

**ANALISIS SENSITIVITAS *AMPLITUDE VERSUS OFFSET* (AVO)
PARAMETER *INTERCEPT* DAN *GRADIENT* TERHADAP VARIASI FLUIDA
PADA MODEL *ISOLATED* DAN *LAMINATED* DENGAN PENGARUH
*TUNING THICKNESS***

(Skripsi)

Oleh

**HANIFAH
2215051080**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**ANALISIS SENSITIVITAS *AMPLITUDE VERSUS OFFSET* (AVO)
PARAMETER *INTERCEPT* DAN *GRADIENT* TERHADAP VARIASI FLUIDA
PADA MODEL *ISOLATED* DAN *LAMINATED* DENGAN PENGARUH
*TUNING THICKNESS***

Oleh
HANIFAH

Skripsi
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

ANALISIS SENSITIVITAS *AMPLITUDE VERSUS OFFSET* (AVO) PARAMETER *INTERCEPT* DAN *GRADIENT* TERHADAP VARIASI FLUIDA PADA MODEL *ISOLATED* DAN *LAMINATED* DENGAN PENGARUH *TUNING THICKNESS*

Oleh

Hanifah

Amplitude Versus Offset (AVO) merupakan metode analisis seismik yang memanfaatkan perubahan amplitudo refleksi terhadap *offset* atau sudut datang untuk mengidentifikasi perubahan sifat elastik batuan yang berkaitan dengan litologi dan fluida reservoir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas parameter AVO, yaitu *intercept* dan *gradient*, terhadap variasi fluida pada model reservoir *isolated* dan *laminated* dengan mempertimbangkan pengaruh *tuning thickness*. Penelitian dilakukan menggunakan data sumur yang diintegrasikan dengan *Fluid Replacement Modeling* (FRM) berbasis Persamaan Gassmann untuk mensimulasikan kondisi reservoir tersaturasi air, minyak, dan gas. Parameter elastik hasil substitusi fluida, berupa kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas, digunakan untuk membangun model seismik sintetik *prestack* 2D. Analisis AVO dilakukan menggunakan pendekatan dua suku Aki-Richards (*two-term*) untuk memperoleh nilai *intercept* dan *gradient*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi fluida menyebabkan penurunan nilai V_p dan densitas dari kondisi air ke minyak dan gas, sedangkan nilai V_s relatif tidak berubah secara signifikan. Pada kondisi air dan minyak diperoleh nilai *intercept* positif, sedangkan pada kondisi gas nilai *intercept* berubah menjadi negatif akibat penurunan impedansi akustik yang signifikan. Nilai *gradient* tetap negatif pada seluruh kondisi fluida dengan magnitudo terbesar pada reservoir gas. Model *isolated* menghasilkan respons AVO yang lebih representatif dibandingkan model *laminated* karena tidak dipengaruhi oleh interferensi gelombang antar lapisan. Kondisi *below tuning* menyebabkan amplitudo refleksi teredam sehingga nilai *intercept* dan *gradient* menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi *above tuning*. Parameter *intercept* terbukti lebih sensitif dan efektif dalam mendeteksi keberadaan hidrokarbon, khususnya gas, dibandingkan parameter *gradient*.

Kata Kunci: *Amplitude Versus Offset* (AVO), *gradient*, *intercept*, *Isolated*, *Laminated*

ABSTRACT

SENSITIVITY ANALYSIS OF AMPLITUDE VERSUS OFFSET (AVO) INTERCEPT AND GRADIENT PARAMETERS TO FLUID VARIATIONS IN ISOLATED AND LAMINATED MODELS UNDER THE INFLUENCE OF TUNING THICKNESS

By

Hanifah

Amplitude Versus Offset (AVO) is a seismic analysis method that utilizes changes in reflection amplitude with respect to offset or angle of incidence to identify variations in the elastic properties of rocks associated with lithology and reservoir fluids. This study aims to analyze the sensitivity of AVO parameters, namely intercept and gradient, to fluid variations in isolated and laminated reservoir models while considering the effect of tuning thickness. The study was conducted using well log data integrated with Fluid Replacement Modeling (FRM) based on the Gassmann equation to simulate reservoir conditions saturated with water, oil, and gas. The elastic parameters resulting from fluid substitution, comprising P-wave velocity (V_p), S-wave velocity (V_s), and density, were used to construct a 2D synthetic prestack seismic model. AVO analysis was performed using the Aki-Richards two-term approximation to derive intercept and gradient values. The results indicate that fluid substitution causes a decrease in V_p and density from water to oil and gas conditions, while V_s remains relatively unchanged. Water and oil conditions yield positive intercept values, whereas gas conditions produce negative intercept values due to a significant reduction in acoustic impedance. The gradient remains negative across all fluid conditions, with the largest magnitude observed in gas reservoirs. The isolated model produces a more representative AVO response than the laminated model, as it is not affected by inter-layer wave interference. Below tuning conditions result in attenuated reflection amplitudes, causing both intercept and gradient values to be smaller compared to above tuning conditions. The intercept parameter proves to be more sensitive and effective in detecting the presence of hydrocarbons, particularly gas, compared to the gradient parameter.

Keywords: Amplitude Versus Offset (AVO), gradient, intercept, isolated, laminated.

Judul Laporan : Analisis Sensitivitas *Amplitude Versus Offset* (AVO) Parameter *Intercept* dan *Gradient* terhadap Variasi Fluida pada Model *Isolated* dan *Laminated* dengan Pengaruh *Tuning Thickness*

Nama : Hanifah

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215051080

Jurusan : Teknik Geofisika


Fakultas : Teknik

Menyetujui

1. Komisi Pembimbing

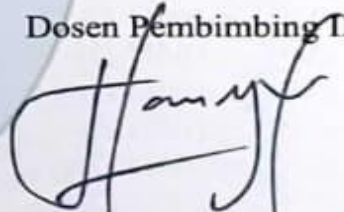
Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ir. Svamsurijal Rasimeng, S.Si,

M.Si., C.EIA., IPM.

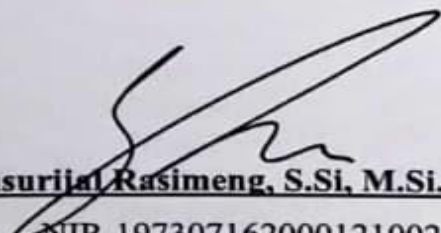
NIP. 197307162000121002


Nanda Hanyfa Maulida,

S.T., M.T.

NIP. 199308262022032013

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


Dr. Ir. Svamsurijal Rasimeng, S.Si, M.Si., C.EIA., IPM.

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si,
M.Si., C.EIA., IPM.**

Sekretaris : **Nanda Hanyfa Maulida, S.T., M.T.**

Anggota : **Ilham Dani, S.T., M.T.**



Three handwritten signatures in black ink are stacked vertically on the right side of the page. The top signature is the most legible, appearing to be 'Syamsurijal Rasimeng'. The middle signature is 'Nanda Hanyfa Maulida' and the bottom one is 'Ilham Dani'.

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NID. 196910302000031001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **12 Juni 2026**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi berjudul “Analisis Sensitivitas *Amplitude Versus Offset (AVO)* Parameter *Intercept* dan *Gradient* terhadap Variasi Fluida pada Model *Isolated* dan *Laminated* dengan Pengaruh *Tuning Thickness*” merupakan hasil karya saya sendiri yang disusun berdasarkan pengetahuan serta data yang saya peroleh. Karya ini tidak mengandung materi yang pernah dipublikasikan sebelumnya dan bukan merupakan hasil plagiarisme dari karya pihak lain. Seluruh kutipan, baik berupa pendapat maupun karya orang lain yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah dicantumkan secara jelas sesuai dengan sumbernya dalam daftar pustaka, serta mengikuti norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan dapat saya pertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026
Penulis



Hanifah
NPM. 2215051080

RIWAYAT HIDUP



Hanifah lahir di Tanjung Ampalu, pada 5 September 2004. Anak ketiga dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Mursyanif dan Ibu Depi Rosmaidarwati. Penulis mulai menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Permata Bunda pada tahun 2009, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SDN 08 Padang Laweh pada tahun 2010–2016, pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 7 Sijunjung pada tahun 2016–2019, serta pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Sijunjung pada tahun 2019–2022.

Pada tahun 2022, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Universitas Lampung, Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Geofisika. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengembangkan kapasitas akademik dan kepemimpinan melalui keterlibatan dalam organisasi kemahasiswaan. Penulis pernah menjabat sebagai anggota bidang SBM HIMA TG Bhuwana pada tahun 2023, kemudian dipercaya sebagai Wakil Sekretaris Umum BEM Fakultas Teknik Universitas Lampung pada tahun 2025, serta menjabat sebagai Bendahara HAGI *Student Chapter* Universitas Lampung pada tahun 2026.

Selain aktif berorganisasi, penulis juga menunjukkan komitmen dalam pengembangan akademik melalui partisipasi dalam kompetisi ilmiah. Pada tahun 2023, penulis berhasil masuk 10 besar finalis lomba paper GEOTRAP oleh Hima Geofisika “Pedra” Universitas Padjadjaran. Selanjutnya, pada tahun 2025 penulis meraih posisi 5 besar pada kompetisi GeoFest ITERA. Selain itu penulis berkontribusi sebagai penulis kedua dalam publikasi *prosiding* ilmiah berjudul “Analisis Tingkat Resiko

Kawasan Bencana Gunung Merapi Daerah Kabupaten Sleman Melalui Pendekatan Sistem Informasi Geografis”. Selain itu penulis aktif mengikuti kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) pada tahun 2025 dan lolos seleksi tingkat Fakultas Teknik.

Selama menempuh pendidikan di Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan pengabdian kepada masyarakat yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG BHUWANA). Kegiatan tersebut meliputi pengembangan geowisata Pantai Batu Balak di Kabupaten Lampung Selatan, pengembangan potensi geowisata air terjun di Pekon Air Abang, Kabupaten Tanggamus, serta kegiatan sosialisasi Desa Tangguh Bencana di Desa Totoharjo, Kabupaten Lampung Selatan. Melalui kegiatan tersebut, penulis memperoleh pengalaman dalam pengabdian masyarakat, pengembangan potensi daerah berbasis geowisata, serta peningkatan kesadaran masyarakat terhadap mitigasi bencana.

Penulis melaksanakan kerja praktik pada periode Juni hingga Juli 2025 di Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Selama kerja praktik tersebut, penulis mengangkat topik “Pengolahan Data Seismik Laut Dua Dimensi di Perairan Arafura”. Selanjutnya, pada Januari hingga Maret 2026, penulis melaksanakan penelitian Tugas Akhir di PT. Pertamina Hulu Rokan, Jakarta, yang menghasilkan skripsi berjudul "Analisis Sensitivitas *Amplitude Versus Offset* (AVO) Parameter *Intercept* dan *Gradient* terhadap Variasi Fluida pada Model *Isolated* dan *Laminated* dengan Pengaruh *Tuning Thickness*". Minat utama penulis dalam bidang geofisika, khususnya seismik eksplorasi dan karakterisasi reservoir, menjadi landasan dan arah fokus dalam penelitian ini.

PERSEMBAHAN

Puji syukur kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya yang begitu besar dan tak terhingga sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan sebagaimana mestinya. Skripsi ini tidaklah sempurna namun ditulis dengan sepenuh hati dan harapan yang besar agar berguna untuk setiap insan yang membaca. Dengan penuh bangga skripsi ini dipersembahkan kepada kedua orang tua terkasih dan tersayang

“Ayahanda Mursyanif dan Mama Depi Rosmaidarwati”

Kepada kedua orang tua yang tak pernah berhenti berjuang dan berkorban demi kebaikan anaknya, yang senantiasa memanjatkan doa di setiap sujud memohon kelancaran, perlindungan, dan keberkahan dalam setiap langkah perjalanan ini. Berkat kasih sayang yang tulus dan ridho yang selalu menyertai, anakmu mampu bertahan dan berdiri hingga di titik ini. Terima kasih telah menjadi tempat paling aman untuk berlabuh, mengadu akan lelah dan beratnya perjalanan. Semoga Allah senantiasa meridhoi setiap doa yang kita panjatkan dan membalas segala kebaikan dengan kemuliaan di dunia maupun di akhirat.

Abang dan Kakak Tersayang

“Hafzil Fajri dan Hafizah”

Terimakasih telah berjuang dan selalu memberikan doa terbaik, yang memberikan dukungan yang tulus dalam penyusunan skripsi ini. Semoga Allah senantiasa memberikan umur yang panjang dan kebahagiaan yang tak pernah usai.

MOTTO

Mulai dengan *Bismillah* dan akhiri dengan *Alhamdulillah*

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya.”

QS. Al-Baqarah: 286

“Barang siapa menelusuri jalan mencari ilmu padanya, Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga”

HR. Muslim

“Cukuplah Allah (menjadi penolong) bagi kami dan dia sebaik-baiknya penolong”

QS. Ali ‘Imran:173

“Sebaik-baik manusia adalah yang bermanfaat bagi orang lain.”

HR. Ahmad

“Pray hard, work silently, let success make the noise”

“Teruslah berusaha dan berdoa apa yang kamu dapatkan sekarang adalah hasil dari doa-doamu”

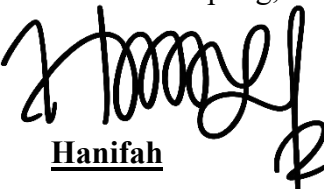
KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis menyadari bahwa tanpa ridho, rahmat, serta pertolongan Allah SWT, skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini berjudul “Analisis Sensitivitas *Amplitude Versus Offset* (AVO) Parameter *Intercept* dan *Gradient* terhadap Variasi Fluida pada Model *Isolated* dan *Laminated* dengan Pengaruh *Tuning Thickness*” Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Geofisika.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026



Hanifah
NPM. 2215051080

SANWACANA

Segala Puji dan Syukur kepada Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis diberikan kemudahan dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik dengan mengangkat judul “Analisis Sensitivitas *Amplitude Versus Offset* (AVO) Parameter *Intercept* dan *Gradient* terhadap Variasi Fluida pada Model *Isolated* dan *Laminated* dengan Pengaruh *Tuning Thickness*”. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, tanpa mengurangi rasa hormat sedikitpun dan dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika, dosen pembimbing 1 tugas akhir dan dosen pembimbing akademik yang senantiasa memberikan bimbingan dan masukan selama perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir. Penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya atas segala waktu yang dengan ikhlas diluangkan, serta bimbingan dan arahan yang sangat berharga dalam proses penyempurnaan penulis tugas akhir ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik dan tepat waktu.
3. Ibu Nanda Hanyfa Maulida, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 tugas akhir yang senantiasa memberikan saran, masukan yang membangun, serta motivasi dan

semangat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini hingga dapat terselesaikan.

