

## BAB III

### DASAR TEORI

Metode seismik merupakan metode geofisika yang sangat populer dalam eksplorasi hidrokarbon. Ketepatan dan resolusi tinggi dalam memodelkan struktur litologi bawah permukaan menjadikan metode ini unggul dibandingkan dengan metode lainnya. Dukungan teknologi yang canggih serta pesatnya penelitian dalam metode ini menjadi faktor kunci kesuksesan metode ini.

Pemetaan struktur bawah permukaan menggunakan metode seismik dilakukan dengan memberikan energi gelombang ke dalam bumi dan menganalisis hasil pantulannya. Metode seismik dibedakan menjadi dua yaitu metode seismik refraksi dan metode seismik refleksi. Metode yang banyak digunakan dalam bidang eksplorasi hidrokarbon adalah metode seismik refleksi.

#### III.1. Sinyal dan Sistem

Sinyal adalah besaran fisika yang berubah menurut waktu, atau variabel-variabel bebas lainnya. Secara matematis, sinyal adalah fungsi dari satu atau lebih variabel bebas. Sinyal dapat diklasifikasikan menjadi (*Brustle, 1986*):

- a. Sinyal riil dan sinyal kompleks. Sinyal riil adalah sinyal yang bernilai bilangan nyata, contoh :  $S_t = A \sin 3 \pi t$ , sedangkan sinyal kompleks adalah sinyal yang berisi bilangan kompleks, contoh :  $S_t = A e^{j3\pi t} = A \cos 3 \pi t + j \sin 3 \pi t$ .
- b. Sinyal *multi channel* dan sinyal *single channel*. Sinyal *multi channel* adalah sinyal yang terdiri dari kumpulan sinyal-sinyal independen (komposit), sedangkan *single channel* adalah sinyal tunggal.
- c. Sinyal multi dimensi dan sinyal satu dimensi. Sinyal multi dimensi adalah sinyal yang terdiri lebih dari satu variabel bebas, sedangkan sinyal satu dimensi adalah sinyal dengan variabel bebas tunggal.
- d. Sinyal waktu kontinu (*continous time*) adalah sinyal dengan variabel independen (variabel bebas) bernilai riil. Sinyal waktu diskrit (*discrete*

*time*) adalah sinyal dengan variable independen (variabel bebas) bernilai *integer*. Contohnya adalah sebagai berikut :

$$x(t) = e^{-|t|}, -\infty < t < \infty \quad \rightarrow \text{Sistem kontinyu}$$

$$x(n) \begin{cases} 0.8^n, n \geq 0 \\ 0, \text{otherwise} \end{cases} \quad \rightarrow \text{Sistem diskret}$$

Secara umum sistem didefinisikan sebagai gabungan atau kombinasi unsur-unsur yang tersusun secara tertentu sehingga suatu input atau gangguan akan menyebabkan tanggapan (respon) atau *output* yang karakteristik. Berdasarkan sifat-sifatnya sistem fisika dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Sistem menentu (*deterministic system*), yaitu bila untuk setiap *input*  $x(t)$  ada suatu *output*  $y(t)$  yang unik (tertentu), tidak boleh tidak. Sebagai lawannya tentu ada sistem yang tidak menentu (*non deterministic system*). Sistem tak menentu masih menarik bila *output*-nya mempunyai sifat statistik tertentu, yang berarti mempunyai keboleh-jadian yang tertentu. Sistem seperti ini dikenal sebagai *probabilistic system*.
- b. Sistem tak antisipatif (*nonantisipative system*), yaitu bila *output* sekarang tidak bergantung pada *input* yang akan datang. Jadi input pada saat  $t_0$ ,  $y(t_0)$  sepenuhnya hanya ditentukan oleh input  $x(t)$  untuk  $t \leq t_0$ . Ini merupakan hubungan sebab akibat yang normal. Sebagai lawannya tentu ada sistem antisipatif, yang berarti sistem sudah mempunyai *output* sebelum ada *input* (hubungan sebab akibat yang tidak normal). Sistem antisipatif mempunyai *output* yang bersifat prediksi atau ramalan.
- c. Sistem terealisasikan (*realizable system*), yaitu bila ada *input*  $x(t)$  yang riil akan ada *output*  $y(t)$  yang juga riil. Lawannya yaitu sistem yang tak terealisasikan sulit dijelaskan dan dicarikan contohnya.
- d. Sistem linier, yaitu bila *input*  $x_1(t)$  memberikan *output*  $y_1(t)$ , *input*  $x_2(t)$  memberikan *output*  $y_2(t)$ , *input*  $x_3(t)$  memberikan *output*  $y_3(t)$ , maka *input*  $x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t) + c_3 x_3(t)$  akan memberikan *output*  $y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) + c_3 y_3(t)$ , dengan  $c_1, c_2, c_3$  adalah konstan. Hal ini sesuai dengan

**Universitas Indonesia**

prinsip superposisi. Untuk sistem nonlinier, prinsip superposisi ini tidak berlaku.

