	*Drill Stem Test* (DST)						INTERVAL
		No Reservoar	Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)	
1	GMH-1	1	#STEM 5	804	10.308		7	CSTL-DLT
2	GMH-3	2	#STEM 3		8.921	812	10	CSTL-DLT
3	GMH-4	3	#7		3.804	190	9	CSTL-DLT
		4	#4		7.139	411	13	CSTL-DLT
		5	#5		2.488	264	15	CSTL-DLT
		6	#STEM 3		3.996	426	26	FLV-MDR
		7	#3		7.126	407	37	FLV-MDR
		8	#STEM 2		6.688	401	58	FLV-MDR
		9	#6		3.12	111	55	FLV-MDR
		10	#STEM 1	1591	3.12	111	55	FLV-BRD
4	GMH-8	11	#STEM 3		2.943	330	9	CSTL-DLT
		12	#STEM 2	48	0.088		8	FLV-MDR
		13	#STEM 1		3.076	224	8	FLV-BRD
5	GMH-9	14	#STEM 1		5.705	172	25	FLV-MDR
		15	#STEM 2	406	8.85		28	FLV-MDR
6	GMH-11	16	#STEM 2	548	0.37		15	CSTL-DLT

No	Sumur	*Drill Stem Test* (DST)						INTERVAL
		No Reservoar	**Nama Tes**	**Oil (BOPD)**	**Gas (MMSCFPD)**	**Cond. (BCPD)**	**CO2 (%)**	
		17	#1	*Well would not flow.*	*Well would not flow.*	*Well would not flow.*	5 - 30	CSTL-DLT
7	GMH-17	18	#5		1.52	78	3	CSTL-DLT
		19	#4		2.88	295	8	FLV-MDR
		20	STEM #3	440	0.33		10	FLV-MDR
8	GMH-18	21	#2		1.85	37	5	CSTL-DLT
		22	#1				8	FLV-MDR
9	GMH-20	23	#4		430	5	15	CSTL-DLT
		24	STEM #3	516	310		30-35	CSTL-DLT
10	GMH-36	25	STEM #3				37	FLV-MDR
11	NGMH-1	26	#6		12.12	601	19.5	CSTL-DLT
		27	STEM #8				45	CSTL-DLT
		28	#5		10	228	40	CSTL-DLT
		29	#4		0.71	11	57.8	FLV-MDR

Tabel 7. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*.

No	Sumur	*Drill Stem Test*					INTERVAL	Layer	TVDSS (ft)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Rho (g/cc)
		Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)						
1	GMH-1	#STEM 5	804	10.308		7	CSTL-DLT	Shale	5504.6	3657.31	1917.43	2.1088
								Sandstone	5520	3217.36	2186.25	2.3148
2	GMH-3	#STEM 3		8.921	812	10	CSTL-DLT	Shale	5760.4	3498.94	1466.76	1.656
								Sandstone	5775.55	3408.67	2172.26	2.158
3	GMH-4	#7		3.804	190	9	CSTL-DLT	Shale	5617.17	3806.67	1934.8	2.49
								Sandstone	5625.48	3203.6	2041.54	2.214
		#4		7.139	411	13	CSTL-DLT	Shale	5682.9	3802.96	2076.58	2.608
								Sandstone	5689.7	3562	2204.72	2.316
		#5		2.488	264	15	CSTL-DLT	Shale	5753.92	3022.43	1592.14	2.416
								Sandstone	5761.85	3246.32	2028.86	2.213
4	GMH-8	#STEM 3		2.943	330	9	CSTL-DLT	Shale	5835.57	3362.94	1839.69	2.628
								Sandstone	5850.22	3167.41	2099.25	2.281
6	GMH-11	#STEM 2	548	0.37		15	CSTL-DLT	Shale	5898.32	3385.69	2113.28	2.4016
								Sandstone	5906.13	3205.11	2074.3	2.328
		#1	*Well would not flow.*	*Well would not flow.*	*Well would not flow.*	5 - 30	CSTL-DLT	Shale	6051.98	3974.29	2378.75	2.641
								Sandstone	6066.83	3784.74	2377.61	2.4528
7	GMH-17	#5		1.52	78	3	CSTL-DLT	Shale	5975.37	4054.84	2124.08	2.5751
								Sandstone	5987.65	3685.05	2311.19	2.2226

No	Sumur	*Drill Stem Test*					INTERVAL	Layer	TVDSS (ft)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Rho (g/cc)
		Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)						
8	GMH-18	#2		1.85	37	5	CSTL-DLT	Shale	5958.9	3785.6	1897.34	2.6787
								Sandstone	5968.25	3620.23	2104.24	2.3586
9	GMH-20	#4		430	5	15	CSTL-DLT	Shale	5804.18	3978.31	2476.09	2.5818
								Sandstone	5810.31	3141.32	2092.6	2.337
		STEM #3	516	310		30-35	CSTL-DLT	Shale	5955.23	3383.76	2033.17	2.6193
								Sandstone	5962.36	3236.8	2042.46	2.2834
11	NGMH-1	#6		12.12	601	19.5	CSTL-DLT	Shale	5827.85	3340.27	1661.78	2.741
								Sandstone	5857.02	3189.42	2403.83	2.125
		STEM #8				45	CSTL-DLT	Shale	5947.39	3567.04	1827.98	2.726
								Sandstone	5958.33	3467.93	2468.27	2.217
		#5		10	228	40	CSTL-DLT	Shale	6022.39	4181.07	2332.21	2.713
								Sandstone	6044.79	3476.44	2624.29	2.243

Tabel 8. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering*.

No	Sumur	*Drill Stem Test*					INTERVAL	Layer	TVDSS (ft)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Rho (g/cc)
		Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)						
1	GMH-4	#STEM 3		3.996	426	26	FLV-MDR	Shale	5826.07	4063.65	2112.11	2.594
								Sandstone	5845.33	3211.06	2095.22	2.294
		#3		7.126	407	37	FLV-MDR	Shale	5908.04	3297.1	1716.14	2.636
								Sandstone	5925.41	3377.29	2106.71	2.279
		#STEM 2		6.688	401	58	FLV-MDR	Shale	5980.94	3050.25	2056.71	2.615
								Sandstone	5993.41	3250.65	2046.92	2.307
		#6		3.12	111	55	FLV-MDR	Shale	6003.23	4014.54	2185.11	2.571
								Sandstone	6012.67	3273.48	2032.3	2.267
2	GMH-8	#STEM 2	48	0.088		8	FLV-MDR	Shale	6073.36	3478.78	2038.83	2.555
								Sandstone	6094.45	2938.11	1992.86	2.378
3	GMH-9	#STEM 1		5.705	172	25	FLV-MDR	Shale	6043.53	3197.34	1601.81	2.5905
								Sandstone	6057.9	3659.73	2395.33	2.325
		#STEM 2	406	8.85		28	FLV-MDR	Shale	6138.45	3776.43	2120.34	2.4985
								Sandstone	6154.77	3681.68	2436.47	2.3263
4	GMH-17	#4		2.88	295	8	FLV-MDR	Shale	6042.3	3400.1	1730.06	2.6118
								Sandstone	6053.62	3768.15	2443.77	2.778
		STEM #3	440	0.33		10	FLV-MDR	Shale	6065.65	3948.47	2224.51	2.5393
								Sandstone	6075.27	3664.32	2276.77	2.2598
5	GMH-18	#1				8	FLV-MDR	Shale	6118.15	3892.4	2042.57	2.6767
								Sandstone	6123.58	3658.04	2142.14	2.2655

No	Sumur	*Drill Stem Test*					INTERVAL	Layer	TVDSS (ft)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Rho (g/cc)
		Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)						
6	GMH-36	STEM #3				37	FLV-MDR	Shale	5992.46	2580.9	1852.59	2.6179
								Sandstone	6007.29	3694.22	2272.88	2.3046
7	NGMH-1	#4		0.71	11	57.8	FLV-MDR	Shale	6185.17	4000.47	2216.03	2.632
								Sandstone	6196.36	3586.3	2305.06	2.375

Tabel 9. Inventarisasi data kecepatan gelombang p, gelombang s, dan densitas pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*.