4. Bapak Ilham Dani, S. T., M. T., selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, saran dan masukan yang sangat berarti bagi penulis dalam penyempurnaan hasil skripsi ini.
5. Bapak Moh. Irfan Saputra Haris, *Chief Geophysicist* PT. Pertamina Hulu Rokan, selaku pembimbing lapangan tugas akhir, yang dengan sabar dan ikhlas membimbing dalam penyusunan tugas akhir. Penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya atas segala ilmu pengetahuan, saran, serta masukan yang telah diberikan dengan tulus selama masa magang, semua hal tersebut sangat berharga dan akan menjadi bekal yang amat berguna bagi penulis dalam memasuki dan menghadapi dunia kerja di masa mendatang.
6. Bapak Subarsyah S.Si., M.T., selaku pembimbing lapangan kerja praktik penulis di Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) yang dengan tulus telah memberikan ilmu, pengalaman, serta kesempatan yang sangat berharga kepada penulis selama pelaksanaan kegiatan kerja praktik.
7. Bapak dan Ibu dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah dengan sabar mendidik dan mengajarkan ilmu pengetahuan yang sangat bermanfaat kepada penulis selama masa perkuliahan, karena tiada harta yang lebih berharga selain ilmu yang bermanfaat.
8. Kepada kedua Orangtua yang tersayang, terimakasih atas kepercayaan, dukungan dan doa yang tiada henti untuk kelancaran dan kesuksesan study penulis. Terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala kasih sayang yang tulus dan tiada batas yang senantiasa diberikan kepada penulis sejak kecil hingga saat ini, sehingga penulis dapat tumbuh dan berkembang dengan penuh cinta dan kehangatan. Tiada hal apapun di dunia ini yang dapat menggantikan semua pengorbanan dan ketulusan tersebut. Penulis merasa sangat bangga dan bersyukur dapat menjadi anak dari orang tua yang luar biasa dan rasa bangga itu adalah sesuatu yang pasti dan nyata. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan kesehatan, panjang umur, serta keberkahan dalam setiap langkah kehidupan Ayah dan Mama.

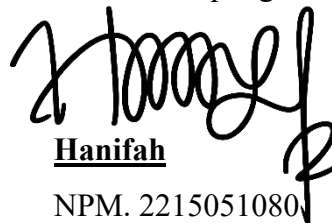
9. Kepada keluarga besar Almarhum Kakek Abdul Muis dan Almarhumah Nenek Mariah, serta keluarga besar Kakek Arusmadi dan Nenek Maisar, yang senantiasa tanpa kenal lelah selalu memberikan dukungan dan doa tulus untuk kebaikan serta kemudahan penulis dalam setiap langkah yang ditempuh.
10. Saudara kandungku, Abang Hafzil Fajri yang dengan tulus senantiasa memberikan dukungan finansial dan moral yang sangat berarti dalam setiap langkah perjalanan penulis. Kakak Hafizah yang setia menemani dan membersamai penulis di bangku perkuliahan, menjadi tempat jatuh dan bangun bersama, tempat berbagi cerita suka dan duka, serta tempat meminta tolong di kala susah. Sungguh kata-kata tidak akan pernah cukup untuk mengungkapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya ini, semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan, umur yang panjang, dan keberkahan dalam setiap langkah hidup kalian.
11. “*Uri Cung-ngii*”, sahabat yang kusayangi dari yang pertama lahir Nur Asia Azam, Amelia Putri Anggraeni, Tyas Puspaningsih, Indira Azra U. P, Galuh Andini Putri A. H, Amalia Ramadhona, Yeni Marsela, dan Aulia Nisya. Yang telah memberikan warna indah dalam perjalanan perkuliahan ini. Terima kasih atas segala kebaikan yang diberikan, kalian seperti keluarga yang senantiasa hadir dan menolong di saat susah maupun senang. Semoga kita semua senantiasa diberikan kesehatan dan kesuksesan. *Don't forget me, see you on top!*
12. "Cabat Surgaku", Khairiah Rawita, Zahra Ramendra, dan Deska Indah Sinaga, terima kasih atas dukungan dan doa yang tulus untuk kemudahan setiap langkah penulis, semoga kalian selalu bahagia dan sukses.
13. “BBS”, Siti Mahmudah yang senantiasa menjadi tempat paling nyaman bagi penulis untuk bertanya dan berkeluh kesah, serta telah setia menemani dan membersamai penulis sejak pelaksanaan Kerja Praktik di Bandung hingga penyelesaian Tugas Akhir di Jakarta, semoga segala langkah kalian senantiasa dimudahkan dan diberikan kesuksesan oleh Allah SWT.
14. Saudara Fadsyah Muhammad Arbi, yang senantiasa membantu, mendukung, dan mendengarkan keluh kesah penulis selama menjalani perkuliahan. Terima kasih atas segala kebaikan yang diberikan dengan tulus dan ikhlas, semoga Allah SWT

senantiasa memberikan kesuksesan, kebahagiaan, dan keberkahan dalam setiap langkah hidupmu, *one and only good boy!*

15. Keluarga Besar Teknik Geofisika Angkatan 2022, “Granit” kebanggaanku, yang telah mengajarkan penulis arti solidaritas, kebersamaan, dan kekompakan yang sesungguhnya selama masa perkuliahan. Terima kasih atas semua memori indah yang telah diciptakan, yang senantiasa solid dalam suka maupun duka serta mendukung kesuksesan satu sama lain. Teruslah bersinar terang, sukses, dan jayalah selalu “Granitku”!.
16. Teman-teman Laboratorium Instrumentasi Geofisika ncik (Ardian Perdana), Razki Alfatah dan teman-teman lainnya yang telah berjuang bersama dalam suka maupun duka menyelesaikan tugas akhir ini, terima kasih telah menjadi bagian terindah dari proses ini. Perjuangan kita tidak sia-sia. Semoga kelak kita semua menuai hasil dari setiap kerja keras yang telah kita tanamkan. *See you on top guys!*
17. Abang, kakak dan Adik-adik Jurusan Teknik Geofisika yang selalu menjadi tempat bertanya dan belajar bagi penulisan selama perkuliahan.
18. Roket Digital yang selalu siap melayani kebutuhan print kapan pun dibutuhkan. Semoga semakin sukses dan jaya!
19. Kepada Hanifah anak bungsu yang banyak takutnya, yang mencoba banyak hal baru. Terima kasih telah berjuang sekeren ini, gapailah semua impianmu dengan sabar dan doa, semoga Allah meridhoi setiap langkahmu. *Keep going, keep growing!*

Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyelesaian skripsi maupun selama masa perkuliahan, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala bantuan, doa, dan kebaikan yang telah diberikan.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026



Hanifah
NPM. 2215051080

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	x
MOTTO	xi
KATA PENGANTAR	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xx
DAFTAR TABEL	xxii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kerangka Berpikir.....	6
2.2 Penelitian Terdahulu.....	7

III. TEORI DASAR.....	8
3.1 <i>Petroleum System</i>	8
3.1.1 Batuan Sumber (<i>Source Rock</i>)	8
3.1.2 Reservoir	8
3.1.3 Batuan Penutup (<i>Seal</i>).....	9
3.1.4 Perangkap (<i>Trap</i>).....	10
3.1.5 Migrasi	10
3.2 Gelombang Seismik	10
3.3 Metode Seismik Refleksi	12
3.3.1 <i>Wavelet</i>	12
3.3.2 Impedansi Akustik.....	13
3.3.3 Koefisien Refleksi.....	13
3.3.4 <i>Trace</i> Seismik.....	14
3.3.5 Polaritas dan <i>Phase</i>	15
3.3.6 Resolusi Seismik.....	16
3.4 Analisis <i>Amplitude Versus Offset (AVO)</i>	17
3.4.1 Aproksimasi Aki & Richards	18
3.4.2 Klasifikasi AVO	21
3.5 <i>Fluid Substitution</i>	23
3.6 <i>Fluid Replacement Modeling</i>	27
3.7 <i>Tuning Thickness Theory</i>	28
3.8 Efek Jenis Fluida Terhadap Amplitudo	28
3.9 Model <i>Isolated</i> dan <i>Laminated</i>	29
3.10 Konsep Dasar <i>Welllogging</i>	30
3.10.1. Log Gamma ray.....	30
3.10.2. Log <i>Resistivity</i>	30
3.10.3. Log Densitas	31
3.10.4. Log <i>Neutron Porosity</i>	31
IV. METODOLOGI PENELITIAN	32
4.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	32

4.2	Alat dan Bahan.....	34
4.3	Prosedur Penelitian.....	34
4.3.1	Input Data.....	34
4.3.2	<i>Fluid Substitution</i>	35
4.3.3	Pembuatan Model 2D.....	35
4.3.4	<i>Fluid Replacement Modeling</i>	35
4.3.5	Analisis AVO.....	36
4.3.6	Analisis Sensitivitas Parameter AVO terhadap Variasi Fluida.....	36
4.4	Diagram Alir Penelitian.....	38
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	39
5.1	Analisis Kualitatif Data Sumur.....	39
5.2	Analisis <i>Fluid Substitution</i> Terhadap Perubahan Perubahan Elastik Batuan	40
5.3	Model Reservoir.....	42
5.4	Parameter Elastik Batuan	43
5.5	Analisis Respon Seismik <i>Prestack</i> Hasil <i>Fluid Replacement Modeling</i>	46
5.6	Analisis Respon AVO.....	48
5.7	Respon AVO <i>Intercept</i> dan <i>Gradient</i> terhadap Variasi Fluida	53
5.8	Analisis Respon AVO <i>Intercept</i> dan <i>Gradient</i> Pada Reservoir <i>Isolated</i> dan <i>Laminated</i>	54
5.9	Analisis AVO <i>Intercept</i> dan <i>Gradient</i> Terhadap Efek <i>Tuning Thickness</i>	57
5.10	Analisis Sensitivitas Parameter <i>Intercept</i> dan <i>Gradient</i> dalam Mendeteksi Fluida	59
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	63
6.1	Kesimpulan	63
6.2	Saran.....	64
	DAFTAR PUSTAKA.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. <i>Petroleum system</i>	9
2. Jenis-jenis gelombang seismik.....	11
3. Ilustrasi skematis dari <i>wavelet</i> (A) <i>minimum phase</i> , (B) <i>maksimum phase</i> , (C) <i>mixed phase</i> , (D) <i>zero phase</i>	12
4. Koefisien refleksi mendefinisikan perbedaan IA pada batas litologi.....	14
5. Ilustrasi <i>trace</i> seismik	14
6. Polaritas standar positif SEG (Amerika) dan standar negatif (Eropa)	15
7. (a) Respon kurva AVO (b) <i>Crossplot</i> AVO	22
8. Ilustrasi lapisan <i>isolated</i> dan <i>laminated</i>	30
9. Diagram alir penelitian.....	38
10. Respon log pada sumur X	39
11. Model 2D lapisan <i>isolated</i> dan lapisan <i>laminated</i>	42
12. Model properti elastik 2D	45
13. Data <i>synthetic prestack gather</i> pada kondisi air 100%	47
14. Data <i>synthetic prestack gather</i> pada kondisi minyak 80%	47
15. Data <i>synthetic prestack gather</i> pada kondisi gas 90%	47
16. Analisis <i>gradient</i> reservoir <i>isolated above tuning</i>	49
17. Analisis <i>gradient</i> reservoir <i>laminated above tuning</i>	49
18. Analisis <i>gradient</i> reservoir <i>isolated below tuning</i>	50
19. Analisis <i>gradient</i> reservoir <i>laminated below tuning</i>	50
20. <i>Crossplot intercept</i> dan <i>gradient</i>	55

21. Nilai <i>intercept</i> dan <i>gradient</i> kondisi <i>above tuning</i> dan <i>below tuning</i>	58
22. Analisis sensitivitas <i>intercept</i> dan <i>gradient</i> dalam mendeteksi fluida hidrokarbon	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian terdahulu.....	7
2. <i>Crossplot intercept</i> dan <i>gradient</i>	21
3. Jadwal penelitian tugas akhir	33
4. Alat dan bahan.....	34
5. Parameter elastik batuan hasil <i>fluid substitution</i>	41
6. Parameter elastik batuan model 2D	44
7. Analisis sensitivitas nilai <i>intercept</i> dan <i>gradient</i>	51
8. Resolusi vertikal.....	57

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebelum berkembangnya analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO), interpretasi seismik dalam eksplorasi hidrokarbon umumnya berfokus pada identifikasi perangkap struktural dan anomali amplitudo seperti *bright spot*. Metode ini mulai dikenal sejak tahun 1970-an dan sering digunakan sebagai indikator langsung keberadaan hidrokarbon (Handoyo dkk., 2013). Namun, dalam praktiknya, tidak semua *bright spot* merepresentasikan keberadaan hidrokarbon. Berbagai kondisi bawah permukaan seperti sisipan tipis batubara, batuan berpori atau rekahan, lapisan garam, konglomerat, turbidit, serta efek *tuning* dari lapisan tipis dapat menghasilkan anomali amplitudo yang serupa, sehingga menimbulkan ambiguitas dalam interpretasi (Simm & Bacon, 2014; Widess, 1973). Kondisi ini menimbulkan ambiguitas dalam interpretasi seismik, terutama pada reservoir dengan ketebalan di bawah resolusi vertikal.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Ostrander (1984) memperkenalkan konsep AVO yang menunjukkan bahwa amplitudo refleksi berubah terhadap *offset* dan sensitif terhadap variasi sifat elastik batuan serta fluida pori. Metode ini memungkinkan pembedaan yang lebih baik antara pengaruh litologi dan fluida melalui parameter *intercept* dan *gradient*. Namun demikian, respon AVO tidak hanya dipengaruhi oleh fluida, tetapi juga oleh geometri lapisan dan fenomena propagasi gelombang. Pada lapisan tipis, efek *tuning* dan interferensi, terutama pada konfigurasi *laminated* dibandingkan *isolated*, dapat memodifikasi amplitudo sehingga menyerupai anomali hidrokarbon.

Meskipun demikian, penerapan AVO tidak sepenuhnya bebas dari keterbatasan. Pada kondisi lapisan tipis dan heterogen, efek fluida seringkali sulit dipisahkan dari pengaruh geometri lapisan dan fenomena propagasi gelombang, khususnya *tuning effect* dan interferensi antar refleksi. Hal ini menyebabkan respon amplitudo yang diamati tidak lagi mencerminkan kondisi fisik sebenarnya dari reservoir, sehingga meningkatkan risiko kesalahan interpretasi fluida.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh ketebalan lapisan tipis terhadap respon AVO. Xie dkk. (2017) menunjukkan bahwa pada model *wedge*, respon AVO mencapai nilai maksimum pada ketebalan seperempat panjang gelombang ($1/4 \lambda$), di mana efek *tuning* memperkuat amplitudo tanpa mengubah kelas AVO asli. Saeed dkk. (2020) juga menyatakan bahwa atribut AVO, khususnya *intercept* dan *gradient*, sangat dipengaruhi oleh *tuning thickness*, dimana nilai maksimum terjadi pada ketebalan *tuning*. Liu dkk. (2022) menunjukkan bahwa efek *tuning* tidak hanya memodifikasi magnitudo respon AVO, tetapi juga berpotensi mengubah kelas AVO, sehingga meningkatkan ketidakpastian dalam identifikasi fluida reservoir. Di sisi lain, Mughal dan Akhter (2020) membuktikan bahwa integrasi *Fluid Replacement Modeling* (FRM) berbasis Persamaan Gassmann dengan analisis AVO mampu merepresentasikan perubahan sifat elastik akibat variasi fluida, yang ditunjukkan oleh penurunan kecepatan gelombang kompresi (V_p), densitas, serta perubahan rasio V_p/V_s yang merepresentasikan karakter elastik batuan terhadap kandungan fluida sehingga hal ini berpengaruh terhadap respon amplitudo, khususnya pada *offset* jauh.