- e. Sistem tak berubah waktu (*time invariant system*), yaitu bila hubungan antara *input* dan *output* tidak bergayut atau bergantung waktu. Bila *input*  $x(t)$  memberikan *output*  $y(t)$ , maka *input*  $x(t - \tau)$  akan memberikan *output*  $y(t - \tau)$ .

### III.2 Sinyal Seismik

Sinyal seismik merupakan suatu fungsi yang menggambarkan amplitudo getaran tanah terhadap waktu. Sinyal tersebut dapat juga dinyatakan dalam kawasan frekuensi melalui suatu transformasi. Sinyal ini merupakan kumpulan dari sejumlah gelombang harmonik yang mempunyai frekuensi, amplitudo dan fasa tertentu. Suatu gelombang harmonik dapat dilihat secara khusus melalui 3 karakter gelombang, yaitu amplitudo, frekuensi, dan fasa. Dengan demikian sinyal seismik dapat dinyatakan pula dalam dua spektrum yaitu spektrum amplitudo *versus* frekuensi dan fasa *versus* frekuensi.

Sebuah *wavelet* seismik akan tajam dalam kawasan waktu (mempunyai durasi pendek) apabila ia mengandung semua frekuensi (lebar dalam kawasan frekuensi), dan sebaliknya suatu *wavelet* seismik akan lebar dalam kawasan waktu (durasi panjang) jika ia mempunyai pita frekuensi yang sempit.

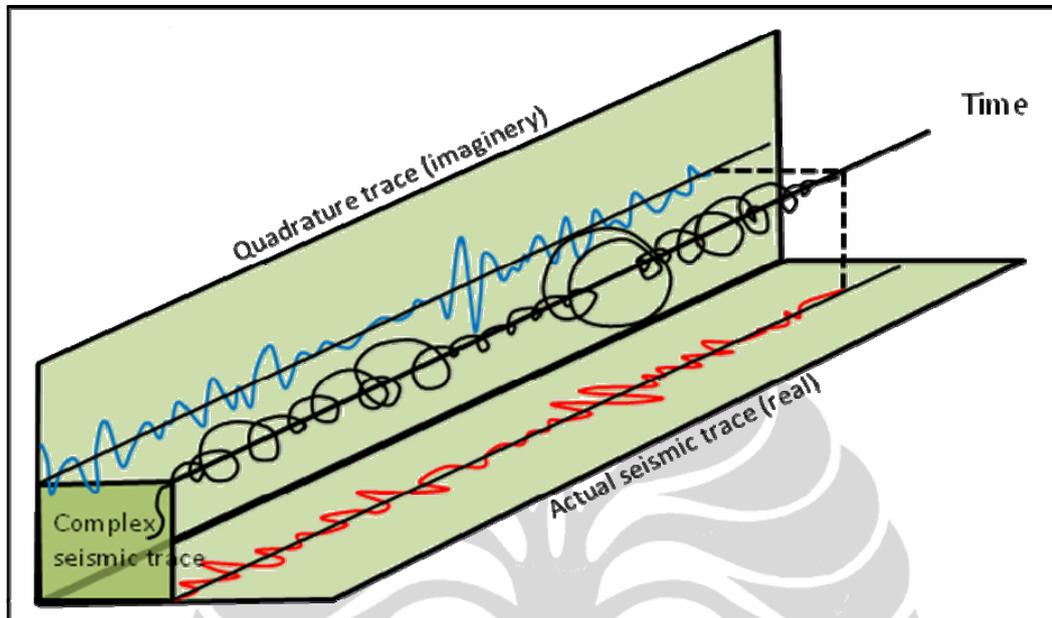
Karakteristik suatu sinyal seismik dapat dilihat melalui spektrum amplitudo dan spektrum fasa. Spektrum amplitudo dan spektrum fasa mengandung informasi kondisi dan sifat sinyal tersebut. Spektrum fasa yang ada di dalam seismik bentuknya sangat bergantung pada :

1. Sumber energi yang digunakan.
2. Karakteristik bumi
3. Instrumen perekaman
4. Pemrosesan data.

Karakteristik bumi muncul akibat bumi bertindak sebagai filter yang kompleks.

Sinyal seismik merupakan sinyal yang kompleks, sehingga dalam pengolahan data seismik, sinyal seismik harus diperlakukan sebagai sinyal yang kompleks. Sebuah *trace* seismik  $f(t)$  merupakan bagian riil dari *trace* kompleks

(Gambar 3.1)  $F(t) = f(t) + jf^*(t)$ .  $f^*(t)$  merupakan komponen imajiner (kuadratur atau konjugasi) dari *trace* kompleks. (Sheriff, 1984).