No	Sumur	*Drill Stem Test*					INTERVAL	Layer	TVDSS (ft)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Rho (g/cc)
		Nama Tes	Oil (BOPD)	Gas (MMSCFPD)	Cond. (BCPD)	CO2 (%)						
1	GMH-4	#STEM 1	1591	3.12	111	55	FLV-BRD	Shale	6035.72	3813.72	2088.78	2.55
								Sandstone	6050.45	3428.84	2276.37	2.231
2	GMH-8	#STEM 1		3.076	224	8	FLV-BRD	Shale	6167.64	3331.73	1853.26	2.542
								Sandstone	6175.87	3531.5	2509.31	2.226

4.4.2.2 Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data dilakukan *input data*, *forward modelling*, dan pengelompokan data.

1. *Input* Data

   Pada tahap ini, data kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), dan densitas (ρ) pada lapisan atas (*shale*) dan lapisan bawah (*sandstone*) dilakukan *input* ke dalam kerangka pemodelan aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO). Untuk data pada lapisan atas (*shale*) digunakan nilai rerata, sedangkan untuk data pada lapisan bawah (*sandstone*) digunakan nilai asli, hal ini dilakukan untuk mendapatkan respon *sandstone* yang lebih sensitif.

(a) Sebelum *Input Data*

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Water		Tanpa CO2		Tersaturasi Karbondioksida		
2	Satuan	1. GMH-1 #A	2. GMH-2 #A	1. GMH-1 #3	2. GMH-25 #4	1. GMH-17 / #5	2. GMH-18 / #2	3. GMH-1/ #STEM 5
3								
4	Vp1							
5	Vs1							
6	ρ1							
7	Vp2							
8	Vs2							
9	ρ2							
10	Δα	0	0	0	0	0	0	0
11	α	0	0	0	0	0	0	0
12	Δβ	0	0	0	0	0	0	0
13	β	0	0	0	0	0	0	0
14	Δρ	0	0	0	0	0	0	0
15	ρ	0	0	0	0	0	0	0

(b) Setelah *Input Data*

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Water		Tanpa CO2		Tersaturasi Karbondioksida		
2	Satuan	1. GMH-1 #A	2. GMH-2 #A	1. GMH-1 #3	2. GMH-25 #4	1. GMH-17 / #5	2. GMH-18 / #2	3. GMH-1/ #STEM 5
3								
4	Vp1	3502.2	3063.3	3000.83	3467.83	3653.47	3653.47	3653.47
5	Vs1	1567.45	1660.94	1754.29	1859.38	1978.14	1978.14	1978.14
6	ρ1	2.529	2.3713	2.4272	2.464	2.51	2.51	2.51
7	Vp2	3162.91	2943.13	2845.94	3514.33	3685.05	3620.23	3217.36
8	Vs2	1800.18	1637.19	1806.81	2146.88	2311.19	2104.24	2186.25
9	ρ2	2.3437	2.2803	2.201	2.3526	2.2226	2.3586	2.3148
10	Δα	-339.29	-120.17	-154.89	46.5	31.57533333	-33.24466667	-436.1146667
11	α	3332.555	3003.215	2923.385	3491.08	3669.262333	3636.852333	3435.417333
12	Δβ	232.73	-23.75	52.52	287.5	333.0513333	126.1013333	208.1113333
13	β	1683.815	1649.065	1780.55	2003.13	2144.664333	2041.189333	2082.194333
14	Δρ	-0.1853	-0.091	-0.2262	-0.1114	-0.28302	-0.14702	-0.19082
15	ρ	2.43635	2.3258	2.3141	2.4083	2.36411	2.43211	2.41021

Gambar 30. *Input data* kecepatan gelombang p, kecepatan gelombang s, dan densitas setiap reservoar ke masing-masing aproksimasi.

2. *Forward Modelling*

Setelah data dilakukan *input*, maka data tersebut kemudian akan dihitung sesuai dengan kerangka pemodelan yang telah dibuat sehingga menghasilkan nilai *forward modelling* koefisien refleksi pada sudut datang gelombang seismik 0-70^0. Kemudian hasil perhitungan tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik *forward modelling*.

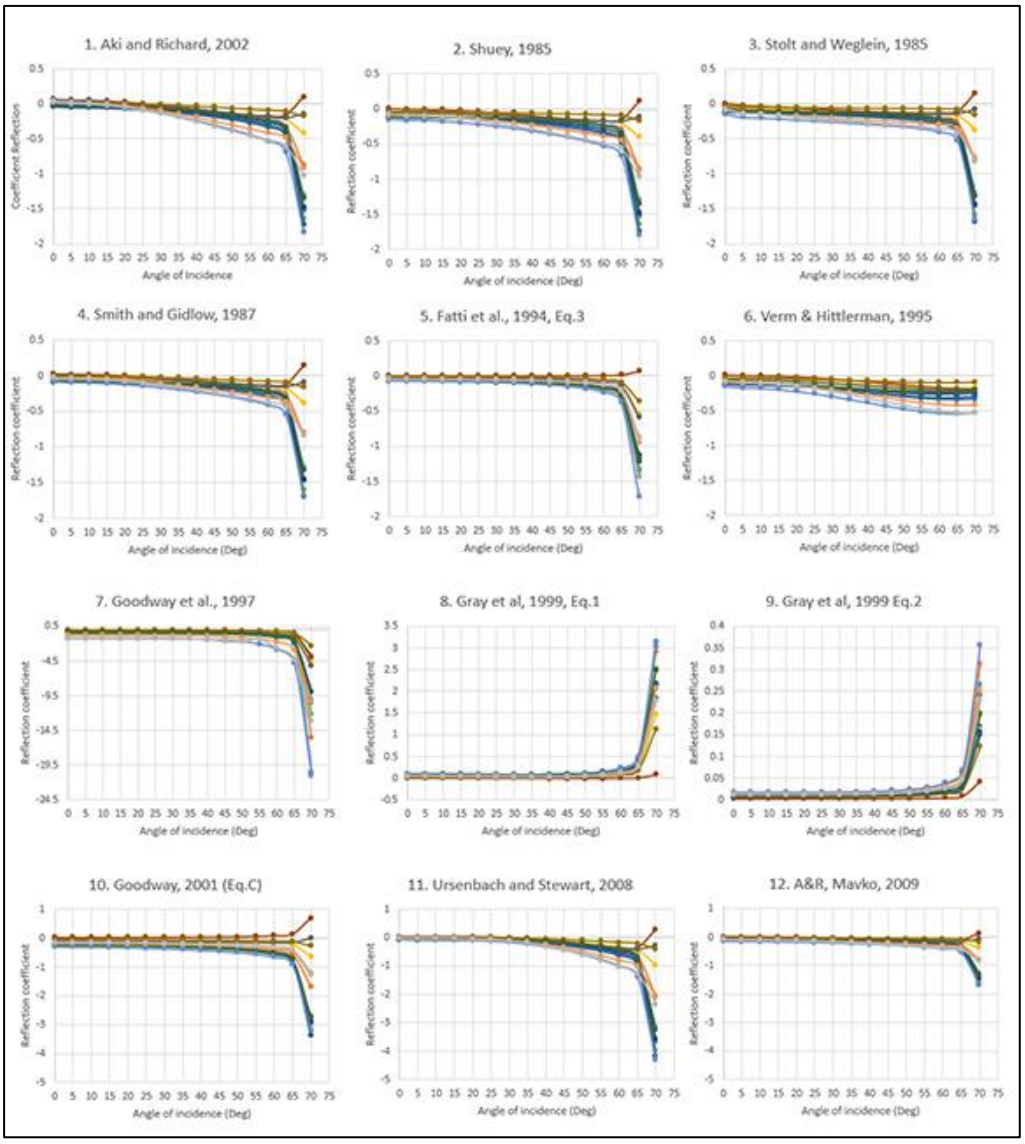
φ Incident	φ Transmitted		φ Transmitted		φ Transmitted		
	1. GMH-1 #A	2. GMH-2 #A	1. GMH-1 #3	2. GMH-25 #4	1. GMH-17 / #5	2. GMH-18 / #2	3. GMH-1/ #STEM 5
0	0	0	0	0	0	0	0
5	12.7176435	11.95616031	12.11195612	11.33663249	11.39006551	11.59348297	13.04178128
10	6.40273499	6.021801585	6.099725622	5.712008826	5.738722791	5.840430805	6.564930882
15	4.317375678	4.063206191	4.115184361	3.856648908	3.874454938	3.942258073	4.425648921
20	3.289504981	3.098650381	3.137664288	2.943705725	2.957056242	3.007904609	3.370862762
25	2.684738054	2.531813121	2.56305615	2.407831603	2.418507421	2.459180814	2.749986927
30	2.291632698	2.163934923	2.190005422	2.060587644	2.069479352	2.10336869	2.346181328
35	2.019585093	1.909840486	1.932226073	1.821215919	1.828833081	1.857878797	2.066531658
40	1.823305051	1.726945297	1.746580043	1.649333064	1.655995401	1.681415202	1.864595933
45	1.677643323	1.591593164	1.609105776	1.522496544	1.528419143	1.551032325	1.714588984
50	1.567525712	1.48959434	1.505432772	1.427234184	1.432570325	1.452960741	1.601059454
55	1.483381801	1.411928912	1.426428778	1.354971023	1.359835735	1.378441386	1.514201636
60	1.418864421	1.35260386	1.366028686	1.299998395	1.30448234	1.321648181	1.447516396
65	1.369627674	1.307505548	1.320071776	1.258387187	1.262565306	1.278576087	1.396557551
70	1.3326355	1.273751316	1.285644469	1.227374698	1.231311796	1.246413295	1.35822223