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah menunjukkan bahwa analisis AVO sensitif terhadap variasi fluida dan ketebalan lapisan, kajian yang secara spesifik membandingkan respon AVO pada model lapisan *isolated* dan *laminated* dengan mempertimbangkan pengaruh *tuning thickness* masih terbatas. Padahal, perbedaan geometri lapisan tersebut berpotensi menghasilkan respon seismik yang berbeda secara signifikan, bahkan pada kondisi fluida yang sama. Keterbatasan ini menunjukkan adanya celah penelitian yang penting untuk dikaji lebih lanjut, terutama dalam upaya meningkatkan keakuratan interpretasi AVO pada reservoir berlapis tipis.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis sensitivitas parameter AVO, yaitu *intercept* dan *gradient*, terhadap variasi jenis fluida air, minyak, dan gas pada kondisi lapisan *isolated* dan *laminated*, serta mengevaluasi pengaruh *tuning thickness* terhadap respon seismik yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai keterbatasan dan keandalan metode AVO dalam karakterisasi fluida pada reservoir berlapis tipis, sehingga dapat mengurangi ambiguitas dalam interpretasi seismik dan meningkatkan keberhasilan eksplorasi hidrokarbon.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai AVO *intercept* dan *gradient* terhadap variasi jenis fluida?
2. Bagaimana respon parameter AVO *intercept* dan *gradient* terhadap model lapisan reservoir *isolated* dan *laminated*?
3. Bagaimana pengaruh *tuning thickness* terhadap perubahan parameter AVO *intercept* dan *gradient*?
4. Bagaimana tingkat sensitivitas parameter AVO *intercept* dan *gradient* terhadap jenis fluida dalam mengidentifikasi keberadaan hidrokarbon pada kondisi lapisan *isolated* dan *laminated* dengan *tuning thickness*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis nilai parameter AVO *intercept* dan *gradient* terhadap variasi fluida.
2. Menganalisis respon parameter AVO *intercept* dan *gradient* pada model lapisan *isolated* dan *laminated*.
3. Menganalisis pengaruh *tuning thickness* terhadap perubahan nilai parameter AVO *intercept* dan *gradient*.

4. Menganalisis tingkat sensitivitas parameter AVO *intercept* dan *gradient* terhadap jenis fluida dalam mengidentifikasi keberadaan hidrokarbon dalam kondisi lapisan *isolated* dan *laminated* dengan *tuning thickness*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada lapisan *isolated* dan *laminated* yang mengandung fluida air, minyak dan gas dengan mempertimbangkan pengaruh *tuning thickness*.
2. Data yang digunakan berupa data seismik sintetik *prestack* 2D tanpa mempertimbangkan pengaruh struktur geologi dan *noise*.
3. Data *log* yang digunakan telah dilakukan analisis dan perhitungan petrofisika oleh perusahaan.
4. Penelitian ini berfokus pada analisis sensitivitas parameter AVO, yaitu *intercept* dan *gradient*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu geofisika, khususnya pada bidang analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO). Secara teoritis, penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara variasi fluida, geometri lapisan *isolated* dan *laminated*, serta pengaruh *tuning thickness* terhadap respon parameter AVO *intercept* dan *gradient*. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian mengenai keterbatasan metode AVO pada kondisi reservoir berlapis tipis, sehingga dapat menjadi referensi dalam penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan analisis AVO dan *thin-bed reservoir*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kerangka Berpikir

Penelitian ini didasarkan pada permasalahan bahwa interpretasi anomali amplitudo seismik, khususnya *bright spot*, tidak selalu berkaitan langsung dengan keberadaan hidrokarbon karena dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti litologi, geometri lapisan, serta efek propagasi gelombang pada lapisan tipis. Untuk mengurangi ambiguitas tersebut, analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO) digunakan sebagai pendekatan yang lebih diagnostik karena memanfaatkan perubahan amplitudo terhadap sudut datang gelombang yang sensitif terhadap sifat elastik batuan dan fluida pori. Namun, pada kondisi lapisan tipis, respon AVO tidak hanya dikontrol oleh variasi fluida, tetapi juga oleh fenomena *tuning effect* dan geometri lapisan, khususnya pada konfigurasi *isolated* dan *laminated*, yang dapat menyebabkan interferensi gelombang dan memodifikasi amplitudo refleksi.

Dalam konteks fisika batuan, respon AVO dikendalikan oleh kontras parameter elastik, yaitu kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas (ρ), yang dipengaruhi oleh porositas, litologi, serta jenis fluida yang mengisi pori batuan. Perubahan fluida, terutama keberadaan gas, menyebabkan penurunan signifikan pada V_p dan densitas, sementara V_s relatif tidak berubah, sehingga menghasilkan perubahan rasio V_p/V_s yang berpengaruh terhadap nilai *intercept* dan *gradient* AVO. Di sisi lain, pada lapisan tipis dengan ketebalan mendekati $\frac{1}{4}\lambda$, efek *tuning* dapat memperkuat atau melemahkan amplitudo akibat interferensi refleksi dari batas atas dan bawah lapisan. Selain itu, pada lapisan *laminated*, interaksi antar lapisan tipis dapat menghasilkan respon seismik yang lebih kompleks dibandingkan lapisan

homogen (*isolated*), sehingga semakin mempersulit pemisahan efek fluida dan geometri lapisan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menganalisis sensitivitas parameter AVO, yaitu *intercept* dan *gradient*, terhadap variasi jenis fluida (air, minyak dan gas) pada kondisi lapisan *isolated* dan *laminated*, serta mengevaluasi pengaruh *tuning thickness* terhadap respon seismik yang dihasilkan. Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih jelas mengenai interaksi antara faktor fluida, geometri lapisan, dan fenomena propagasi gelombang dalam mengontrol respon AVO.

Berdasarkan kerangka berpikir yang telah diuraikan, dirumuskan beberapa hipotesis penelitian sebagai berikut :

1. Nilai parameter AVO, yaitu *intercept* dan *gradient*, berbeda untuk setiap jenis fluida (air, minyak dan gas), di mana fluida gas cenderung menghasilkan nilai *intercept* yang lebih rendah (negatif) akibat penurunan impedansi akustik.
2. Geometri lapisan *laminated* menghasilkan respon *intercept* dan *gradient* yang kurang merepresentasikan kontras elastik murni reservoir dibandingkan lapisan *isolated*, akibat interaksi dan interferensi antar lapisan tipis.
3. Efek *tuning thickness* dapat memperkuat atau memodifikasi respon AVO akibat variasi fluida, sehingga amplitudo yang dihasilkan tidak selalu merepresentasikan kondisi fluida secara langsung.
4. Parameter AVO (*intercept* dan *gradient*) memiliki tingkat sensitivitas yang berbeda terhadap jenis fluida, *intercept* lebih sensitif terhadap keberadaan gas, sedangkan *gradient* menunjukkan variasi sensitivitas yang lebih tinggi pada kondisi fluida minyak.

2.2 Penelitian Terdahulu

Adapun studi terdahulu yang relevan sehingga dapat dijadikan acuan penelitian lebih lanjut dapat dijelaskan oleh Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Penelitian terdahulu

Peneliti	Tahun	Bahasan
Xie, X., Fan, J., Zhang, Z., Shen, H., & Guo, N.	2017	Penelitian ini menjelaskan bahwa analisis <i>Amplitude Versus Offset</i> (AVO) pada model <i>wedge</i> dapat digunakan untuk mengkaji pengaruh ketebalan lapisan tipis terhadap respon AVO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa amplitudo refleksi mencapai nilai maksimum pada ketebalan seperempat panjang gelombang ($1/4\lambda$), yang dikenal sebagai kondisi <i>tuning thickness</i> . Selain itu, penelitian ini menjelaskan bahwa efek <i>tuning thickness</i> tidak mengubah kelas AVO, tetapi dapat meningkatkan magnitudo respon amplitudo sehingga kontras antara lapisan jenuh gas dan <i>brine</i> menjadi lebih jelas.
Mughal, M. R., & Akhter, G.	2020	Membuktikan bahwa penerapan <i>Fluid Replacement Modeling</i> (FRM) berbasis Persamaan Gassmann mampu merepresentasikan perubahan sifat elastik reservoir akibat variasi saturasi fluida. Perubahan tersebut ditunjukkan oleh penurunan V_p , densitas, serta perubahan rasio V_p/V_s , yang menghasilkan respon AVO lebih sensitif terutama pada <i>far offset</i> . Anomali amplitudo yang menguat dan kemunculan <i>phase reversal</i> pada zona <i>gas</i> menunjukkan bahwa integrasi FRM dan analisis AVO efektif untuk karakterisasi litologi dan identifikasi jenis fluida reservoir.

Peneliti	Tahun	Bahasan
Saeed, W., Zhang, H., Guo, Q., Ali, A., Azeem, T., Toqeer, M., Munawar, M. J., & Hussain, M	2020	Efek <i>tuning</i> pada lapisan tipis berpengaruh signifikan terhadap atribut AVO, khususnya <i>intercept</i> dan <i>gradient</i> . Kedua atribut mencapai nilai maksimum pada ketebalan <i>tuning</i> ($\lambda/4$) dan menurun pada ketebalan di bawah maupun di atasnya. Hasil ini menunjukkan bahwa interpretasi AVO harus mempertimbangkan <i>tuning thickness</i> karena amplitudo refleksi dipengaruhi tidak hanya oleh perubahan fluida, tetapi juga oleh interferensi refleksi <i>top</i> dan <i>base</i> lapisan tipis.
Liu, S., Song, W., Zhou, X., Yan, A., Wang, X., & Li, Y.	2022	Menjelaskan <i>tuning effect</i> pada reservoir tipis merupakan faktor dominan yang dapat memodifikasi karakteristik parameter AVO, baik <i>intercept</i> maupun <i>gradient</i> , akibat interferensi refleksi antara batas atas (<i>top</i>) dan batas bawah (<i>base</i>) lapisan. Efek interferensi ini dapat menyebabkan perubahan respon amplitudo terhadap <i>offset</i> sehingga karakteristik AVO asli menjadi tidak stabil. Pada kondisi ketebalan <i>tuning</i> , fenomena ini bahkan dapat menyebabkan AVO Kelas III dan IV pada reservoir yang sama. Kondisi tersebut ditunjukkan oleh respon amplitudo pada sudut kecil (<i>near gather</i>) yang cenderung memperlihatkan karakteristik AVO Kelas III, sedangkan pada sudut besar (<i>far gather</i>) berubah menjadi karakteristik AVO Kelas IV akibat perbedaan pengaruh <i>tuning</i> terhadap <i>near</i> dan <i>far offset</i> .

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, pengaruh *tuning thickness* terhadap respon AVO, khususnya parameter *intercept* dan *gradient*, telah dikaji pada lapisan tipis melalui pendekatan pemodelan (Xie dkk., 2017; Saeed dkk., 2020; Liu dkk., 2022). Selain itu, pengaruh variasi fluida terhadap sifat elastik batuan dan respon AVO juga

diteliti menggunakan *fluid replacement modeling* (FRM), yang menunjukkan bahwa perubahan fluida mempengaruhi V_p , densitas, dan rasio V_p/V_s menghasilkan anomali amplitudo yang lebih sensitif terhadap *offset* (Mughal & Akhter, 2020).

Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih membahas pengaruh fluida dan *tuning* secara terpisah serta menggunakan model lapisan homogen. Kajian yang mengintegrasikan pengaruh fluida, *tuning thickness*, dan geometri lapisan, khususnya pada kondisi *isolated* dan *laminated* reservoir, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis sensitivitas parameter AVO terhadap variasi fluida pada kedua model tersebut serta mengevaluasi pengaruh *tuning thickness* terhadap respon yang dihasilkan.

III. TEORI DASAR

3.1 *Petroleum System*

Petroleum system adalah suatu kesatuan yang mencakup batuan induk yang aktif beserta seluruh akumulasi minyak dan gas yang terkait, serta semua elemen dan proses penting yang memungkinkan terbentuknya akumulasi hidrokarbon. Elemen-elemen utama dalam sistem ini meliputi batuan induk, batuan reservoir, dan batuan penutup (*seal*), sedangkan proses yang terlibat meliputi pembentukan perangkap serta generasi, migrasi, dan akumulasi hidrokarbon. Penempatan elemen-elemen ini secara tepat dalam ruang dan waktu menjadi syarat agar akumulasi minyak dan gas dapat terbentuk secara optimal (Magoon & Dow, 1994). Gambar *petroleum system* terdapat pada Gambar 1.

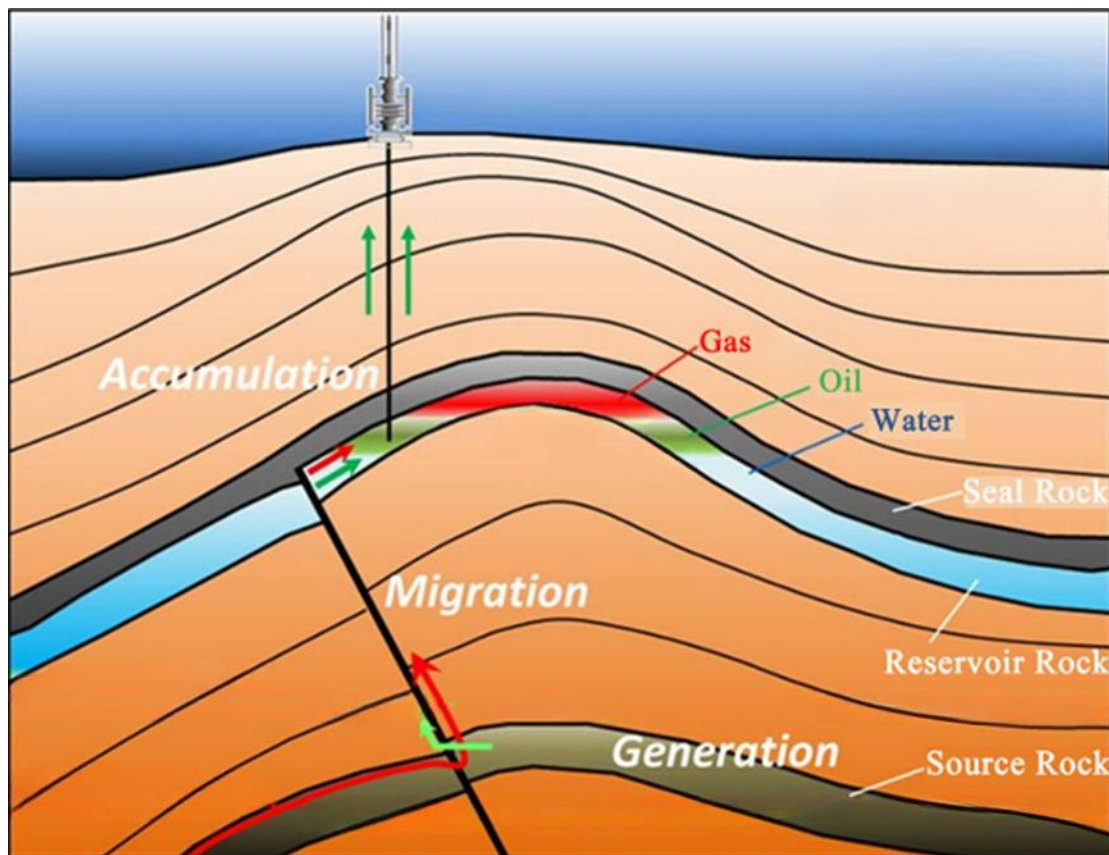
3.1.1 Batuan Sumber (*Source Rock*)

Batuan sumber (*source rock*) adalah batuan sedimen yang mengandung material organik dan memiliki potensi untuk menghasilkan petroleum. Batuan ini mengandung material organik dalam jumlah cukup untuk menghasilkan petroleum, tetapi baru menjadi batuan sumber efektif ketika menghasilkan gas bakteri pada temperatur rendah atau mencapai tingkat kematangan termal yang sesuai untuk menghasilkan petroleum (Magoon & Dow, 1994; Peters & Cassa, 1994; Tissot dkk., 1980).