Gambar 3.1. *Trace* kompleks, bagian riil dan imajiner

Bagian riil *trace* kompleks  $f(t)$ , dapat dinyatakan dalam persamaan yang melibatkan perubahan amplitudo terhadap waktu  $A(t)$  dan perubahan fasa terhadap waktu  $\theta(t)$  seperti berikut :

$$f(t) = A(t) \cos \theta(t) \quad 3.1$$

sedangkan untuk bagian imajinernya :

$$f^*(t) = A(t) \sin \theta(t) \quad 3.2$$

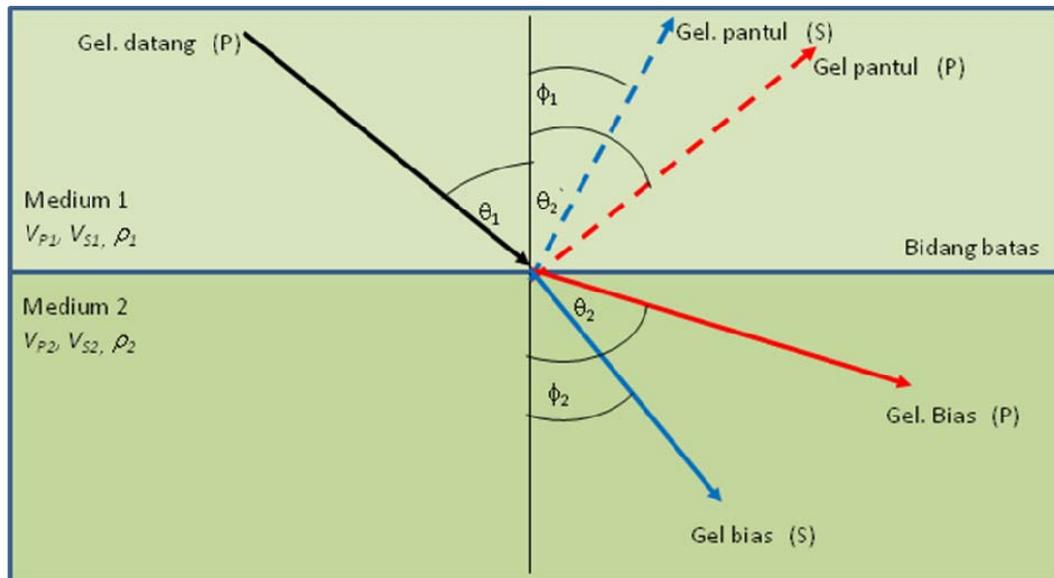
Sehingga persamaan *trace* kompleksnya menjadi :

$$F(t) = f(t) + jf^*(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad 3.3$$

### III.3 Hukum Snellius pada Gelombang Seismik

Gelombang seismik yang melewati bidang batas antara dua medium dengan densitas dan kecepatan yang berbeda, maka sebagian gelombang tersebut akan dipantulkan (*reflected*) dan sebagian lagi akan dibiaskan (*refracted*).

Jika suatu gelombang P melintasi bidang batas antara dua medium isotropik, maka gelombang tersebut sebagian dipantulkan sebagai gelombang P dan S dan sebagian dibiaskan sebagai gelombang P dan S (Gambar 3.2).



Gambar 3.2. Pemantulan dan pembiasan pada bidang batas dua medium

Dari gambar 3.2, menurut hukum Snellius antara sudut datang  $i$ , sudut pantul  $\theta_1'$  dan sudut bias  $\theta_2$  memenuhi persamaan seperti berikut:

$$\frac{\sin \theta_1}{V_{P1}} = \frac{\sin \theta_1'}{V_{P1}} = \frac{\sin \theta_2}{V_{P2}} = \frac{\sin \phi_1}{V_{S1}} = \frac{\sin \phi_2}{V_{S2}} = p, \quad 3.4$$

dengan  $\theta_1$  = Sudut datang gelombang P,  $\theta_1'$  = Sudut pantul gelombang P,

$\theta_2$  = Sudut bias gelombang P,  $\phi_1$  = Sudut pantul gelombang S,

$\phi_2$  = Sudut bias gelombang S,  $p$  = Parameter gelombang,

$V_{P1}$  = Kecepatan gelombang P pada medium pertama,

$V_{P2}$  = Kecepatan gelombang P pada medium kedua,

$V_{S1}$  = Kecepatan gelombang S pada medium pertama,

$V_{S2}$  = Kecepatan gelombang S pada medium kedua,

### III.4 Koefisien Refleksi dan Transmisi

Perbandingan antara amplitudo gelombang pantul dengan amplitudo gelombang datang disebut koefisien refleksi. Sedangkan koefisien refleksi sudut datang nol adalah besarnya koefisien refleksi untuk gelombang yang datang tegak lurus terhadap bidang pemantulan (Gambar 3.3)