				θ		
1. GMH-1 #A	2. GMH-2 #A	1. GMH-1 #3	2. GMH-25 #4	9 GMH-17 / #5	10 GMH-18 / #2	1 GMH-1/ #STEM 5
0	0	0	0	0	0	0
11.35882175	10.97808015	11.05597806	10.66831624	10.69503275	10.79674148	11.52089064
13.2013675	13.01090079	13.04986281	12.85600441	12.8693614	12.9202154	13.28246544
17.15868784	17.0316031	17.05759218	16.92832445	16.93722747	16.97112904	17.21282446
21.64475249	21.54932519	21.56883214	21.47185286	21.47852812	21.5039523	21.68543138
26.34236903	26.26590656	26.28152808	26.2039158	26.20925371	26.22959041	26.37499346
31.14581635	31.08196746	31.09500271	31.03029382	31.03473968	31.05168435	31.17309066
36.00979255	35.95492024	35.96611304	35.91060796	35.91441654	35.9289394	36.03326583
40.91165253	40.86347265	40.87329002	40.82466653	40.8279977	40.8407076	40.93229797
45.83882166	45.79579658	45.80455289	45.76124827	45.76420957	45.77551616	45.85729449
50.78376286	50.74479717	50.75271639	50.71361709	50.71628516	50.72648037	50.80052973
55.7416909	55.70596446	55.71321439	55.67748551	55.67991787	55.68922069	55.75710082
60.70943221	60.67630193	60.68301434	60.6499992	60.65224117	60.66082409	60.7237582
65.68481384	65.65375277	65.66003589	65.62919359	65.63128265	65.63928804	65.69827878
70.66631775	70.63687566	70.64282223	70.61368735	70.6156559	70.62320665	70.67911111

Forward Modelling Aproksimasi		
5. GMH-17 / #5	6. GMH-18 / #2	7. GMH-1/ #STEM 5
[Gas 1.52 MMSCFPD, Cond 78 BCPD, CO2 3%]	[Gas 1.85 MMSCFPD, Cond 37 BCPD, CO2 5%]	[Oil 804 BOPD, Gas 10.388 MMSCFPD, CO2 7%]
0.064160302	0.025654257	-0.023887555
0.054068046	0.021376353	-0.03474297
0.049550735	0.019529041	-0.038035532
0.038877635	0.015094493	-0.048111372
0.023587942	0.00873074	-0.062313066
0.004000367	0.000564641	-0.080685685
-0.019568595	-0.009289599	-0.103055738
-0.046626693	-0.020660959	-0.129384178
-0.076403626	-0.033289644	-0.159581804
-0.107754873	-0.046807947	-0.193742717
-0.139059376	-0.0607452	-0.232538347
-0.168003859	-0.074603228	-0.278508733
-0.19165266	-0.088200573	-0.340949168
-0.203808159	-0.103719866	-0.464754133
[illegible]	[illegible]	[illegible]

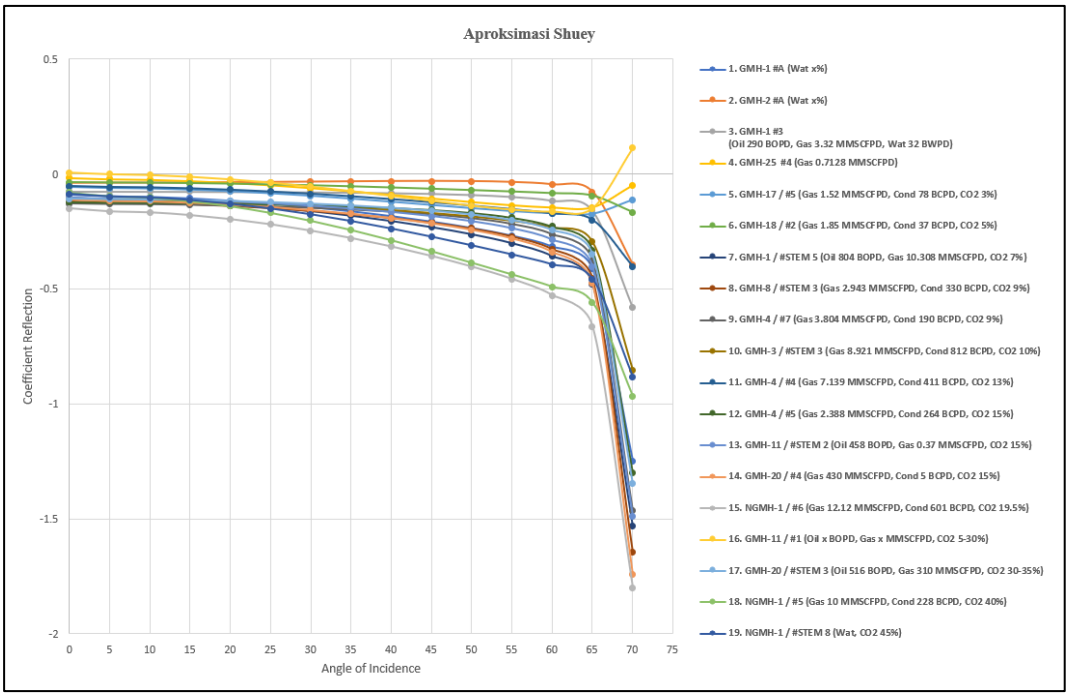
Gambar 31. Contoh perhitungan salah satu aproksimasi AVO/AVA pada beberapa reservoar.

.

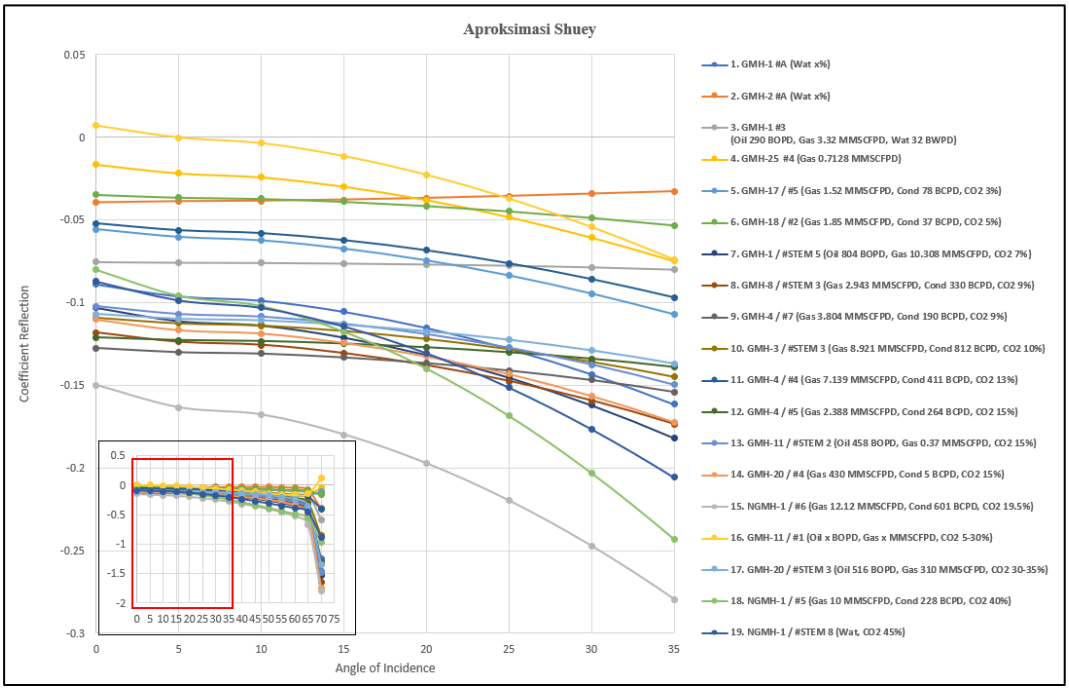


Gambar 32. *Forward modelling* 12 aproksimasi AVO/AVA dengan data beberapa reservoar.