3.1.2 Reservoir

Batuan reservoir merupakan batuan yang memiliki pori dan permeabilitas sehingga mampu menyimpan serta mengalirkan hidrokarbon. Keberadaan pori dan

jalur penghubung antar pori memungkinkan hidrokarbon terakumulasi dan bergerak di dalam reservoir. Secara umum, batuan reservoir dapat dibedakan menjadi reservoir konvensional dan nonkonvensional, dengan litologi yang umum berupa batupasir, karbonat, maupun batuan rapat (*tight rock*). Untuk memahami karakter reservoir, diperlukan analisis sifat batuan seperti porositas, permeabilitas, saturasi, dan sifat aliran melalui pengujian inti batuan (*core analysis*) (Alamooti & Malekabadi, 2018).



Gambar 1. *Petroleum system* (Islam & Lupin, 2020)

3.1.3 Batuan Penutup (*Seal*)

Batuan penutup adalah lapisan batuan yang memiliki ukuran pori sangat kecil dan hubungan antar porinya kurang baik, sehingga hidrokarbon sulit atau tidak dapat melewati lapisan tersebut. Persebaran batuan penutup ini sangat berpengaruh terhadap batas efektif suatu sistem petroleum. Jika lapisan penutup tidak ada, hidrokarbon dapat

terus bermigrasi hingga keluar ke permukaan. Oleh karena itu, batuan penutup memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga akumulasi hidrokarbon di bawah permukaan (Downey, 1994; Magoon & Dow, 1994).

3.1.4 Perangkap (*Trap*)

Perangkap (*trap*) merupakan suatu kondisi geologi di bawah permukaan yang terdiri atas batuan reservoir yang memiliki sifat berpori dan *permeabel*, serta tertutup oleh batuan penutup (*seal*) yang bersifat *impermeabel*, sehingga memungkinkan terakumulasinya minyak dan gas. Perangkap ini dapat terbentuk dalam berbagai jenis, antara lain perangkap konvensional seperti antiklin dan penutupan sesar, perangkap nonkonvensional seperti zona sinklinal, serta perangkap stratigrafi seperti *channel sand* dan *pinch-out*. Secara umum, *trap* merupakan konfigurasi struktur maupun stratigrafi yang melibatkan batuan reservoir sebagai tempat terakumulasinya hidrokarbon hasil migrasi (Islam & Lupin, 2020). Selain itu, perangkap juga dapat diartikan sebagai suatu lokasi di bawah permukaan dimana pergerakan hidrokarbon menuju permukaan terhenti akibat gaya apung (*buoyancy*) yang tidak lagi mampu mendorong minyak dan gas untuk bermigrasi lebih lanjut (Magoon & Dow, 1994).

3.1.5 Migrasi

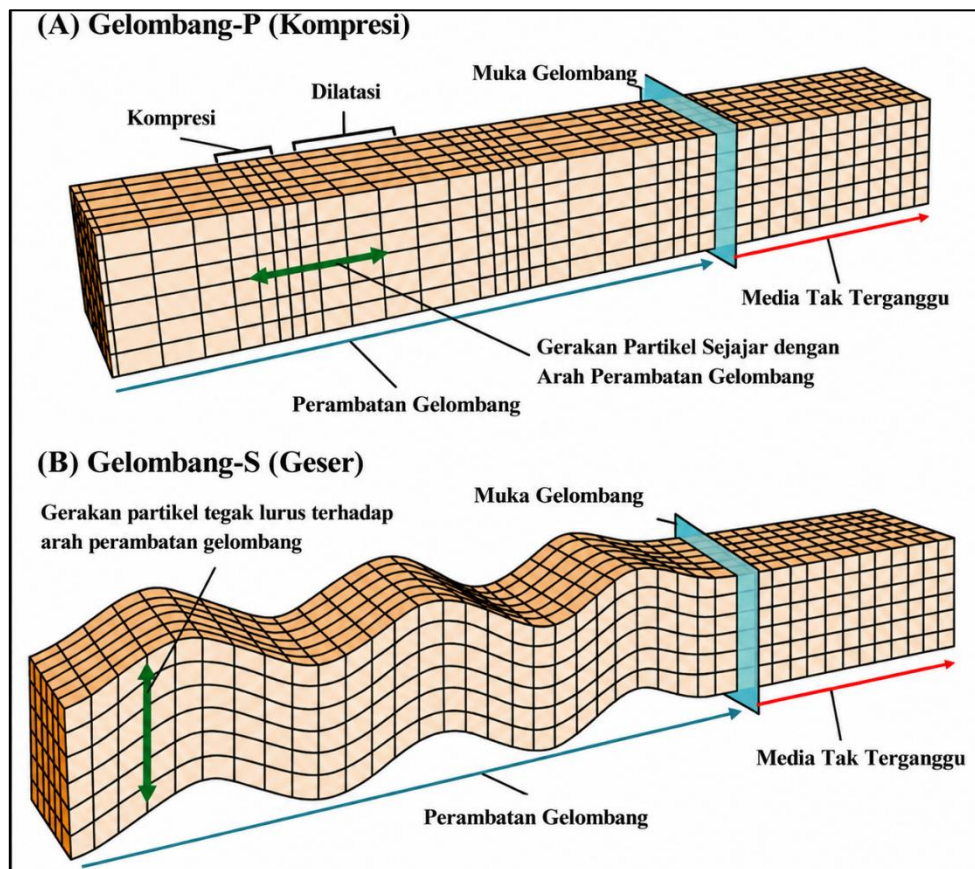
Migrasi hidrokarbon adalah proses pergerakan minyak dan gas dari batuan induk (*source rock*) ke batuan reservoir hingga akhirnya terakumulasi dalam perangkap geologi (Islam & Lupin, 2020; Schowalter, 1979).

3.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah bentuk rambatan energi yang terjadi di atas atau di bawah permukaan bumi yang muncul akibat adanya gangguan baik yang terjadi secara alami maupun buatan. Berdasarkan sumbernya, gelombang ini dapat diperoleh melalui dua pendekatan, yaitu metode aktif dan metode pasif. Pada metode aktif, sumber getaran berasal dari aktivitas yang sengaja diciptakan manusia, seperti peledakan

menggunakan dinamit. Sementara itu, metode pasif memanfaatkan sumber alami, seperti gempa bumi (Kamil, 2020).

Menurut Arintalofa (2021) gelombang seismik diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi yang terbagi menjadi gelombang P dan gelombang S. Gelombang P (Kompresi) merupakan gelombang yang paling cepat merambat. Gerakan partikel pada gelombang ini maju dan mundur searah dengan arah rambat gelombang, seperti gerakan dorong dan tarik. Gelombang S (Geser) memiliki arah rambat yang tegak lurus terhadap gerakan partikel, yaitu ke samping kanan dan kiri. Gelombang ini merambat lebih lambat dari gelombang P. Jenis gelombang badan dapat dilihat pada Gambar 2 (Cox dkk., 2020).



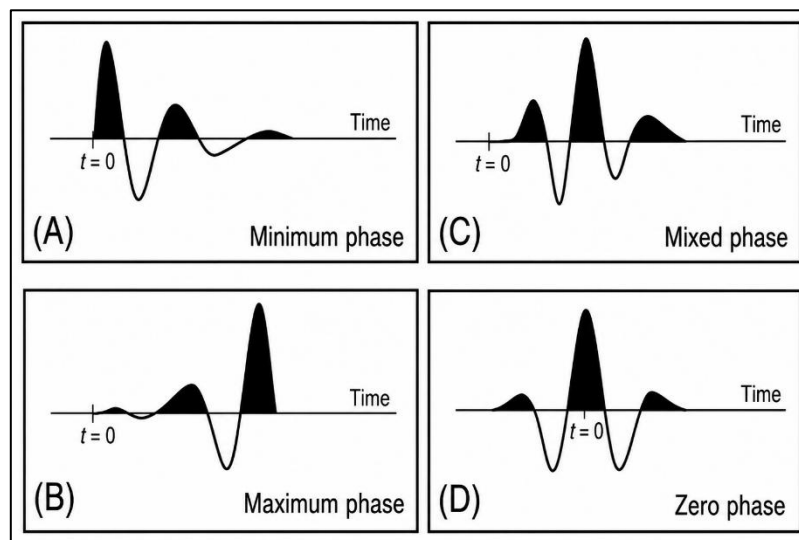
Gambar 2. Jenis-jenis gelombang seismik (Cox dkk., 2020)

3.3 Metode Seismik Refleksi

Metode seismik adalah teknik dalam geofisika eksplorasi yang bekerja dengan merekam getaran tanah menggunakan alat penerima (*receiver*). Getaran ini berasal dari gelombang seismik yang dipantulkan atau dibelokkan oleh lapisan batuan di bawah permukaan, setelah sebelumnya dipancarkan oleh sumber getaran (*source*) (Ustiawan dkk., 2019). Komponen-komponen seismik refleksi sebagai berikut.

3.3.1 Wavelet

Menurut Cox dkk. (2020) *wavelet* adalah pulsa satu dimensi (1D) yang dihasilkan oleh sumber seismik dan memiliki amplitudo, frekuensi, periode, dan fase yang dapat diukur. Karakteristik inilah yang menentukan karakter refleksi seismik yang terekam. Berdasarkan spesifikasi fase atau distribusi energi maksimumnya terdapat empat jenis *wavelet*, yaitu *minimum phase*, *mixed phase*, *zero phase*, dan *maximum phase* ilustrasinya terdapat pada Gambar 3. Energi *wavelet minimum phase* terkonsentrasi di bagian awal, *mixed phase* di bagian tengah, dan *maximum phase* di bagian akhir. Sementara itu, *wavelet zero phase* bersifat simetris dengan amplitudo maksimum pada waktu nol (Dondurur, 2018).



Gambar 3. Ilustrasi skematis dari *wavelet* (A) *minimum phase*, (B) *maksimum phase*, (C) *mixed phase*, (D) *zero phase* (Dondurur, 2018)

3.3.2 Impedansi Akustik

Impedansi Akustik adalah sifat khas dari batuan yang merupakan produk dari densitas (ρ) dan kecepatan gelombang kompresi (V) yang dinyatakan dalam Persamaan 1. Perubahan nilai impedansi akustik (IA) dapat menandakan perubahan karakteristik batuan seperti litologi, porositas kekerasan, dan kandungan fluida. IA dapat dianalogikan berbanding lurus terhadap kekerasan batuan dan berbanding terbalik dengan porositas (Alifudin dkk., 2016).

$$IA = \rho V_p \quad (1)$$

Keterangan:

IA : Impedansi akustik (m/s*g/cc)

ρ : Densitas (g/cc)

V_p : Kecepatan (m/s)

3.3.3 Koefisien Refleksi

Koefisien refleksi merupakan parameter yang menggambarkan seberapa besar energi gelombang yang dipantulkan pada batas impedansi. Koefisien refleksi berhubungan dengan perubahan impedansi akustik, dengan impedansi akustik (IA) merupakan hasil kali antara densitas (ρ) dan kecepatan (V) (Simm & Bacon, 2014). Koefisien refleksi diilustrasikan pada Gambar 4 dan dapat dinyatakan dengan Persamaan 2:

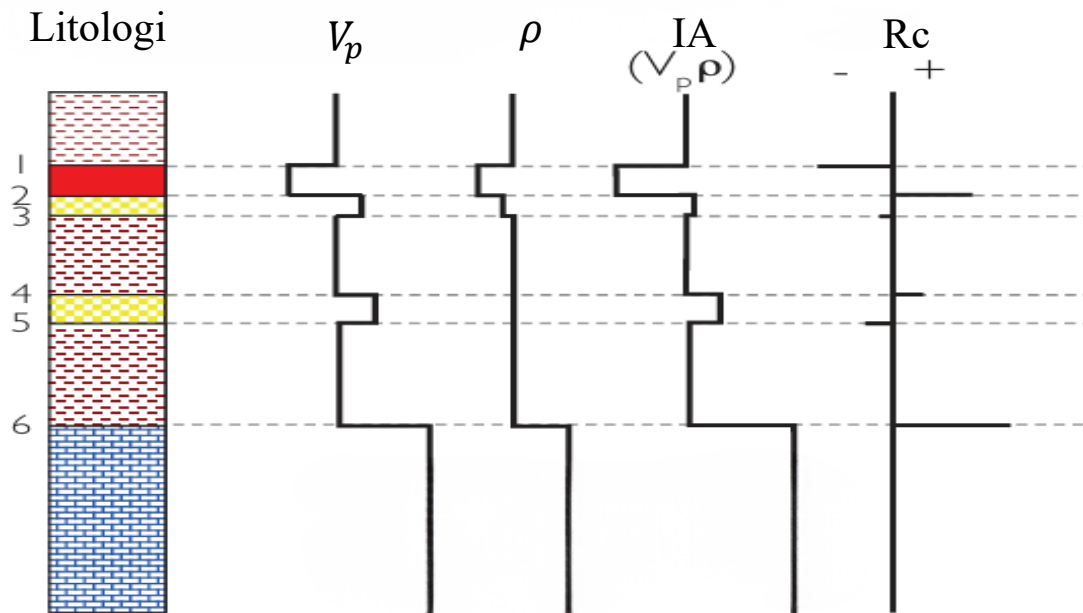
$$Rc = \frac{IA_2 - IA_1}{IA_2 + IA_1} \quad (2)$$

Keterangan:

Rc : Koefisien refleksi

IA_1 : Impedansi akustik gelombang datang

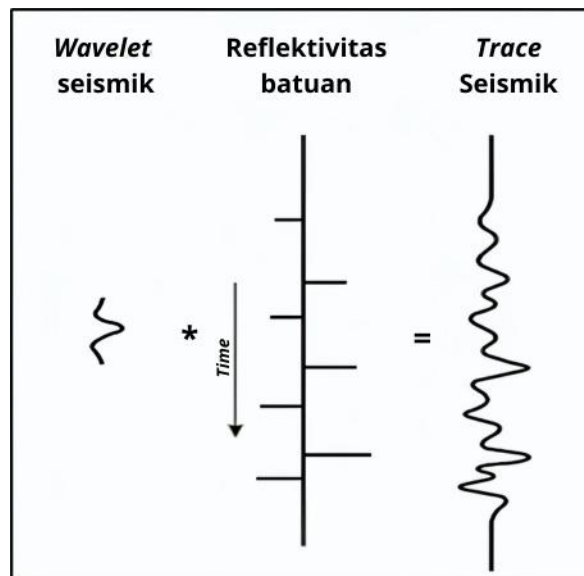
IA_2 : Impedansi akustik gelombang transmisi



Gambar 4. Koefisien refleksi mendefinisikan perbedaan IA pada batas litologi (Simm & Bacon, 2014)

3.3.4 Trace Seismik

Trace seismik merupakan hasil dari konvolusi antara *wavelet* seismik (w) dan reflektivitas batuan (r) yang diilustrasikan pada Gambar 5 dan dapat ditulis dengan Persamaan 3 (Nwafor & Hermana, 2022).



Gambar 5. Ilustrasi *trace* seismik modifikasi dari (Nwafor & Hermana, 2022)

$$S(t) = w(t) * r(t) \quad (3)$$

Keterangan:

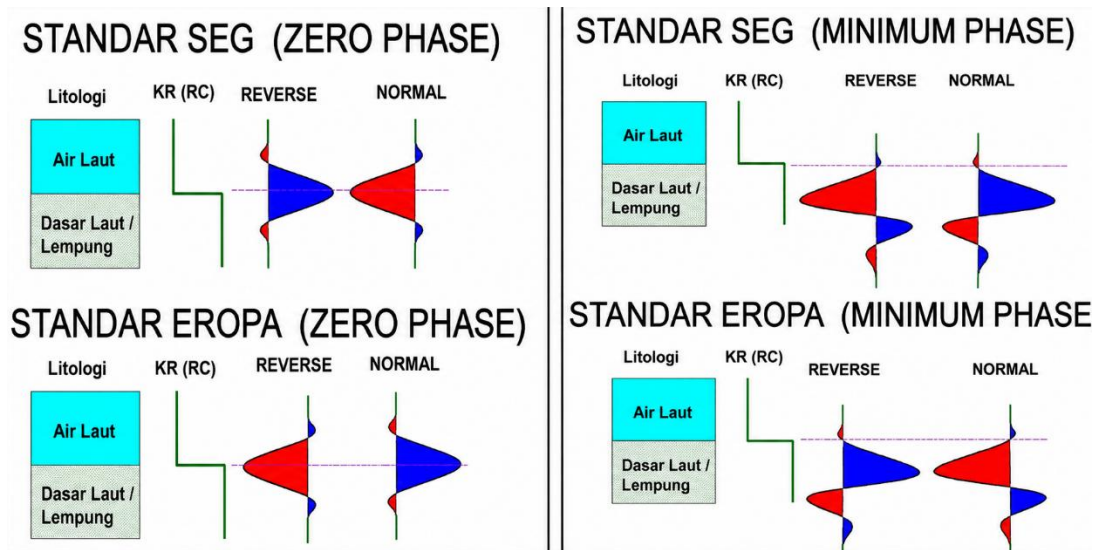
$S(t)$: Trace seismik

$w(t)$: Wavelet seismik

$r(t)$: Reflektivitas batuan

3.3.5 Polaritas dan *Phase*

Polaritas adalah asumsi tentang representasi koefisien refleksi sebagai bentuk gelombang yang memiliki nilai positif atau negatif. Karena pada dasarnya penggunaan polaritas hanya sebatas acuan untuk perekaman dan tampilan konvensi *display*. *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) mendefinisikan dua jenis konvensi polaritas yang digunakan untuk menampilkan data seismik dengan *wavelet* fase minimum atau fase nol, yaitu polaritas standar positif (polaritas Amerika) dan polaritas standar negatif (polaritas Eropa) (Cox dkk., 2020). Ilustrasi polaritas terdapat pada Gambar 6.



Gambar 6. Polaritas standar positif SEG (Amerika) dan standar negatif (Eropa) (Sukmono & Ambasari, 2019)

Pada penampilan polaritas positif Amerika menyatakan bahwa, peningkatan IA dengan bertambahnya kedalaman akan direkam sebagai amplitudo refleksi negatif dan

karenanya ditampilkan sebagai awal kompresi berupa *trough* (lembah) di sisi kiri. Sedangkan Polaritas Eropa atau tampilan polaritas terbalik mendefinisikan peningkatan IA sebagai puncak positif. Selain itu, kedua konvensi polaritas tersebut juga menentukan warna yang direkomendasikan untuk puncak dan lembah pada tampilan data seismik. Menurut standar SEG, pada tampilan polaritas positif Amerika, puncak berwarna biru dan lembah berwarna merah. Skema warna ini berlawanan untuk tampilan polaritas negatif SEG (Eropa) dengan puncak berwarna merah dan lembah berwarna biru (Cox dkk., 2020). *Phase* merupakan parameter yang menunjukkan hubungan posisi waktu antara *wavelet* seismik dan refleksi geologi yang direkam. *Phase* menentukan bentuk, posisi, serta pergeseran sinyal refleksi pada data seismik sehingga sangat mempengaruhi interpretasi amplitudo dan posisi reflektor (Yilmaz, 2001).

3.3.6 Resolusi Seismik

Cox dkk. (2020) menyatakan resolusi seismik adalah ukuran seberapa jauh dua batas geologi harus terpisah agar dapat terdeteksi sebagai peristiwa yang terpisah. Karakteristik resolusi vertikal pada data seismik cenderung menurun secara fungsi kedalaman. Hal ini disebabkan oleh hilangnya komponen frekuensi tinggi akibat absorpsi oleh formasi dangkal dan peningkatan kecepatan rambat gelombang (Cox dkk., 2020). Batas resolusi ini umumnya sekitar seperempat dari panjang gelombang dominan (Yilmaz, 2001), yang ditentukan oleh frekuensi *wavelet* dan kecepatan batuan, dengan Persamaan 4 merupakan panjang gelombang yang dinyatakan dengan berikut:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (4)$$

$$\text{Resolusi vertikal seismik} = \frac{\lambda}{4} = \frac{V}{4f}$$

Keterangan:

λ : Panjang Gelombang (m)

V : Kecepatan (m/s)

f : Frekuensi (Hz)

3.4 Analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO)

AVO bekerja berdasarkan konsep variasi amplitudo (meningkat atau menurun) terhadap *offset*, yang dapat dikaitkan dengan kandungan fluida pori reservoir dan sifat fisik batuan (Ostrander, 1984). Analisis AVO (*Amplitude Versus Offset*) merupakan salah satu pendekatan paling maju untuk mengidentifikasi zona yang jenuh gas secara tepat. Metode ini membantu membedakan kontras litologi, zona jenuh gas, kontak air dan gas, serta kejadian amplitudo terang (*bright events*), sehingga memberikan analisis hasil yang lebih menyeluruh (Gammaldi dkk., 2022; Russell dkk., 2003; Rutherford & Williams, 1989).

Persamaan dasar AVO pertama kali diperkenalkan oleh Zoeppritz (1919), yang menjelaskan hubungan koefisien refleksi dan transmisi terhadap sudut datang gelombang pada medium elastik berdasarkan parameter densitas, kecepatan gelombang P (V_p), dan kecepatan gelombang S (V_s) (Handoyo dkk., 2013). Persamaan ini dikenal sebagai Persamaan Zoeppritz atau dituliskan pada Persamaan 5.

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \phi_1 & -\sin \theta_2 & \cos \phi_2 \\ -\cos \theta_1 & \sin \phi_1 & -\cos \theta_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{p1}}{V_{s1}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{s2}^2 V_{p1}}{\rho_1 V_{s2} V_{p1}} \sin 2\phi_1 & -\frac{\rho_2 V_{s2} V_{p1}}{\rho_1 V_{s1}} \cos 2\phi_1 \\ \cos 2\phi_1 & -\frac{V_{s1}}{V_{p1}} \sin 2\phi_1 & -\frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} \cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ -\cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Keterangan :

R_p : Amplitudo gelombang-P refleksi

R_s : Amplitudo gelombang-S refleksi

T_p : Amplitudo gelombang-P transmisi

T_s : Amplitudo gelombang-S transmisi

V_p : Kecepatan gelombang-P (m/s)

V_s : Kecepatan gelombang-S (m/s)

θ_1 : Sudut datang gelombang-P ($^\circ$)

θ_2 : Sudut bias gelombang-P ($^\circ$)

ϕ_1 : Sudut pantul gelombang-S ($^\circ$)

ϕ_2 : Sudut bias gelombang-S ($^\circ$)

3.4.1 Aproksimasi Aki & Richards

Persamaan aproksimasi Aki & Richards (1980) merupakan bentuk penyederhanaan dari solusi Zoeppritz melalui proses linearisasi. Pada Persamaan ini, amplitudo refleksi gelombang-P dinyatakan ke dalam tiga suku (*three-term approximation*). Suku pertama berkaitan dengan perubahan kecepatan gelombang kompresi (V_p) pada dua lapisan yang dipisahkan oleh reflektor, suku kedua berkaitan dengan perubahan kecepatan gelombang geser (V_s), sedangkan suku ketiga berkaitan dengan perubahan densitas batuan (ρ). Persamaan tersebut ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$R(\theta) = \frac{1}{2\cos^2\theta} \frac{\Delta V_p}{V_p} - \left(4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2\theta\right) \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (6)$$

Dengan

$$\begin{aligned} \Delta V_p &= V_{p2} - V_{p1} & ; & & \Delta V_s &= V_{s2} - V_{s1} & ; & & \Delta\rho &= \rho_2 - \rho_1 \\ V_p &= \frac{V_{p1} + V_{p2}}{2} & ; & & V_s &= \frac{V_{s1} + V_{s2}}{2} \\ \rho &= \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} & ; & & \theta &= \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

Seluruh pendekatan tersebut bekerja dengan baik apabila perubahan relatif parameter elastik pada kedua sisi *interface* relatif kecil. Sebagai bentuk penyederhanaan, sudut datang gelombang umumnya digunakan sebagai pengganti sudut datang rata-rata. Namun, pendekatan ini dapat menghasilkan nilai yang menyimpang dari Persamaan Zoeppritz ketika sudut datang mendekati sudut kritis (Chopra dkk., 2014; Downton & Ursenbach, 2006). Selain itu, pada sudut lebih besar dari 35° , pendekatan Aki-Richards mulai menunjukkan deviasi terhadap solusi eksak,

meskipun hasilnya masih dianggap cukup baik dan masih dapat diterima. Sehingga Persamaan di atas dapat disusun ulang menjadi Persamaan 8.

$$R(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (8)$$

Keterangan:

$R(\theta)$: Koefisien refleksi gelombang P sebagai fungsi sudut datang (θ)

V_p : Kecepatan gelombang P (m/s)

V_s : Kecepatan gelombang S (m/s)

ΔV_p : Perubahan kecepatan gelombang P antar lapisan (m/s)

ΔV_s : Perubahan kecepatan gelombang S antar lapisan (m/s)

ρ : Densitas (g/cc)

$\Delta \rho$: Perubahan densitas antar lapisan (g/cc)

θ : Sudut datang gelombang seismik ($^\circ$)

Sehingga Persamaan 8 dapat disederhanakan sebagai Persamaan 9 berikut:

$$R(\theta) \approx A + B \sin^2 \theta + C (\sin^2 \theta \tan^2 \theta) \quad (9)$$

Perlu di ingat bahwa

$$\sin^2 \theta \tan^2 \theta = (1 - \cos^2 \theta) \tan^2 \theta \quad (10)$$

$$\sin^2 \theta \tan^2 \theta = \tan^2 \theta - \cos^2 \theta \tan^2 \theta$$

$$\sin^2 \theta \tan^2 \theta = \tan^2 \theta - \sin^2 \theta$$

Dengan

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (11)$$

$$B = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (12)$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (13)$$

Keterangan:

A : AVO *intercept* merupakan ukuran amplitudo pada sudut datang

B : AVO *gradient* merupakan ukuran variasi amplitudo terhadap *offset*

C : *Curvature* merupakan kelengkungan (*nonlinearitas*) perubahan amplitudo refleksi terhadap sudut datang atau *offset*

Dari hubungan tersebut dapat dilihat bahwa pada sudut kecil, suku ketiga pada Persamaan 8 mendekati orde keempat terhadap sinus sudut datang. Selain itu, nilai A-C sama dengan Persamaan 14.

$$A - C = \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (14)$$

Pada sudut datang kecil, kontribusi suku *curvature* relatif sangat kecil sehingga sering diabaikan. Oleh karena itu, (Chopra dkk., 2014; Wiggins dkk., 1983) menyederhanakan Persamaan tersebut dengan mengasumsikan rasio $V_s/V_p = 1/2$ dan menghilangkan suku *curvature*, sehingga diperoleh Persamaan dua-suku sebagai Persamaan 15 berikut:

$$\begin{aligned} R(\theta) &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta \\ &= R_p + (R_p - 2R_s) \sin^2 \theta \\ &= R_p + G \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (15)$$

Dengan

$$G = R_p - 2R_s \quad (16)$$

$$R_p = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (17)$$

$$R_s = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (18)$$

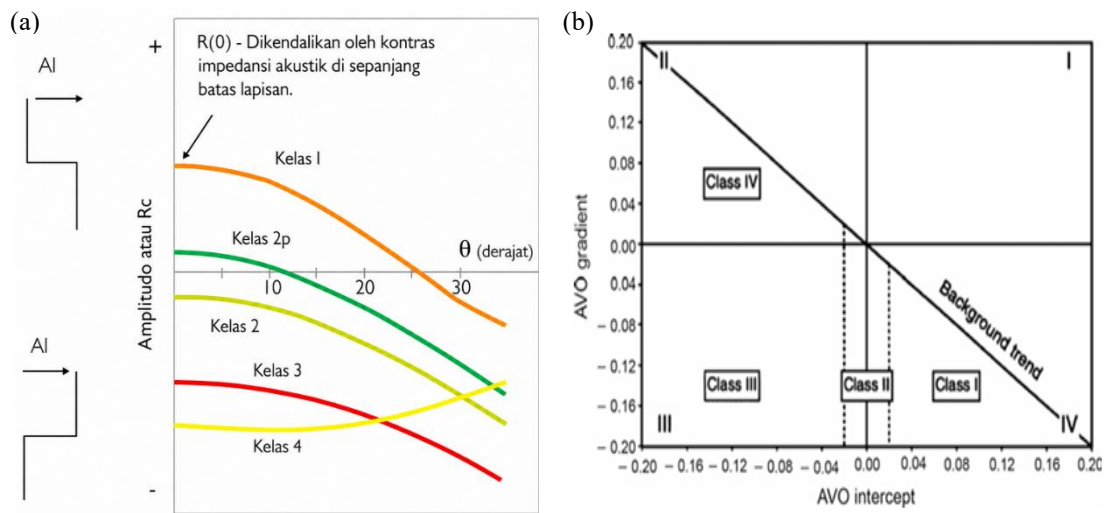
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa parameter R_p merepresentasikan *intercept*, sedangkan parameter G merepresentasikan *gradient* AVO. Pendekatan dua-suku ini menghasilkan hubungan linear terhadap $\sin^2 \theta$, sehingga lebih stabil dibandingkan Persamaan tiga suku. Selain itu, menunjukkan secara numerik bahwa rasio *signal-to-noise* pada Persamaan tiga suku lebih buruk dibandingkan ekstraksi dua suku, kecuali pada sudut datang yang sangat besar (Chopra dkk., 2014; Swan, 1991).

3.4.2 Klasifikasi AVO

Klasifikasi respon *Amplitude Versus Offset* (AVO) pada awalnya diperkenalkan oleh Rutherford & Williams (1989) yang membagi anomali pada antarmuka serpih batupasir gas ke dalam tiga kelas berdasarkan koefisien refleksi gelombang-P pada insiden normal, yaitu Kelas I, II, dan III. Seiring perkembangan studi AVO, klasifikasi tersebut kemudian disempurnakan oleh Ross & Kinman (1995) melalui penambahan Kelas Iip, serta oleh Castagna & Swan (1997) dengan mengembangkan klasifikasi tersebut berdasarkan posisi puncak lapisan pasir bergas pada *crossplot intercept* terhadap *gradient* pada Tabel 2. Berdasarkan pengembangan tersebut kelas-kelas AVO dapat diuraikan oleh Gambar 7.