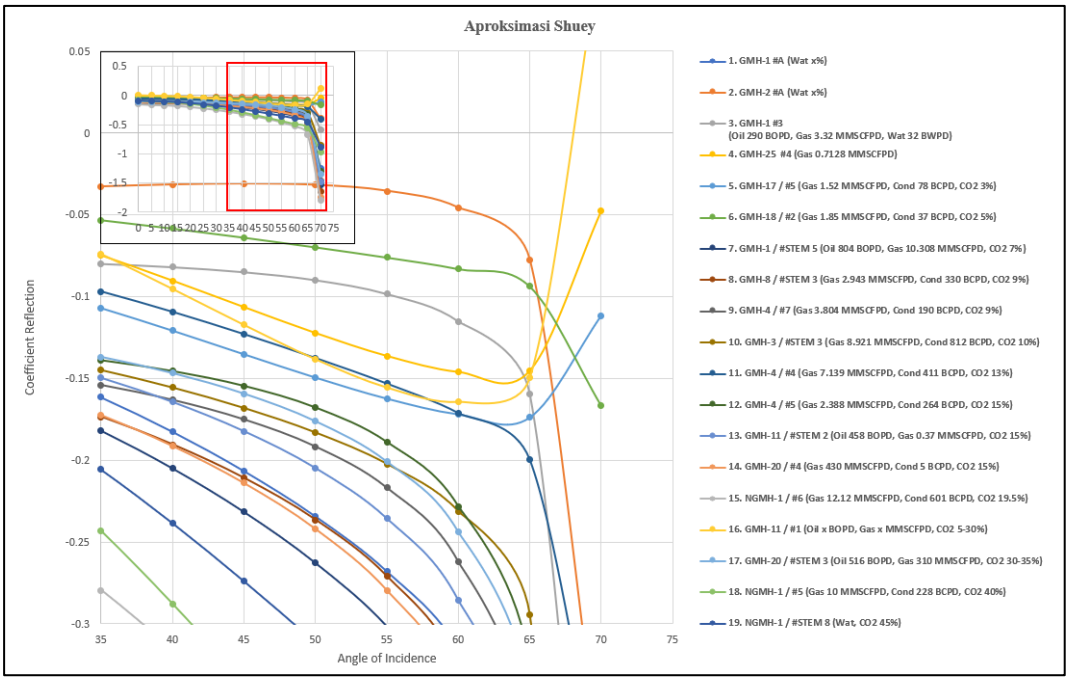
Kemudian, hasil *forward modelling* di setiap Aproksimasi AVO/AVA ditampilkan dalam tiga tampilan sudut datang gelombang seismik yaitu 0-70^0, 0-35^0, dan 35-70^0.



Gambar 33. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $0\text{-}70^0$.



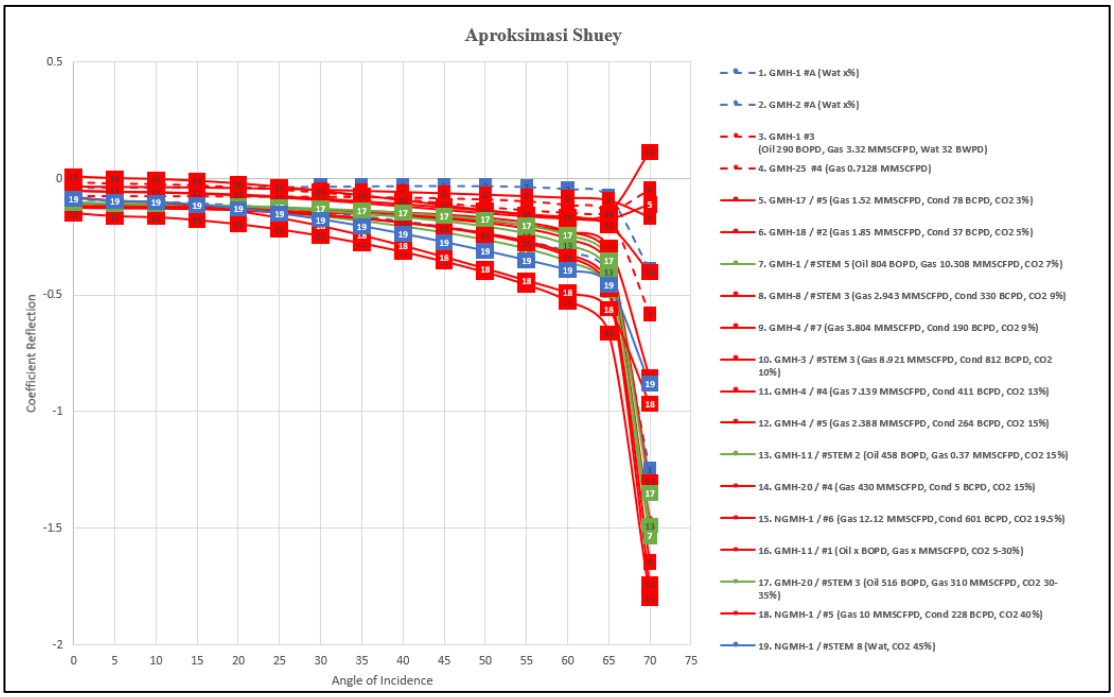
Gambar 34. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang $0\text{-}35^0$.



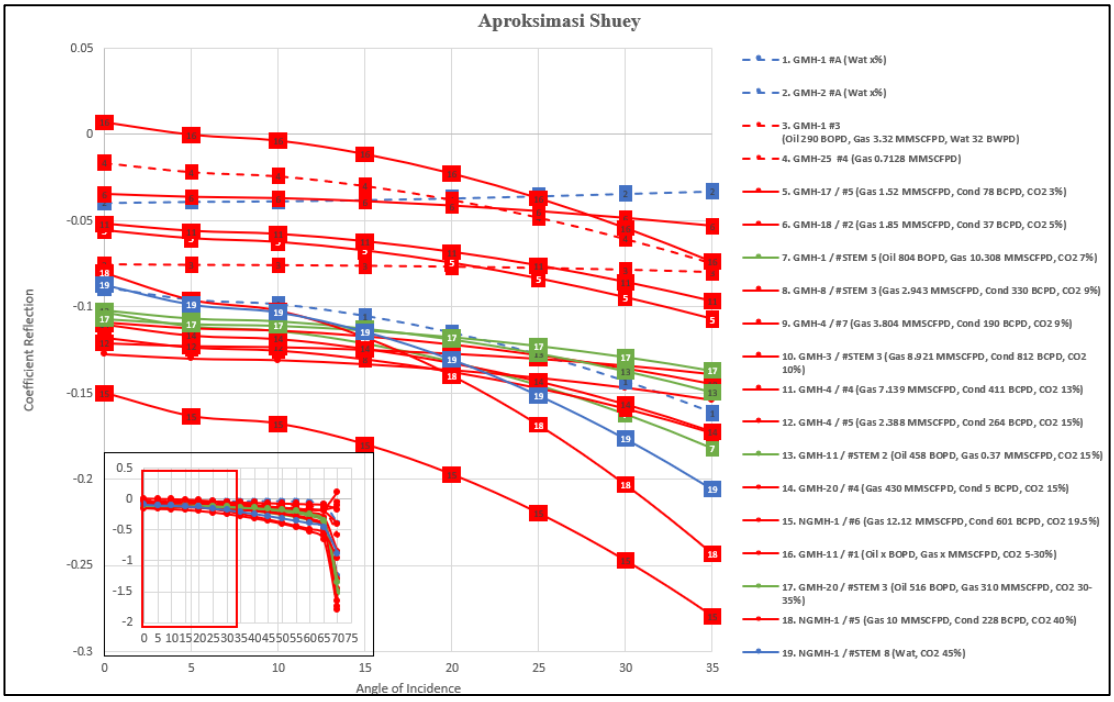
Gambar 35. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 35-70^0.