Tabel 2. *Crossplot intercept* dan *gradient*

Kelas AVO	Impedansi Relatif	Kuadran	<i>Intercept</i>	<i>Gradient</i>
Kelas I	Batupasir berimpedansi tinggi	Kuadran IV	Positif (+)	Negatif (-)
Kelas II	Kontras impedansi mendekati nol	Kuadran III	Negatif (-)	Negatif (-)
Kelas Iip	Kontras impedansi mendekati nol	Kuadran IV	Positif (+)	Negatif (-)
Kelas III	Batupasir berimpedansi rendah	Kuadran III	Negatif (-)	Negatif (-)
Kelas IV	Batupasir berimpedansi rendah	Kuadran II	Negatif (-)	Positif (+)



Gambar 7. (a) Respon kurva AVO (b) *Crossplot* AVO (Castagna & Swan, 1997; Ross & Kinman, 1995; Rutherford & Williams, 1989)

Klasifikasi kelas AVO sebagai berikut:

1. Kelas 1 : Koefisien refleksinya bernilai positif pada zero *offset* sehingga memiliki *intercept* positif, kemudian amplitudonya menurun terhadap pertambahan *offset* sehingga menghasilkan *gradient* negatif.
2. Kelas II : Memiliki kontras impedansi akustik yang kecil sehingga memiliki *intercept* rendah dan *gradient* negatif yang kuat. Anomali ini sering sulit dikenali akibat pengaruh *noise* dan dapat muncul sebagai *dim spot*, *bright spot*, maupun pembalikan polaritas pada data stack.
3. Kelas Iip : Respon Kelas Iip dengan koefisien insiden normal kecil namun positif sebaiknya disebut Kelas Iip, karena terdapat pembalikan fasa (*phase reversal*) yang melekat pada respon tersebut, sedangkan istilah Kelas II sebaiknya dikhususkan untuk kasus dengan koefisien insiden normal kecil bernilai negatif.
4. Kelas III : Memiliki impedansi lebih rendah dibandingkan medium pengapitnya dan dikenal sebagai anomali *bright spot* klasik. Kelas ini memiliki *intercept* negatif dan *gradient* negatif sehingga menunjukkan reflektivitas tinggi pada seluruh *offset*.
5. Kelas IV : Kelas ini ditandai oleh amplitudo negatif yang besar pada zero *offset*, kemudian amplitudonya menjadi semakin kecil terhadap pertambahan *offset*.

3.5 Fluid Substitution

Metode *fluid substitution* merupakan metode penting untuk memprediksi sifat elastik batuan reservoir dan ketergantungannya terhadap fluida pori dan porositas. Metode ini memungkinkan prediksi perubahan respon elastik batuan akibat kejenuhan fluida yang berbeda (Gommessen dkk., 2002; Magoba & Opuwari, 2020). Metode substitusi fluida Gassmann merupakan salah satu model *rock physics* yang paling dikenal dan digunakan untuk memprediksi bagaimana gelombang P dan S berubah seiring dengan perubahan kejenuhan fluida (Magoba & Opuwari, 2020; Purnamasari dkk., 2014). Pemodelan perubahan sifat elastik dimungkinkan terutama karena sensitivitas modulus bulk yang sangat tinggi terhadap perubahan kejenuhan fluida (Bodunde & Enikanselu, 2019).

Pada proses *fluid substitution* kecepatan material isotropik diperkirakan menggunakan modulus bulk dan densitas dari data log. Besarnya kecepatan V_s dan V_p pada medium isotropik saat kondisi *insitu* diperkirakan dengan Persamaan 19 dan 21. Modulus geser (μ) dan modulus bulk (K_{sat}) pada kondisi *insitu* (awal) dapat diperkirakan dengan Persamaan 20 dan 22. Dalam formulasi Gassmann, modulus geser tidak bergantung pada fluida pori dan dijaga konstan selama substitusi fluida sehingga diperoleh Persamaan 23.

$$V_{Sinsitu} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (19)$$

$$V_{S^2insitu} = \frac{\mu}{\rho} \quad (20)$$

$$V_{pinsitu} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (21)$$

$$V_{p^2insitu} = \frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu}{\rho}$$

$$K_{sat} = V_{p^2insitu} \rho - \frac{4}{3}\mu$$

$$K_{sat} = Vp^2_{insitu} \rho - \frac{4}{3} Vs^2_{insitu} \rho$$

$$K_{sat} = \rho \left(Vp^2_{insitu} - \frac{4}{3} Vs^2_{insitu} \right) \quad (22)$$

$$\mu = \mu_{sat} = \mu_{dry} \quad (23)$$

Keterangan :

Vp_{insitu} : Kecepatan gelombang p dalam keadaan awal reservoir (m/s)

Vs_{insitu} : Kecepatan gelombang s (m/s)

ρ : Densitas medium (g/cc)

μ : Modulus geser (n/m²)

K_{sat} : Modulus bulk batuan jenuh fluida (N/m²)

Modulus bulk didefinisikan sebagai rasio antara tegangan hidrostatik dan regangan volumetrik yang diakibatkannya pada batuan (Adeoye dkk., 2022; Avseth dkk., 2005). Dengan kata lain, modulus bulk menggambarkan ketahanan material bumi terhadap tekanan. Semakin besar nilai modulus bulk, semakin kaku batuan tersebut. Modulus bulk batuan sangat sensitif terhadap perubahan saturasi fluida, sehingga pemodelan perubahan sifat seismik reservoir dapat dilakukan (Mughal & Akhter, 2020). Untuk mengamati perubahan sifat seismik (V_p , V_s , dan ρ) yang disebabkan oleh substitusi fluida, digunakan Persamaan Gassmann (1951) untuk kasus isotropik. Persamaan ini memberikan hubungan antara modulus bulk batuan berpori yang jenuh fluida (K_{sat}), modulus bulk rangka kering (K_{dry}), modulus bulk matriks batuan (K_m), porositas (ϕ), dan modulus bulk fluida pori (K_{fl}). Bentuk umum Persamaan Gassmann adalah sebagai Persamaan 24 berikut:

$$K_{sat} = K_{dry} + \left\{ \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_m} \right)^2}{\left(\frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{1 - \phi}{K_m} + \frac{K_{dry}}{K_m^2} \right)} \right\} \quad (24)$$

Keterangan:

K_{sat} : Modulus bulk batuan jenuh fluida (Pa)

K_{dry} : Modulus bulk batuan kering (Pa)

K_{fl} : Modulus bulk fluida awal batuan (Pa)

K_m : Modulus bulk matriks (mineral penyusun batuan) (Pa)

ϕ : Porositas

Menghitung K_m memerlukan informasi mineral penyusun batuan. Apabila data hasil laboratorium tidak tersedia, komposisi batuan umumnya diasumsikan tersusun atas mineral kuarsa (Qtz) dan *clay*. Persentase kandungan *clay* dapat diestimasi dari nilai log volume *shale* (V_{sh}). Setelah komposisi mineral diketahui, nilai K_m kemudian dihitung menggunakan metode rata-rata Voigt-Reuss-Hill (VRH) seperti pada Persamaan 25 (Kumar, 2006).

$$K_m = \frac{1}{2} \left([V_{clay} K_{clay} + V_{Qtz} K_{Qtz}] + \left[\frac{V_{clay}}{K_{clay}} + \frac{V_{Qtz}}{K_{Qtz}} \right] \right) \quad (25)$$

Keterangan:

K_{clay} : Modulus bulk mineral *clay* (20,9 GPa)

K_{Qtz} : Modulus bulk mineral *quartz* (36,6 GPa)

V_{clay} : Banyaknya kandungan *clay* pada batuan

V_{Qtz} : Banyaknya kandungan *quartz* pada batuan

Nilai densitas matriks (ρ_m) juga dapat ditentukan menggunakan Persamaan 26, yakni dengan menghitung rata-rata densitas dari setiap mineral penyusun batuan sebagai berikut:

$$\rho_m = V_{clay} \rho_{clay} + V_{Qtz} \rho_{Qtz} \quad (26)$$

Keterangan:

ρ_m : Densitas mineral matriks (g/cc)

ρ_{clay} : Densitas mineral *clay* (2,58 g/cc)

ρ_{Qtz} : Densitas mineral *quartz* (2,65 g/cc)

Besarnya nilai modulus bulk dan densitas fluida dapat dihitung menggunakan Persamaan 27 dan Persamaan 29 sebagai berikut.

$$S_{hc} = 1 - S_w \quad (27)$$

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_{hc}}{K_{hc}} \quad (28)$$

$$\rho_{fl} = S_w \rho_w + S_{hc} \rho_{hc} \quad (29)$$

Keterangan :

K_{fl} : Modulus bulk fluida awal batuan

S_w : Saturasi air (%)

S_{hc} : Saturasi hidrokarbon (%)

K_w : Modulus bulk air

K_{hc} : Modulus bulk hidrokarbon

ρ_{fl} : Densitas fluida

ρ_w : Densitas air

ρ_{hc} : Densitas hidrokarbon

Berdasarkan data log yang tersedia, nilai modulus bulk batuan kering (K_{dry}) dapat dihitung dengan Persamaan 30.

$$K_{dry} = \frac{K_{sat} \left(\frac{\phi K_m}{K_{fl}} + 1 - \phi \right) - K_m}{\frac{\phi K_m}{K_{fl}} + \frac{K_{sat}}{K_m} - 1 - \phi} \quad (30)$$

Setelah nilai modulus bulk batuan kering (K_{dry}) diperoleh, tahap selanjutnya adalah menghitung parameter elastik fluida yang diinginkan. Perhitungan modulus

bulk dan densitas fluida baru dilakukan menggunakan Persamaan 31 dan 32. Perhitungan nilai densitas fluida baru dapat menggunakan Persamaan 33.

$$\frac{1}{K_{fl(baru)}} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_{hc}}{K_{hc}} \quad (31)$$

$$\rho_{fl(baru)} = S_w \rho_w + S_{hc} \rho_{hc} \quad (32)$$

$$\rho_{sat} = \phi \rho_{fl} + (1 - \phi) \rho_m \quad (33)$$

Setelah nilai modulus bulk batuan jenuh (K_{sat}) diperoleh dari Persamaan 22, selanjutnya nilai kecepatan gelombang P (V_p) dan gelombang S (V_s) pada kondisi fluida baru hasil *fluid substitution* dapat dihitung menggunakan Persamaan 34 dan 35 berikut.

$$V_{p(baru)} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (34)$$

$$V_{s(baru)} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (35)$$

3.6 Fluid Replacement Modeling

Fluid Replacement Modeling (FRM) merupakan salah satu metode untuk memodelkan dan menganalisis respon seismik pada berbagai skenario fluida yang berbeda (Smith dkk., 2003). Teknik ini memberikan dampak signifikan pada studi atribut seismik karena memungkinkan interpreter menghasilkan respons seismik reservoir pada kondisi saturasi fluida yang bervariasi (Rizwan dkk., 2018; Singleton & Keirstead, 2011; Yuping dkk., 2010). Dalam FRM, fluida pori digantikan dari kondisi saturasi awal yang diketahui menuju tingkat saturasi baru, sehingga parameter akustik baru dapat dihitung secara teoritis. Integrasi fisika batuan (*rock physics*) sangat penting untuk memahami bagaimana sifat elastik seperti kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), densitas, impedansi, dan rasio V_p/V_s berubah akibat proses substitusi fluida (Grana dkk., 2012; Mavko dkk., 2009).

3.7 *Tuning Thickness Theory*

Ketebalan *tuning* (*tuning thickness*) merupakan batas ketebalan minimum suatu lapisan ketika dua reflektor yang berdekatan masih dapat dibedakan secara seismik. Secara umum, ketebalan *tuning* didefinisikan sebagai seperempat panjang gelombang ($\frac{1}{4}\lambda$) (Sheriff, 2002; Widess, 1973). Keduanya akan membentuk satu refleksi gabungan yang amplitudonya kira-kira sebanding dengan ketebalan lapisan tersebut. Lapisan tersebut secara efektif mengalami *tuning*, semakin tipis lapisan maka amplitudo gabungan akan semakin lemah, mendekati nol ketika ketebalan mendekati nol. Pada ketebalan nol, refleksi dari kedua batas akan saling tumpang tindih dengan polaritas berlawanan dan saling meniadakan (Amadi, 2025).

Fenomena ini umumnya terjadi ketika gelombang seismik yang merambat ke bawah dipantulkan oleh beberapa antarmuka yang jaraknya sangat berdekatan. Refleksi yang dihasilkan kemudian saling tumpang tindih (*superposisi*), sehingga energi gelombang pantul mengalami perubahan akibat interferensi. Kondisi ini menyebabkan amplitudo yang teramati tidak lagi sepenuhnya merepresentasikan respon geologi yang sebenarnya (Bustos dkk., 2020; Hamlyn, 2014). Pada kondisi ketebalan lapisan yang lebih kecil dari *tuning* (*below tuning*), refleksi dari batas atas dan bawah lapisan tidak dapat dipisahkan secara jelas, sehingga menyebabkan distorsi amplitudo dan penurunan resolusi vertikal. Akibatnya, perubahan ketebalan lapisan tidak lagi berbanding lurus dengan perubahan waktu refleksi yang teramati (Roden dkk., 2017).

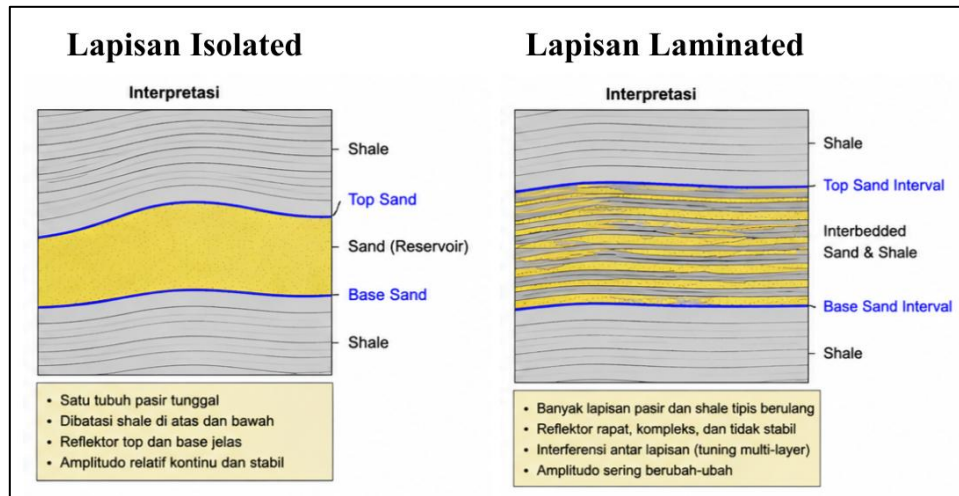
3.8 **Efek Jenis Fluida Terhadap Amplitudo**

Pengaruh jenis fluida terhadap karakter seismik akan tergantung pada impedansi akustik relatif dari reservoir dan litologi disekitar reservoir. Kehadiran hidrokarbon yang memiliki densitas dan kecepatan yang lebih rendah daripada air akan mengakibatkan turunnya impedansi akustik batuan reservoir. Berikut ini beberapa karakter seismik yang merupakan penanda dari efek jenis fluida (Guo dkk., 2015) :

1. *Bright spot* menunjukkan peningkatan amplitudo refleksi negatif akibat perubahan *water sand* menjadi pasir berisi gas atau minyak di bawah batuan penutup berimpedansi tinggi.
2. *Flat spot* merepresentasikan bidang kontak hidrokarbon air yang dicirikan oleh refleksi datar, memotong struktur sekitar, dan umumnya berpolaritas positif.
3. *Dim spot* terjadi ketika batuan penutup memiliki impedansi lebih rendah dibandingkan lapisan pasir di bawahnya, sehingga menghasilkan amplitudo refleksi yang lebih lemah.
4. *Polarity reversal* muncul saat impedansi batuan penutup lebih tinggi dari pasir hidrokarbon tetapi lebih rendah dari *water sand*, sehingga menyebabkan perubahan polaritas amplitudo.

3.9 Model *Isolated* dan *Laminated*

Struktur pengendapan memiliki pengaruh penting terhadap tipe pori, distribusi ukuran pori, porositas, dan permeabilitas pada *shale*. Struktur pengendapan pada *shale* merupakan karakter utama batuan sedimen yang menentukan sifat reservoir, dan mencakup perlapisan (*bedding*) serta laminasi. Lapisan *Isolated* adalah satu *sand body* yang secara internal kontinu, namun dibatasi oleh lapisan *mudstone* atau lapisan *impermeable* di atas dan di bawahnya (Yang dkk., 2023). Lapisan *laminated* adalah lapisan susunan batuan sangat tipis pasir dan serpih (*shale*/lempung) yang saling selang-seling pada skala mm–cm. Struktur ini membuat reservoir sangat heterogen secara vertikal, tetapi sering tetap baik untuk aliran horizontal dan penyimpanan hidrokarbon (Woo dkk., 2021). Ilustrasi model lapisan *isolated* dan *laminated* terdapat pada Gambar 8.



Gambar 8. Ilustrasi lapisan *isolated* dan *laminated*

3.10 Konsep Dasar *Welllogging*

3.10.1. Log Gamma ray

Log gamma ray (GR) merupakan log yang merekam intensitas radiasi alami yang berasal dari formasi batuan. Log ini umum digunakan karena kemampuannya yang efektif dalam membedakan lapisan yang bersifat permeabel dan tidak permeabel. Pengukuran gamma ray mencakup total radiasi yang dipancarkan, yang dikenal sebagai log gamma ray total, serta kontribusi spesifik dari unsur radioaktif seperti kalium (K), uranium (U), dan thorium (Th), yang disebut sebagai log gamma ray spektral (Rider, 1996).

3.10.2. Log *Resistivity*

Log resistivitas (R_t) merupakan jenis log yang digunakan untuk merekam variasi nilai tahanan jenis formasi batuan sepanjang lubang bor. Prinsip pengukurannya didasarkan pada pengaliran arus listrik ke dalam formasi, kemudian diukur beda potensial yang dihasilkan untuk menentukan nilai resistivitas batuan. Resistivitas sendiri didefinisikan sebagai kemampuan suatu batuan dalam menghambat aliran arus listrik yang melaluinya (Darling, 2005). Kemampuan batuan dalam menghantarkan arus listrik sangat dipengaruhi oleh kandungan fluida dan porositasnya. Nilai resistivitas yang rendah menunjukkan bahwa batuan mampu menghantarkan arus

listrik dengan baik, umumnya karena adanya fluida konduktif di dalam pori-porinya. Sebaliknya, resistivitas yang tinggi mengindikasikan bahwa batuan kurang mampu menghantarkan arus listrik secara efektif (Harsono, 1997).

3.10.3. Log Densitas

Log densitas merupakan rekaman kontinu densitas massa formasi yang mencakup matriks batuan dan fluida dalam pori. Nilai densitas dipengaruhi oleh jenis mineral penyusun dan volume pori yang terisi fluida. Log ini digunakan untuk menentukan porositas, densitas fluida atau hidrokarbon, serta menghitung impedansi akustik. Selain itu, secara kualitatif log densitas juga dapat digunakan sebagai indikator litologi, termasuk untuk identifikasi mineral, kandungan organik, serta deteksi tekanan berlebih dan porositas rekahan (Rider, 1996).

3.10.4. Log Neutron Porosity

Log neutron merupakan salah satu jenis log porositas yang digunakan untuk mengestimasi kandungan hidrogen dalam suatu formasi. Pada kondisi formasi bersih (tanpa kandungan serpih), di mana ruang pori terisi oleh fluida seperti air atau minyak, log neutron merepresentasikan porositas fluida yang dinyatakan sebagai (PHIN atau NPHI). Hal ini disebabkan karena hidrogen dalam formasi umumnya terkonsentrasi pada fluida yang mengisi pori-pori, sehingga kehilangan energi yang terdeteksi dapat dikorelasikan secara langsung dengan besarnya porositas batuan (Asquith dkk., 2004).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Tempat dan waktu pelaksanaan penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut:

Tempat : Pertamina Hulu Rokan Regional 1

Alamat : Jl. Prof. Satrio Kav.3, Karet Kuningan, Setiabudi, Jakarta Selatan

Tanggal : Januari – Juni 2026

Jadwal pelaksanaan kegiatan tugas akhir dapat dilihat pada Tabel 3.

4.2 Alat dan Bahan

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini digunakan alat dan bahan yang tercantum pada Tabel 4.

Tabel 4. Alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Laptop	Digunakan sebagai media untuk mengolah data yang memerlukan komputasi tinggi, serta dimanfaatkan juga sebagai perangkat untuk interpretasi data dan penyusunan hasil penelitian maupun laporan.
2	RokDock 2023	Digunakan untuk proses <i>fluid substitution</i> untuk memperoleh parameter elastik batuan, pembuatan model 2D dan pembuatan <i>synthetic seismogram</i> .
3	<i>Hampson Russel</i>	Digunakan untuk proses AVO analisis yang bertujuan untuk mendapatkan parameter <i>intercept</i> dan <i>gradient</i> .
4	<i>Microsoft Excel</i>	Digunakan untuk pencatatan data yang diperoleh dari proses <i>fluid substitution</i> .
5	<i>Microsoft Word</i>	Digunakan sebagai sarana penyusunan dan penulisan dalam penelitian tugas akhir.
6	Data Sumur	Digunakan untuk memperoleh parameter elastik batuan

4.3 Prosedur Penelitian

4.3.1 Input Data

Tahap awal yang dilakukan dalam penelitian adalah menginput data sumur untuk mengidentifikasi zona prospek reservoir sebagai interval target penelitian. Identifikasi ini dilakukan melalui pendekatan *quick look* menggunakan beberapa log sumur, meliputi gamma ray, resistivitas, neutron *porosity*, dan densitas. Berdasarkan hasil analisis tersebut, interval reservoir yang prospektif selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses *fluid substitution*, yaitu penggantian fluida pori sesuai skenario kasus yang diteliti.

4.3.2 *Fluid Substitution*

Tahap *fluid substitution* dilakukan pada interval reservoir yang telah teridentifikasi dari analisis data sumur untuk mensimulasikan perubahan sifat elastik batuan akibat pergantian fluida pori. Proses ini menggunakan pendekatan Persamaan Gassmann, dengan mengganti fluida awal reservoir ke beberapa skenario fluida yang menjadi fokus penelitian, seperti kondisi tersaturasi air, minyak dan gas. Dengan nilai proporsi fluida meliputi lapisan tersaturasi air 100%, tersaturasi minyak 80% +air 20% dan kondisi tersaturasi gas 90% + air 10%. Melalui proses ini diperoleh parameter elastik baru berupa kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas, yang merepresentasikan respon batuan terhadap masing-masing kondisi saturasi fluida. Hasil *fluid substitution* selanjutnya digunakan sebagai *input* pada model 2D.

4.3.3 Pembuatan Model 2D

Pembuatan model 2D bawah permukaan dilakukan untuk merepresentasikan geometri sederhana lapisan batuan yang terdiri atas *seal* dan reservoir sebagai dasar analisis respon seismik. Pada model ini, interval reservoir diberikan nilai parameter elastik batuan berupa kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas yang diperoleh dari hasil analisis data sumur serta proses *fluid substitution*. Model 2D ini bertujuan untuk mensimulasikan bagaimana perubahan sifat elastik pada reservoir akibat variasi fluida memengaruhi koefisien refleksi dan karakter amplitudo terhadap *offset* (AVO). Dengan pendekatan ini, respon AVO untuk setiap skenario fluida dapat diamati secara lebih terkontrol, sehingga memudahkan interpretasi sensitivitas anomali amplitudo terhadap perubahan jenis fluida reservoir.

4.3.4 *Fluid Replacement Modeling*

Tahap *Fluid Replacement Modeling* (FRM) dilakukan setelah proses *fluid substitution* untuk memodelkan respon elastik reservoir pada berbagai skenario fluida. Pada tahap ini, parameter elastik hasil substitusi, yaitu V_p , V_s , dan densitas, digunakan untuk membangun model sifat batuan pada interval reservoir sesuai kondisi air, minyak

dan gas. Model ini bertujuan untuk menghasilkan representasi perubahan impedansi akustik dan kontras elastik pada batas *seal* reservoir, sehingga respon amplitudo terhadap perubahan sudut datang gelombang dapat diamati.

Hasil dari FRM selanjutnya diintegrasikan ke dalam model seismik 2D *Prestack*, sehingga dapat dihasilkan *synthetic gather* untuk setiap skenario fluida. Melalui model *Prestack* ini dilakukan analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO) untuk mengevaluasi perubahan *intercept*, *gradient*, serta klasifikasi anomali amplitudo akibat variasi fluida reservoir.

4.3.5 Analisis AVO

Tahap analisis *Amplitude Versus Offset* (AVO) dilakukan pada data sintetik 2D *Prestack* seismik setelah proses *Fluid Replacement Modeling* (FRM). Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan amplitudo refleksi terhadap variasi *offset* atau sudut datang gelombang pada setiap skenario fluida reservoir. Pendekatan yang digunakan adalah aproksimasi Aki Richard *two term*, sehingga diperoleh parameter utama berupa *intercept* yang merepresentasikan koefisien refleksi pada sudut datang nol derajat, serta *gradient* yang menunjukkan laju perubahan amplitudo terhadap bertambahnya sudut datang. Nilai *intercept* dan *gradient* hasil setiap skenario fluida (air, minyak dan gas) selanjutnya dibandingkan untuk mengevaluasi sensitivitas respon AVO terhadap variasi jenis fluida reservoir. Analisis ini digunakan untuk menentukan fluida yang menghasilkan perubahan paling signifikan pada karakter amplitudo terhadap *offset*.

4.3.6 Analisis Sensitivitas Parameter AVO terhadap Variasi Fluida

Analisis sensitivitas merupakan metode yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter *input* terhadap respon *output* model. Dalam penelitian ini, analisis sensitivitas bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar pengaruh variasi fluida terhadap perubahan sifat elastik batuan dan atribut *amplitude versus offset*, khususnya *intercept* dan *gradient*. Pendekatan yang digunakan adalah membandingkan nilai properti batuan pada kondisi awal (*baseline*) jenuh air dengan

kondisi setelah dilakukan substitusi fluida (minyak dan gas). Sensitivitas *intercept* dan *gradient* dalam penelitian ini dihitung menggunakan Persamaan 36 dan 37.

$$Sensitivity_A = \frac{A_{air} - A}{A_{air}} \quad (36)$$

$$Sensitivity_B = \frac{B_{air} - B}{B_{air}} \quad (37)$$

Keterangan :

A_{air} : Nilai *intercept* batuan pada kondisi jenuh air (*baseline*)

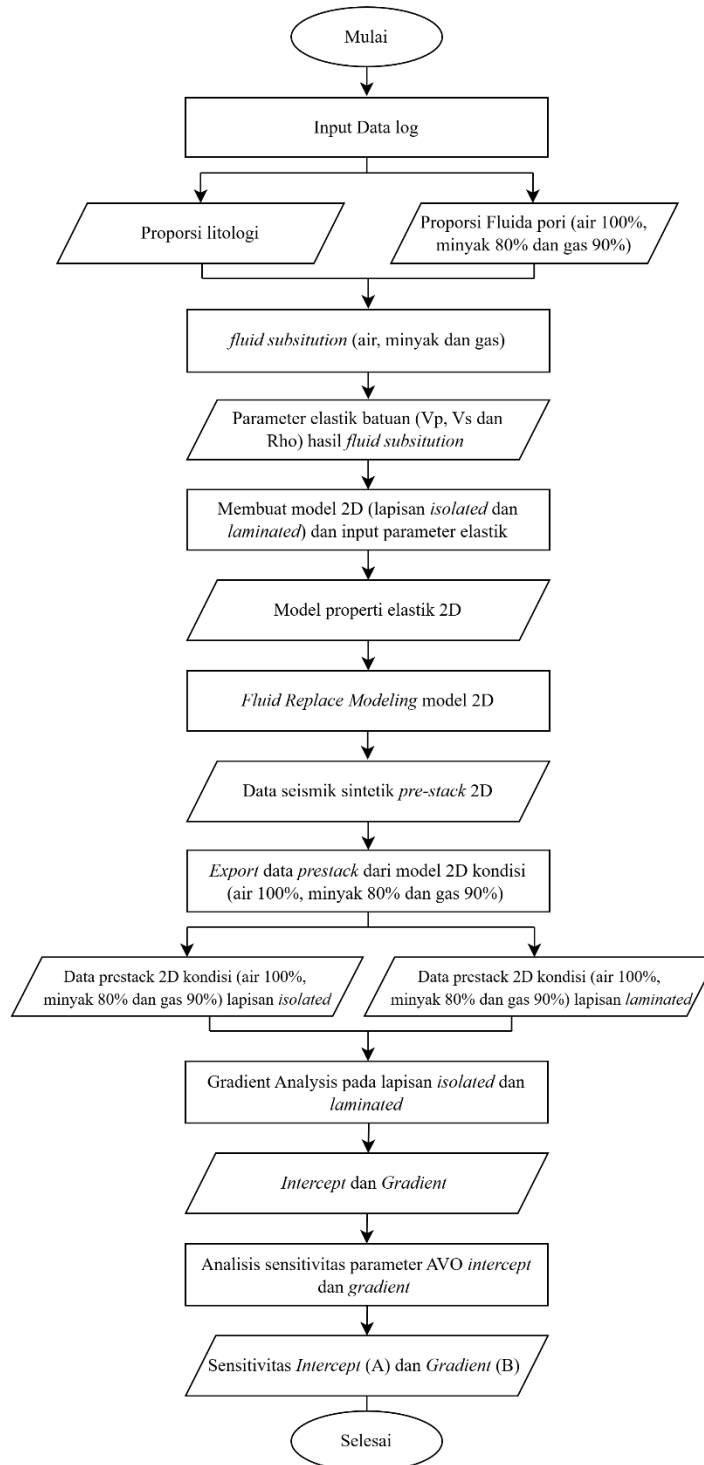
A : Nilai *intercept* batuan saat fluida diganti (minyak atau gas)

B_{air} : Nilai *gradient* batuan pada kondisi jenuh air (*baseline*)

B : Nilai *gradient* batuan saat fluida diganti (minyak atau gas)

4.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian terdapat pada diagram alir pada Gambar 9



Gambar 9. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian tugas akhir sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil analisis AVO, nilai *intercept* menunjukkan tren yang menurun dari kondisi air, minyak, hingga gas. Kondisi reservoir tersaturasi air 100% menghasilkan nilai *intercept* tertinggi dengan rentang 0,0407 hingga 0,0934, kondisi reservoir tersaturasi minyak 80% menghasilkan *intercept* lebih rendah dengan rentang 0,0225 hingga 0,0562, sedangkan kondisi reservoir tersaturasi gas 90% menghasilkan *intercept* paling rendah yang bernilai negatif akibat penurunan impedansi akustik reservoir dengan rentang -0,0324 hingga -0,0079 . Sementara itu, nilai *gradient* menunjukkan nilai negatif di semua kondisi fluida dengan tren yang berlawanan, di mana kondisi tersaturasi air 100% menghasilkan nilai *gradient* yang paling kecil dengan rentang -0,0193 hingga -0,0804, kondisi reservoir tersaturasi minyak 80% menunjukkan nilai *gradient* yang lebih besar dengan nilai -0,0559 hingga -0,1206, dan kondisi tersaturasi gas 90% menghasilkan nilai *gradient* yang paling besar dengan nilai -0,0589 hingga -0,2205.
2. Respon AVO tidak hanya dipengaruhi oleh variasi fluida, tetapi juga oleh geometri lapisan. Model *isolated* menghasilkan nilai *intercept* yang lebih besar dan *gradient* yang lebih negatif karena lebih merepresentasikan kontras impedansi akustik reservoir. Sebaliknya, model *laminated* menunjukkan respon yang telah dimodifikasi oleh efek *tuning* dan interferensi antar lapisan tipis, sehingga nilai *intercept* dan *gradient* menjadi lebih teredam.