3. Pengelompokan Data

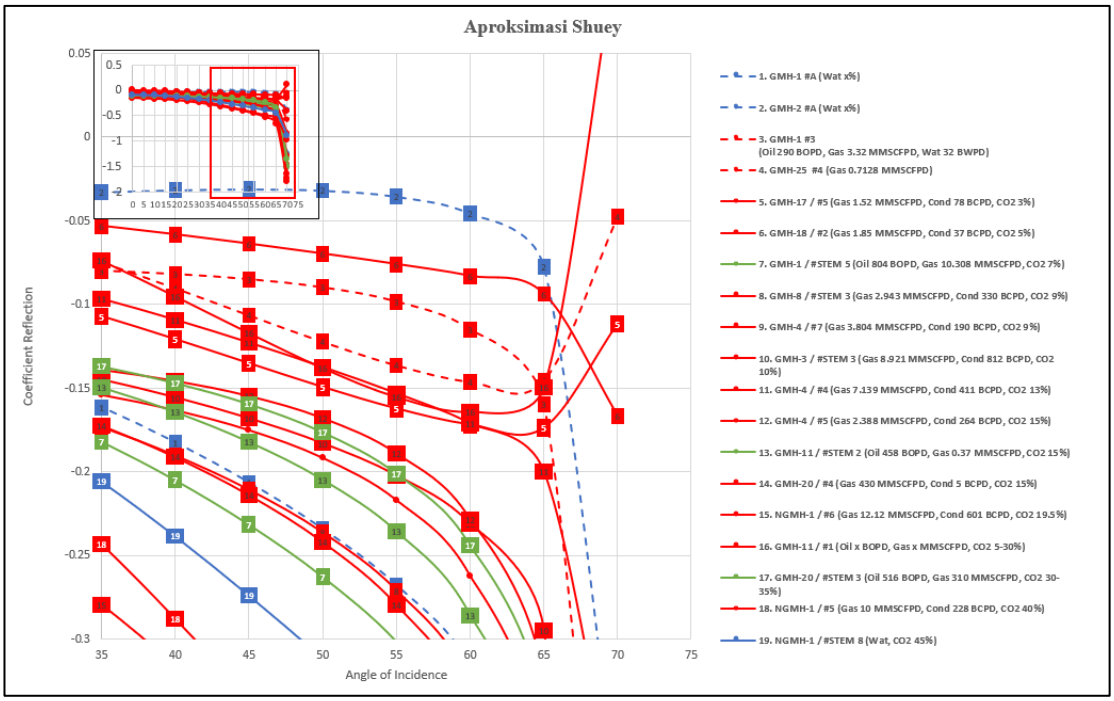
Untuk memudahkan dalam analisis sensitivitas setiap reservoar. Maka, perlu dilakukan pengelompokan data. Pada tahap ini, hasil *forward modelling* 12 aproksimasi *Amplitude Variation with Offset* (AVO) dikelompokkan berdasarkan lingkungan pengendapan dan kandungan reservoar. Reservoar yang mengandung CO_2 ditandai dengan garis lurus sedangkan reservoar yang tidak mengandung CO_2 ditandai dengan garis putus-putus. Kemudian, reservoar gas ditandai dengan garis berwarna merah, reservoar minyak ditandai dengan garis berwarna hijau, dan reservoar air ditandai dengan garis berwarna biru. Kemudian, penomoran reservoar diurutkan dari terkecil hingga terbesar menggambarkan besaran kandungan CO_2 pada setiap reservoar dan untuk penomoran dengan angka berwarna putih menunjukkan nilai minimum dan maksimum dari kandungan CO_2. Pengelompokan ini dilakukan untuk memudahkan tahapan selanjutnya yaitu tahapan analisis.



Gambar 36. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 0-70^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan.



Gambar 37. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 0-35^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan.



Gambar 38. Contoh *forward modelling* Aproksimasi Shuey untuk sudut datang 35-70^0 pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* yang telah dikelompokkan.

4.4.3 Analisis Sensitivitas dan Pengelompokan Kelas AVO/AVA

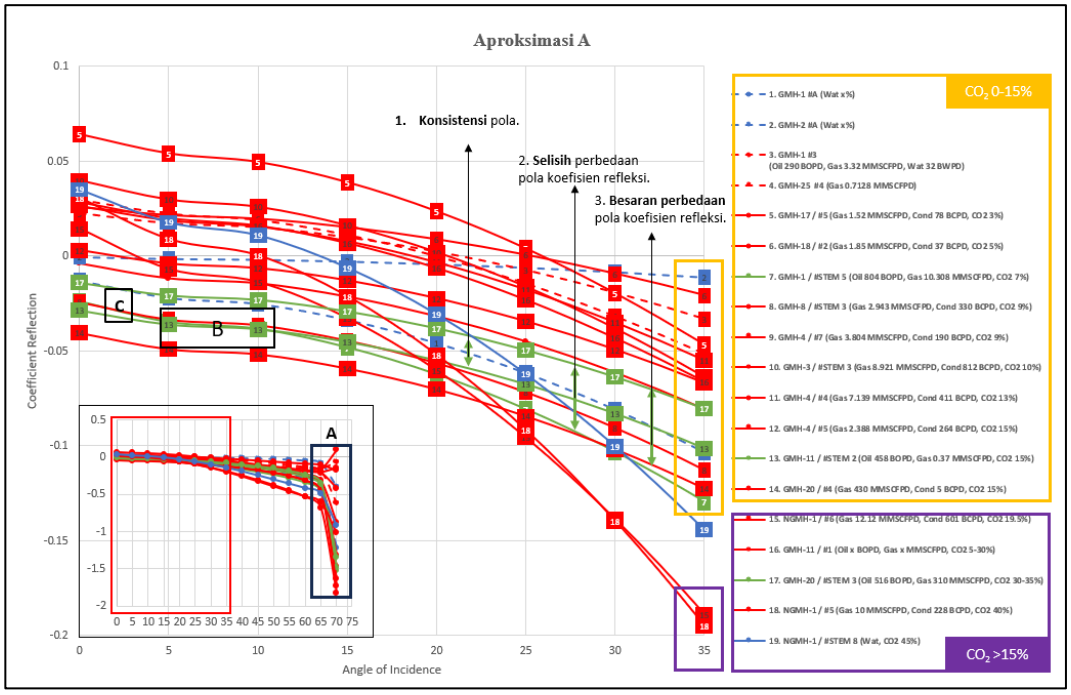
4.4.3.1 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis secara kualitatif dilakukan dengan pengamatan terhadap pola koefisien refleksi atau amplitudo sepanjang perubahan sudut datang gelombang. Sedangkan, analisis secara kuantitatif dilakukan dengan mengamati selisih perbedaan koefisien refleksi pada simpangan terbesar.

1. Secara Kualitatif

   Dapat dilihat pada **Gambar 39.** Analisis secara kualitatif dilakukan dengan tiga tahapan. Pertama, dengan mengamati pola koefisien refleksi sepanjang perubahan sudut datang gelombang, apakah pola tersebut akan berubah secara konstan atau tidak. Kedua, dengan mengamati selisih perbedaan pola koefisien refleksi, sebagai contoh pada sudut datang gelombang antara 25-30^0 reservoar nomor 17, 3, dan 7 memiliki selisih perbedaan pola, berbeda dengan sudut datang gelombang antara 5-10^0 dimana reservoar nomor 13 dan 7 berhimpit.

Ketiga, pengamatan secara kualitatif mengenai besaran perbedaan pola koefisien refleksi, semakin besar gap antara reservoar satu dengan yang lain menunjukkan bahwa pada sudut datang gelombang tersebut, aproksimasi menunjukkan sifat yang sangat sensitif, sebagai contoh dapat dilihat perbedaan gap antara reservoar 17, 13, dan 7 pada sudut datang gelombang seismik 35^0.



Gambar 39. Analisis sensitivitas aproksimasi AVO/AVA secara kualitatif.

2. Secara Kuantitatif

Dari hasil pengamatan secara kualitatif, maka akan didapatkan beberapa aproksimasi yang memiliki sifat sensitif terhadap reservoar hidrokarbon yang tersaturasi *impurities*. Untuk menguatkan hipotesis dari pengamatan kualitatif, maka dilakukan perhitungan selisih gap antar masing-masing reservoar yang pada pengamatan kualitatif memiliki gap perbedaan. Sebagai contoh, pada Aproksimasi "A" tersebut pada sudut datang gelombang seismik 35^0 nilai sensitivitasnya 0.0724. Nilai ini didapatkan dari selisih nilai koefisien refleksi dari reservoar nomor 14 (GMH-20/#4) yang memiliki kandungan *impurities* 15% dan reservoar nomor 18 (NGMH-1/#5) dengan kandungan *impurities* karbondioksida sebesar 40%.