3. Pada kondisi *below tuning*, interferensi antara refleksi *top* dan *base* menyebabkan amplitudo teredam, sehingga nilai *intercept* dan *gradient* menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi *above tuning*, di mana kontras impedansi masih dapat terekam secara lebih jelas.
4. Parameter *intercept* merupakan indikator yang lebih sensitif dan efektif dalam mendeteksi keberadaan hidrokarbon khususnya gas, karena secara langsung merepresentasikan perubahan impedansi akustik reservoir. Sebaliknya, parameter *gradient* lebih merefleksikan perubahan sifat elastik batuan dan karakter litologi sehingga sensitivitasnya terhadap variasi fluida relatif lebih rendah. Karakteristik ini secara konsisten ditunjukkan pada seluruh model reservoir, baik *isolated above tuning*, *laminated above tuning*, *isolated below tuning*, maupun *laminated below tuning*.

6.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan variasi frekuensi dan fase *wavelet* guna mengkaji pengaruh resolusi seismik terhadap respon AVO pada lapisan tipis dan kondisi *tuning thickness*. Selain itu, variasi saturasi fluida, porositas, dan kandungan serpih (*shale*) dapat ditambahkan untuk mengetahui perubahan sensitivitas parameter *intercept* dan *gradient* pada berbagai kondisi reservoir. Analisis AVO juga dapat dikombinasikan dengan data *poststack* dan inversi impedansi akustik agar hubungan antara respon AVO dan karakteristik reservoir dapat dipahami secara lebih menyeluruh. Lebih lanjut, penggunaan data seismik *prestack* lapangan (*real case*) pada suatu cekungan (*basin*) perlu dilakukan guna menghasilkan penelitian yang lebih representatif dan mendekati kondisi bawah permukaan yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeoye, T. O., Sunmonu, L. A., Adabanija, M. A., & Bayowa, O. G. (2022). Fluid Substitution-Based Reservoir Studies and Seismic Response in ‘Vyshion’ Field, Niger Delta. *Ilorin Journal of Science*, 9(1), 70–85.
- Aki, K., & Richards, P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods* (Nomor v. 1). Freeman. <https://books.google.co.id/books?id=Ku7OxQEACAAJ>
- Alamooti, A. M., & Malekabadi, F. K. (2018). Chapter One-An Introduction to Enhanced Oil Recovery. Dalam A. Bahadori (Ed.), *Fundamentals of Enhanced Oil and Gas Recovery from Conventional and Unconventional Reservoirs* (hlm. 1–40). Gulf Professional Publishing.
- Alifudin, R. F., Lestari, W., Syaifuddin, F., & Haidar, M. W. (2016). Karakterisasi Reservoir Karbonat dengan Aplikasi Seismik Atribut dan Inversi Seismik Impedansi Akustik. *Jurnal Geosaintek*, 2(2), 107. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v2i2.1924>
- Amadi, C. (2025). Hidden Potential: The Impact of Seismic Tuning on Gas Volumes Estimation: Case Study of a Tertiary Reservoir, Onshore Niger Delta. *Open Journal of Geology*, 15(11), 809–825.
- Arintalofa, V. (2021). Analisa Mikrotremor Menggunakan Metode HVSR untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai V_p . *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*.
- Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic Well Log Analysis* (Vol. 16). American Association of Petroleum Geologists Tulsa.

- Avseth, Per., Mukerji, Tapan., & Mavko, Gary. (2005). *Quantitative Seismic Interpretation : Applying Rock Physics Tools to Reduce Interpretation Risk*. New York: Cambridge University Press.
- Bodunde, S. S., & Enikanselu, P. A. (2019). Integration Of 3D-Seismic and Petrophysical Analysis With Rock Physics Analysis in the Characterization of SOKAB Field, Niger delta, Nigeria. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(2), 899–909.
- Bustos, V. O., Abarca-del-Rio, R., Belmonte-Pool, A., & Miller, M. (2020). Evaluation of Thickness Estimation Techniques in Seismically Thin Beds. *Obras y proyectos*, (28), 6–11.
- Castagna, J. P., & Swan, H. W. (1997). Principles of AVO Crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.
- Chopra, S., Castagna, J. P., & of Exploration Geophysicists, S. (2014). *AVO*. Society of Exploration Geophysicists. <https://books.google.co.id/books?id=9YOfwgEACAAJ>
- Cox, D. R., Newton, A. M. W., & Huuse, M. (2020). An Introduction to Seismic Reflection Data: Acquisition, Processing and Interpretation. Dalam *Regional Geology and Tectonics: Volume 1: Principles of Geologic Analysis* (hlm. 571–603). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64134-2.00020-1>
- Darling, T. (2005). *Well Logging and Formation Evaluation*. Elsevier.
- Dondurur, D. (2018). Chapter 6 - Deconvolution. Dalam D. Dondurur (Ed.), *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data* (hlm. 313–363). Elsevier.
- Downey, M. W. (1994). *Hydrocarbon Seal Rocks*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Downton, J. E., & Ursenbach, C. (2006). Linearized Amplitude Variation with *Offset* (AVO) Inversion with Supercritical Angles. *Geophysics*, 71(5), E49–E55.
- Gammaldi, S., Ismail, A., & Zollo, A. (2022). Fluid Accumulation Zone By Seismic Attributes and Amplitude Versus *Offset* Analysis at Solfatara Volcano, Campi Flegrei, Italy. *Frontiers in Earth Science*, 10, 866534.

- Gassmann, F. (1951). Elastic Waves Through A Packing Of Spheres. *Geophysics*, 16(4), 673–685.
- Gommessen, L., Mavko, G., Mukerji, T., & Fabricius, I. L. (2002). Fluid Substitution Studies for North Sea Chalk Logging Data. *SEG International Exposition and Annual Meeting*, SEG–2002.
- Grana, D., Pirrone, M., & Mukerji, T. (2012). Quantitative Log Interpretation and Uncertainty Propagation of Petrophysical Properties and Facies Classification From Rock-Physics Modeling and Formation Evaluation Analysis. *Geophysics*, 77(3), WA45–WA63.
- Guo, Q., Islam, N., & Pennington, W. D. (2015). Tuning of Flat Spots with Overlying Bright Spots, Dim Spots, and Polarity Reversals. *Interpretation*, 3(3), SS37–SS48.
- Hamlyn, W. (2014). Thin Beds, Tuning, and AVO. *The Leading Edge*, 33(12), 1394–1396.
- Handoyo, M. N., Setyawan, A., & Muhammad, M. (2013). Analisis AVO untuk Mengetahui Penyebaran Hidrokarbon Berdasarkan Faktor Fluida (Studi Kasus Lapangan “H” Formasi Talang Akar Cekungan Jawa Barat Utara). *Indonesian Journal Of Applied Physics*, 3(02), 209–215.
- Harsono, A. (1997). Evaluasi Formasi dan Aplikasi Log: Edisi Revisi-8. *Schlumberger Oil Services: Indonesia*.
- Islam, M. R., & Lupin, J. H. (2020). A Review On Hydrocarbon Prospectivity In Chittagong Hill Tracts And Adjacent Area. *Open Journal of Geology*, 10(02), 187–212.
- Kamil, I. (2020). Pemodelan Struktur Kecepatan Seismik Gelombang P (V_p), Kecepatan Seismik Gelombang S (V_s) Dan V_p/V_s Pada Daerah Vulkanik Kabupaten Tanggamus Berdasarkan Tomografi Seismik Menggunakan Data Microearthquake (Meq) Desember 1992 – Februari 1993. Dalam Skripsi. Institut Teknologi Sumatera.
- Kumar, D. (2006). A Tutorial on Gassmann Fluid Substitution: Formulation, Algorithm and Matlab Code. *Geohorizons*, 4–12.

- Liu, S., Song, W., Zhou, X., Yan, A., Wang, X., & Li, Y. (2022). AVO Detuning Effect Analysis Based on Sparse Inversion. *Energies*, 15(14), 5202.
- Magoba, M., & Opuwari, M. (2020). Petrophysical Interpretation And Fluid Substitution Modelling Of The Upper Shallow Marine Sandstone Reservoirs in the Bredasdorp Basin, Offshore South Africa. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(2), 783–803.
- Magoon, L. B., & Dow, W. G. (1994). *The Petroleum System*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge University Press.
- Mughal, M. R., & Akhter, G. (2020). Amplitude Variation With *Offset* (AVO) Analysis Via Fluid Replacement Modeling (FRM) for Characterizing the Reservoir Response of Cretaceous Sand Interval. *Nafta-Gaz*, 76.
- Nwafor, B. O., & Hermana, M. (2022). Harmonic Extrapolation of Seismic Reflectivity Spectrum for Resolution Enhancement: an Insight From Inas Field, Offshore Malay Basin. *Applied Sciences*, 12(11), 5453.
- Ostrander, W. J. T. (1984). Plane-Wave Reflection Coefficients for Gas Sands at Nonnormal Angles of Incidence. *Geophysics*, 49(10), 1637–1648.
- Peters, K. E., & Cassa, M. R. (1994). *Applied Source Rock Geochemistry*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- Purnamasari, I. A., Khairy, H., Abdeldayem, A. L., & Ismail, W. (2014). Rock Physics Modeling and Fluid Substitution Studies in Sandstone Reservoir. *Journal of Applied Sciences*, 14(11), 1180–1185.
- Rider, M. (1996). *The Geological Interpretation of Well Logs; 2*. Rider-French Consulting Ltd.
- Rizwan, M., Akhter, G., Mustafa, A., Bin Nisar, U., & Ashfaq, K. (2018). Amplitude Versus *Offset* (AVO) Modelling and Analysis for Quantitative Interpretation Of Porosity and Saturation: A Case Study for Sawan Gas Field, Middle Indus Basin, Pakistan. *Geofisica Internacional*, 57(2), 151–160.

- Roden, R., Smith, T. A., Santogrossi, P., Sacrey, D., & Jones, G. (2017). Seismic Interpretation Below Tuning With Multiattribute Analysis. *The Leading Edge*, 36(4), 330–339.
- Ross, C. P., & Kinman, D. L. (1995). Nonbright-Spot AVO: Two Examples. *Geophysics*, 60, 1398–1408.
- Russell, B. H., Hedlin, K., Hilterman, F. J., & Lines, L. R. (2003). Fluid-Property Discrimination with AVO: A Biot-Gassmann Perspective. *Geophysics*, 68(1), 29–39.
- Rutherford, S. R., & Williams, R. H. (1989). Amplitude-Versus-Offset Variations in Gas Sands. *Geophysics*, 54(6), 680–688.
- Saeed, W., Zhang, H., Guo, Q., Ali, A., Azeem, T., Toqeer, M., Munawar, M. J., & Hussain, M. (2020). An Integrated Petrophysical-Based Wedge Modeling and Thin Bed AVO Analysis for Improved Reservoir Characterization of Zhujiang Formation, Huizhou Sub-Basin, China: A Case Study. *Open Geosciences*, 12(1), 256–274.
- Schowalter, T. T. (1979). Mechanics of Secondary Hydrocarbon Migration and Entrapment. *AAPG Bulletin*, 63(5), 723–760.
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists.
- Simm, R., & Bacon, M. (2014). *Seismic Amplitude: An Interpreter's Handbook*. Cambridge University Press.
- Singleton, S., & Keirstead, R. (2011). Calibration of Prestack Simultaneous Impedance Inversion Using Rock Physics. *The Leading Edge*, 30(1), 70–78.
- Smith, T. M., Sondergeld, C. H., & Rai, C. S. (2003). Gassmann Fluid Substitutions: A Tutorial. *Geophysics*, 68(2), 430–440.
- Sukmono, S., & Ambasari, D. S. (2019). *Practical Seismic Interpretation for Petroleum Exploration*. ITB Press.
- Swan, H. W. (1991). Amplitude-Versus-Offset Measurement Errors in A Finely Layered Medium. *Geophysics*, 56(1), 41–49. <https://doi.org/10.1190/1.1442956>

- Tissot, B. P., Demaison, G., Masson, P., Delteil, J. R., & Combaz, A. (1980). Paleoenvironment and Petroleum Potential of Middle Cretaceous Black Shales in Atlantic Basins. *AAPG Bulletin*, *64*, 2051–2063.
- Ustiawan, A. B., Nainggolan, T. B., & Setyawan, R. (2019). Interpretasi Struktur Geologi Di Laut Aru Selatan, Maluku Berdasarkan Data Seismik 2D Multi Channel. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, *2*(2), 53–60.
- Widess, M. B. (1973). How Thin Is a Thin Bed? *Geophysics*, *38*(6), 1176–1180. <https://doi.org/10.1190/1.1440403>
- Wiggins, R., Kenny, G. S., & McClure, C. D. (1983). *A Method for Determining and Displaying the Shear-Velocity Reflectivities of A Geologic Formation*. European Patent Application, 113944.
- Woo, J., Lee, H. S., Ozyer, C., & Rhee, C. W. (2021). Effect of Lamination on Shale Reservoir Properties: Case Study of the Montney Formation, Canada. *Geofluids*, *2021*(1), 8853639.
- Xie, X., Fan, J., Zhang, Z., Shen, H., & Guo, N. (2017). Quantitative Analysis of AVO Tuning Effect For A Single Thin Bed. *SEG International Exposition and Annual Meeting*, SEG–2017.
- Yang, Z., Wang, S., Chen, J., & Jing, S. (2023). Architecture, Genesis, and the Sedimentary Evolution Model of A Single Sand Body in Tight Sandstone Reservoirs: A Case From The Permian Shan-1–He 8 Members in the Northwest Ordos Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, *10*, 1003818.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation Of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists.
- Yuping, S., Yunguang, T., Tianqi, W., guangpo, C., & Jian, L. (2010). AVO Attributes Interpretation and Identification of Lithological Traps by Prestack Elastic Parameters Inversion—A Case Study in K Block, South Turgay Basin. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, *29*(1), 439–443.
- Zoeppritz, R. (1919). On the Reflection and Propagation of Seismic Waves. *Göttinger Nachrichten*, *1*, 66–68.