Tabel 10. Nilai koefisien refleksi Aproksimasi A pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*.

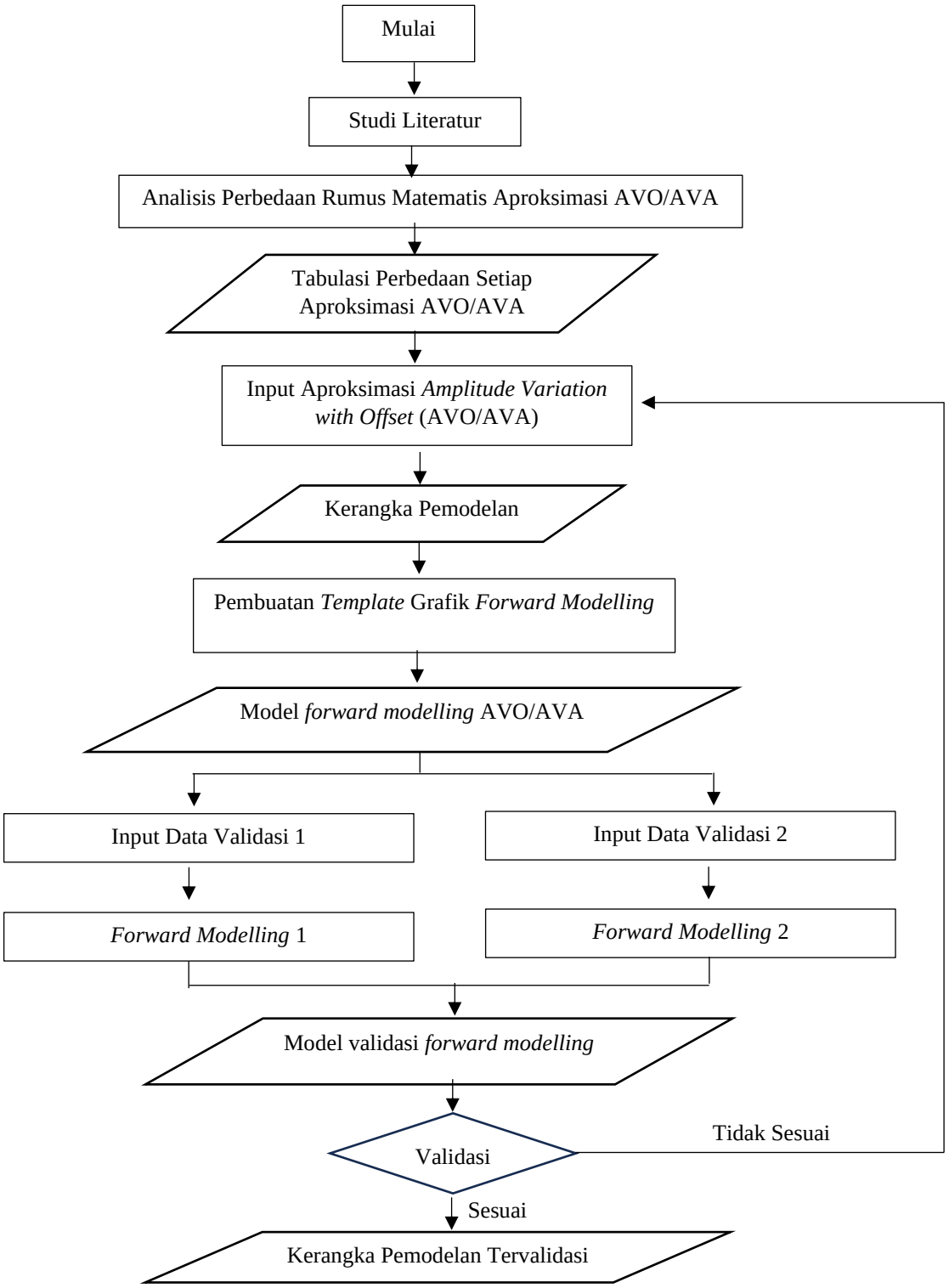
No	Nama Reservoar	Aproksimasi A							
		Koefisien Refleksi Pada *Angle of Incidence* Tertentu							
		0^0	5^0	10^0	15^0	20^0	25^0	30^0	35^0
1	GMH-1 / #A	-0.0129	-0.0220	-0.0251	-0.0336	-0.0458	-0.0616	-0.0808	-0.1034
2	GMH-2 / #A	-0.0004	-0.0014	-0.0018	-0.0028	-0.0042	-0.0060	-0.0083	-0.0111
3	GMH-1 / #3	0.0224	0.0171	0.0150	0.0097	0.0022	-0.0076	-0.0194	-0.0333
4	GMH-25 / #4	0.0298	0.0224	0.0191	0.0112	0.0000	-0.0144	-0.0317	-0.0515
5	GMH-17 / #5	0.0642	0.0541	0.0496	0.0389	0.0236	0.0040	-0.0196	-0.0466
6	GMH-18 / #2	0.0257	0.0214	0.0195	0.0151	0.0087	0.0006	-0.0093	-0.0207
7	GMH-1 / #STEM 5	-0.0239	-0.0347	-0.0383	-0.0481	-0.0623	-0.0807	-0.1031	-0.1294
8	GMH-8 / #STEM 3	-0.0243	-0.0335	-0.0364	-0.0446	-0.0564	-0.0717	-0.0905	-0.1127
9	GMH-4 / #7	-0.0038	-0.0117	-0.0143	-0.0213	-0.0316	-0.0449	-0.0613	-0.0807
10	GMH-3 / #STEM 3	0.0399	0.0298	0.0259	0.0161	0.0020	-0.0161	-0.0381	-0.0638
11	GMH-4 / #4	0.0266	0.0190	0.0158	0.0081	-0.0031	-0.0174	-0.0347	-0.0547
12	GMH-4 / #5	0.0030	-0.0041	-0.0065	-0.0129	-0.0223	-0.0344	-0.0493	-0.0670
13	GMH-11 / #STEM 2	-0.0286	-0.0361	-0.0385	-0.0452	-0.0549	-0.0674	-0.0829	-0.1012
14	GMH-20 / #4	-0.0406	-0.0491	-0.0518	-0.0593	-0.0702	-0.0844	-0.1018	-0.1225
15	NGMH-1 / #6	0.0144	-0.0069	-0.0137	-0.0327	-0.0602	-0.0957	-0.1387	-0.1888
16	GMH-11 / #1	0.0283	0.0199	0.0159	0.0067	-0.0064	-0.0231	-0.0432	-0.0662
17	GMH-20 / #STEM 3	-0.0141	-0.0208	-0.0230	-0.0291	-0.0380	-0.0495	-0.0636	-0.0804
18	NGMH-1 / #5	0.0305	0.0088	0.0002	-0.0213	-0.0521	-0.0918	-0.1396	-0.1949
19	NGMH-1 / #STEM 8	0.0351	0.0178	0.0109	-0.0061	-0.0307	-0.0622	-0.1003	-0.1443

4.4.3.2 Pengelompokan Model Kelas AVO/AVA

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas secara kualitatif dan kuantitatif, maka didapatkan Aproksimasi AVO/AVA yang paling sensitif terhadap reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida. Aproksimasi tersebut dijadikan dasar dalam pembentukan model kelas AVO/AVA.Pada penelitian ini, pembentukan kelas AVO/AVA didasarkan pada besaran kandungan *impurities* karbondioksida pada setiap lingkungan pengendapan.

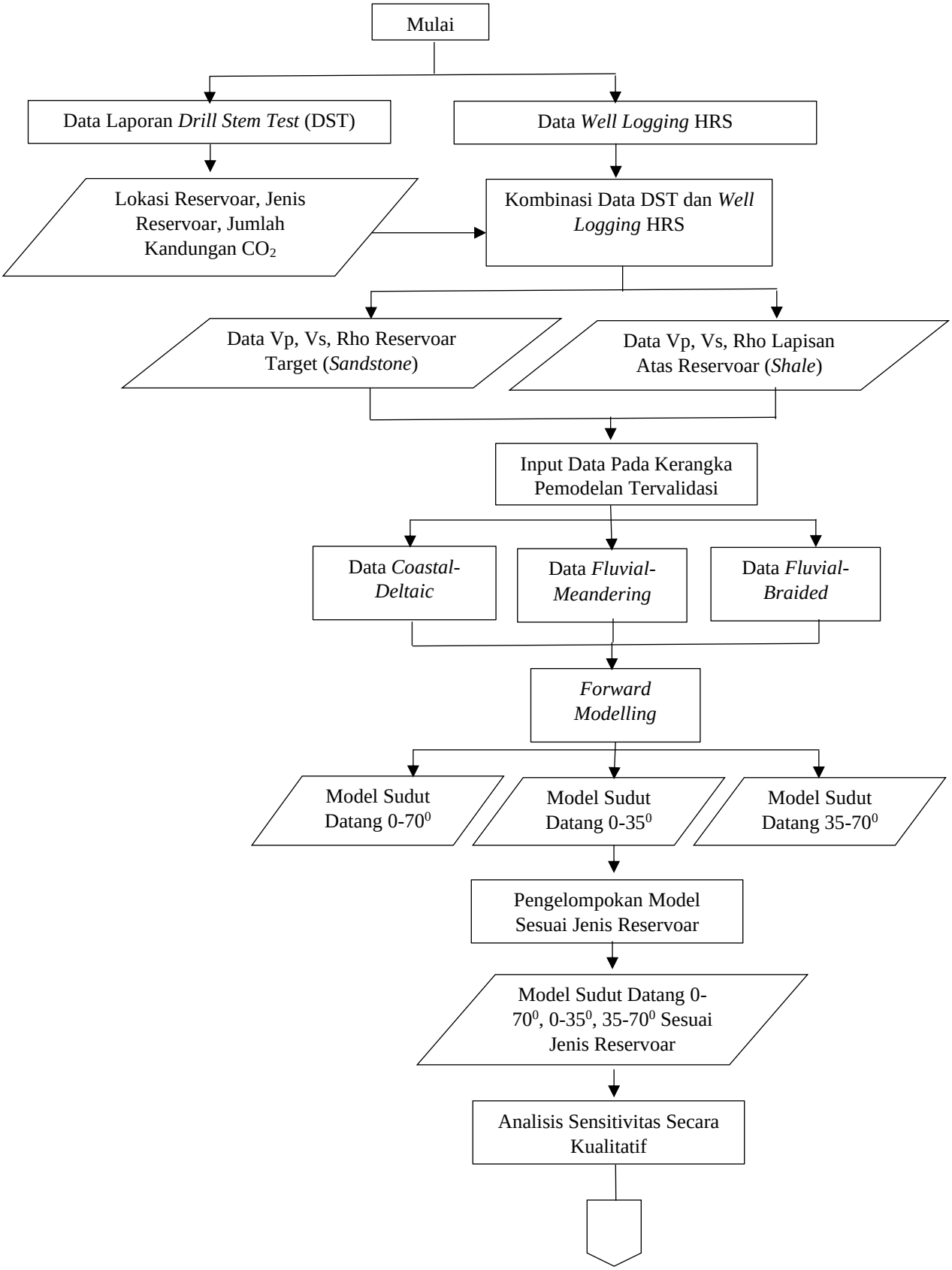
4.5 Diagram Alir Penelitian

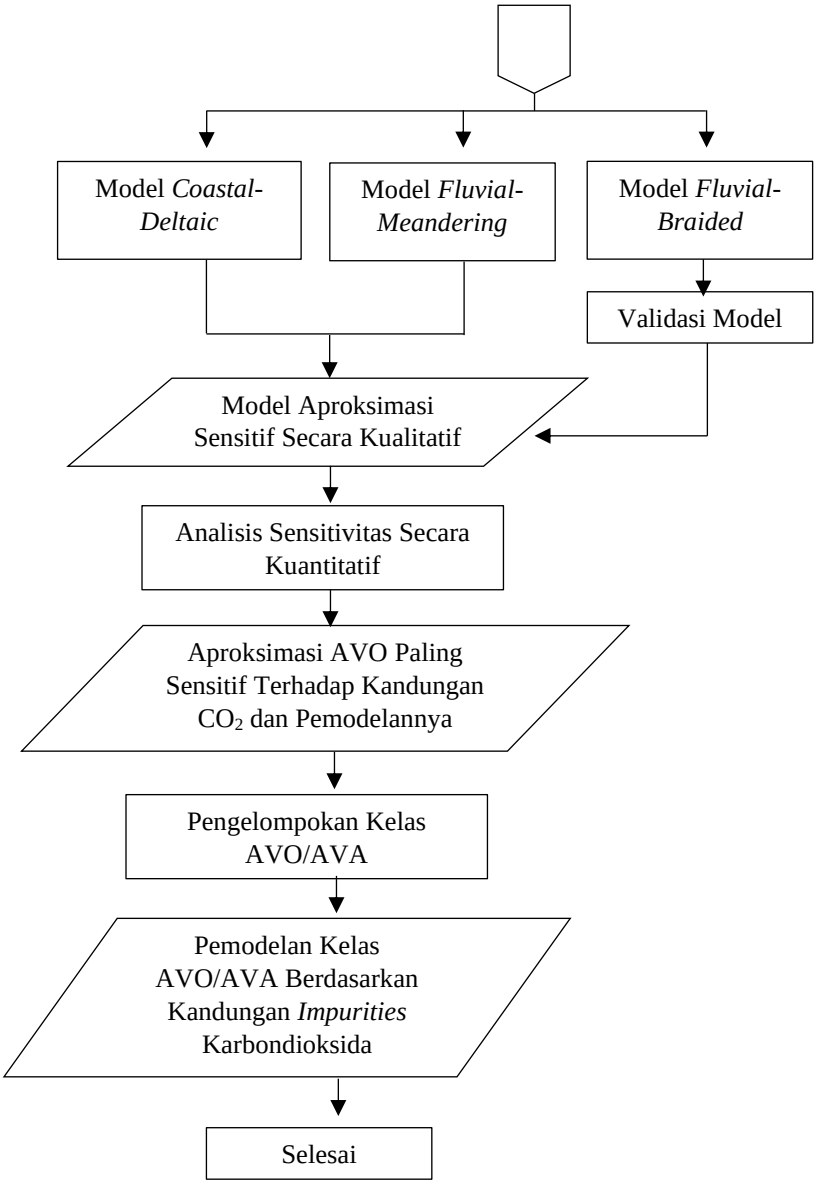
Adapun diagram alir pada penelitian ini dibagi menjadi dua bagian. Pada **Gambar 40.** Merupakan diagram alir pembuatan kerangka pemodelan.aproksimasi AVA.



Gambar 40. Diagram alir pembuatan kerangka pemodelan aproksimasi AVA.

Kemudian, berikut merupakan diagram alir inventariasi dan pengolahan data AVO/AVA yang ditunjukkan pada **Gambar 41.**





Gambar 41. Diagram alir inventarisasi dan pengolahan data AVO/AVA untuk menentukan aproksimasi yang sensitif terhadap CO_2 dan pemodelannya.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan menggunakan data 29 reservoar hidrokarbon batupasir tersaturasi *impurities* karbondioksida dan 12 aproksimasi AVO/AVA didapatkan karakteristik pola koefisien refleksi yang berbeda-beda antar masing-masing reservoar pada setiap aproksimasi. Namun,
2. Pada lingkungan *coastal-deltaic*, Aproksimasi Aki dan Richard adalah aproksimasi yang paling sensitif terhadap *impurities* karbondioksida dimulai dari sudut datang gelombang 5 -35^0 pada reservoar gas dan 15-35^0 pada reservoar gas minyak, dengan sudut datang gelombang yang optimum pada 35^0 Pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering*, Aproksimasi Goodway Pertama adalah yang paling sensitif dimulai dari sudut datang gelombang 0-35^0 pada reservoar gas minyak, dengan sudut datang gelombang yang optimum pada 35^0. Pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided*, tidak dapat ditentukan sensitivitas aproksimasi dikarenakan data reservoar yang dimiliki untuk dilakukan perbandingan tidak cukup, sehingga data pada lingkungan pengendapan *fluvial-braided* digunakan untuk validasi pola koefisien refleksi pada aproksimasi sensitif terhadap *impurities* karbondioksida pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic* dan *fluvial-meandering* kemudian didapatkan hasil bahwa pola koefisien refleksi memiliki kesamaan pada sudut datang gelombang seismik tertentu.
3. Pada lingkungan pengendapan *coastal-deltaic*, dengan didasarkan oleh Aproksimasi Aki dan Richard maka dibentuk kelas AVO/AVA reservoar hidrokarbon tersaturasi *impurities* karbondioksida. Untuk kelas 1A adalah reservoar gas tersaturasi *impurities* karbondioksida 0-15%, kelas 2A adalah

reservoar gas tersaturasi *impurities* karbondioksida 15-30%, kelas 1B adalah reservoar gas minyak tersaturasi *impurities* 0-15%, dan kelas 2B adalah reservoar gas minyak tersaturasi *impurities* 15-30%. Pada lingkungan pengendapan *fluvial-meandering*, dengan didasarkan pada Aproksimasi Goodway Pertama secara berurutan untuk kelas 1B, 2B, 3B adalah reservoar gas minyak tersaturasi *impuritis*, 0-8%, 8-28%, >28%.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa terdapat aproksimasi AVO/AVA yang sensitif terhadap *impurities* karbondioksida. Namun, untuk memperkuat hasil penelitian ini, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, terutama penelitian pada *real seismic data*. Kemudian, perlu dilakukan kembali penelitian pada lapangan hidrokarbon ataupun lingkungan pengendapan tersaturasi *impurities* karbondioksida lainnya, dikarenakan pada penelitian ini juga didapatkan hasil bahwa sensitivitas aproksimasi berbeda antara lingkungan pengendapan satu dengan yang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Aki, K., & Richards, P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W. H. Freeman.

American Association of Petroleum Geologist. (2015). *Amplitude Variation with Offset*. Oklahoma.

Ashcroft, W. (2011). *A Petroleum Geologist's Guide to Seismic Reflection*. Wiley-Blackwell. Oxford.

Asparini, D. 2011. Penerapan Metode Stacking dalam Pemrosesan Sinyal Seismik Laut di Perairan Barat Aceh. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Bishop. dan Michele. G. 2001. *South Sumatera Basin Province, Indonesia: The Lahat/Talangakar-Cenozoic Total Petroleum System*. U.S. Geological Survey.

Canadian Centre for Energy Information. (2013). *Crude Oil in Canada*. Canada: CCEC

Castagna, J.P., Swan, H. W., and Foster, D.J. (1998). *Framework for AVO Gradient and Intercept Interpretation*: Geophysics Journal, 63(3), 948-956.

Chicotepski, K. dan Kasperska, M. (2014*). Influence of the Seismic Attenuation on the AVO Analysis in Miocene Strata from Carpathian Foredeep – SE Poland*. Amsterdam: Amsterdam RAI.

Chouobineh, Abouzar., Abbas., H., David. A., W. (2019) *The Impacts of Gas Impurities on the Minimum Miscibility Pressure of Injected CO_2-Rich Gas -Crude Oil Systems and Enhanced Oil Recovery Potential*. Petroleum Science 16, 117-126.

Cox *et al*. (2020). *An Introduction to Seismic Reflection Data: Acquisition, Processing and Interpretation*. Regional Geology and Tectonics, 22.

Danusaputro, H. (2010). Inversi Model Based Untuk Gambaran Litologi Bawah Permukaan. Jurnal Sains dan Matematika (JSM), 88-93.

Dey-Sarkar, S. K., and Svatek, S. V. (1993). *Prestack Analysis – An Integrated Approach For Seismic Interpretation In Clastic Basins.* Society Exploration of Geophysicist., 57-77.

Dewhurst, D. N., & Nur, A. (2003). *An Overview of The Elastic Properties Of Fluid-Saturated Porous Materials*. Geophysics, 68(2), 482-489.

Dvorkin, J., & Nur, A. (1996). *Dynamic Poroelasticity: A Unified Model With The Squirt And The Biot Mechanisms*. Geophysics, 61(3), 783-794.

Ellis, D. V. and Singer , J. M. (2008). *Well Logging for Earth Scientist 2nd Edition*. Netherlands: Springer.

Fathalian, Ali., Kris, Innanen. (2015). *AVO Modelling of Linearized Zoeppritz Approximations*. CREWES *Research Report*, Vol. 27.

Fatti, J. L., Smith, G. C., Vail, P. J., Strauss, P. J., & Levitt, P. R. (1994). *Detection of Gas in Sandstone Reservoars Using AVO Analysis: A 3-D Seismic Case History Using the Geostack Technique*. Geophysics Journal, 59(9), 1362-1376.

Goldberg, D. (2014). *Geophysics in the Affairs of Mankind: A Personalized History of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists.

Goodway, B., Chen, T., & Downton, J. (1997). *Improved AVO Fluid Detection And Lithology Discrimination Using Lamé Petrophysical Parameters*; "λρ", "μρ", &"λ/μ". InTechOpen.

Goodway, B. (2001). *AVO and Lamé Constants for Rock Parameterization and Fluid Detection*. CSEG Recorder.

Gluyas, J., & Swarbrick, R. (2011). *Petroleum Geoscience*. Blackwell Publishing.

Gray, D., Chen, T., and Goodway, W. (1999). *Bridging the Gap: Using AVO to Detect Changes in Fundamental Elastic Constants*. 69th Ann. Society Exploration of Geophysicist, 852–855.

Ginger. D. dan Fielding. K. (2005). *Petroleum Systems and Future Potential of South Sumatera Basin*. Jakarta: Proceedings Indonesian Petroleum Association 30th Annual Convention & Exhibition.

Hampson dan Russell. (2009). *Module AVO*. Workshop Training. Singapore: CGG Hampson and Russell Software.

Hodzic, Adnan. Sanel, N., Zvonimir, B., Jovana, M. (2019). *Importance of Well Testing in Open Hole of Oil Deposit*. Bosnian: University of Tuzla.

Jamady. (2011). Kuantifikasi Frekuensi dan Resolusi Menggunakan Seismik

Refleksi di Perairan Maluku Utara. Bogor. IPB.

Kearey, Phillip., Brooks., M. and Hill, Ian. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration Third Edition*. Blackwell Science Ltd.

Lyons, William C. (2010). *Working Guide to Reservoar Engineering II Formation Evaluation*. Elsevier 97-232.

Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media (2nd ed.)*. Cambridge University Press.

Neamah, A., I. (2014). *Separation of Petroleum System*. Hilltop Rev, 7(1).

Priyono, A. (2006). *Acquisition, Processing, and Interpretation Seismic Data*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

Rawlinson, N., and Sambridge, M. (2003). *Seismic Travel Time Tomography of The Crust and Lithosphere. Research School of Earth Sciences*. Australian National University. Advances in Geophysics, (46), 81-197.

Reynolds, John M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons.

Rutherford, S. R., and Williams, R. H. (1989). *Amplitude-Versus-Offset Variations in Gas Sands*. Geophysics Journal, 54 (6), 680-688.

Santos, L, M. Silvio, H,. Fabricio, O., (2021). *A Systematic Review for the Rig Scheduling Problem: Clasification and State-of-the-art*. Elsevier Ltd.

Sarout, J., & Koutsoukos, P. G. (2013). *CO2-Brine-Sandstone Interaction During Geologic Storage: Impact Of Reservoir Temperature*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 16, 83-92.

Serra, Oberto. (1989). *Sedimentological Analysis of Sand Shale Series from Well Logs*. SPWLA 16thAnn. Symp. Trans Paper W.

Shearer, P. M. 1999. *Introduction To Seismology*. Cambridge University Press. United Kingdom.

Smith, G. C., & Gidlow, P. M. (1987). *Weighted Stacking for Rock Property Estimation And Detection of Gas*. Geophysical Prospecting, 35(8), 993 1014.

Shuey, R. T. (1985*). A simplification of the Zoeppritz Equations*. Geophysics, 50(4), 609-614.

Stolt, R. H., & Weglein, A. B. (1985). *Migration And Inversion of Multi-Offset*

Seismic Data. Geophysics, 50(11), 2443-2454.

Thomas, M., Ball, V., Blangy, J. P., & Tenorio, L. (2016). *Rock-Physics Relationships Between Inverted Elastic Reflectivities*. The Leading Edge.

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Gulf Professional Publishing.

Ursenbach, C. P., and R. R. Stewart. (2008). *Two-Term AVO Inversion: Equivalences and New Methods*. Geophysics, 73 (6), 31– 38.

Veeken, P.C.H. (2007). *Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoar Characterization*. Elsevier: Amsterdam.

Verm, R., and Hilterman, F., (1995). *Lithology Colorcoded Seismic Sections: The Calibration Of AVO Crossplotting To Rock Properties*. The Leading Edge, 14(8), 847-853.

Zoeppritz, K.B. (1919). *On the Reflection and Progradation of Seismic Wave*. Gottinger. Erdbebebwellen VIIIB