Koefisien refleksi gelombang P pada sudut datang nol  $R_0$  adalah :

$$R_0 = \frac{A_1}{A_0} = \frac{\rho_2 V_{P2} - \rho_1 V_{P1}}{\rho_1 V_{P1} + \rho_2 V_{P2}}, \quad 3.5$$

$$R_0 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad 3.6$$

$$Z = \rho V_p, \quad 3.7$$

dengan

$R_0$  = koefisien refleksi sudut datang nol,  $A_1$  = amplitudo gelombang pantul,

$A_0$  = amplitudo gelombang datang,  $\rho_2$  = densitas medium 2,

$V_{P1}$  = kecepatan gelombang P medium 1,  $\rho_1$  = densitas medium 1,

$V_{P2}$  = kecepatan gelombang P medium 2.

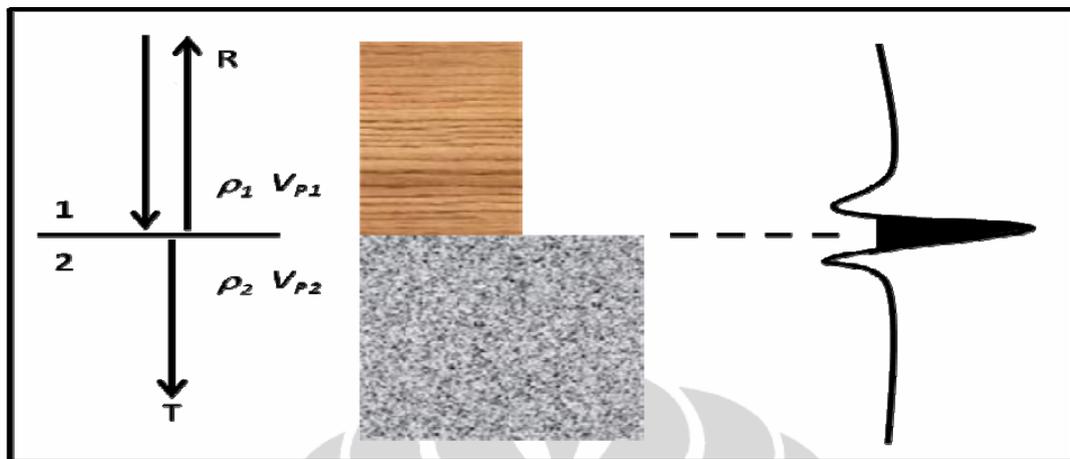
Sedangkan koefisien transmisi adalah perbandingan antara amplitudo gelombang bias dengan amplitudo gelombang datang yaitu :

$$T_0 = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad 3.8$$

$T_0$  = koefisien transmisi sudut datang nol

$Z_1$  = impedansi akustik lapisan 1

$Z_2 = \text{acoustic impedance lapisan 1}$



Gambar 3.3 Koefisien refleksi sudut datang nol (reka ulang dari Munadi, 1991)

### III.5 Persamaan Zoeppritz dan Konsep Pre – Stack AVO

Gelombang yang datang dari suatu medium ke medium lain dengan sudut datang tidak sama dengan nol (tidak tegak lurus bidang pantul), koefisien refleksi dan transmisinya dapat dihitung dengan persamaan Zoeppritz. Bentuk persamaan simultan dari persamaan Zoeppritz (1919) adalah :

$$\begin{bmatrix} R_p(\theta_1) \\ R_s(\theta_1) \\ T_p(\theta_1) \\ T_s(\theta_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \phi_2 & \sin \theta_2 & \cos \phi_2 \\ \cos \theta_1 & -\sin \phi_1 & \cos \theta_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P2}}{\rho_1 V_S^2 V_{P2}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2} V_{P1}}{\rho_2 V_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}} \sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}} \cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{P1}} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\phi_1 \end{bmatrix}$$

.....3.9

Aki dan Richards (1980) mengusulkan penyederhanaan persamaan Zoeppritz untuk nalisis AVO :

$$R(\theta) = a \frac{\Delta V_p}{V_p} + b \frac{\Delta V_s}{V_s} + c \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{3.10}$$

dimana :

$$a = \frac{1}{2 \cos^2 \theta}, \tag{3.11}$$

$$b = 4 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \quad 3.12$$

$$c = 0.5 - 2 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \quad 3.13$$

Wiggins et al. (1983) dalam Russell (1988) membuat pendekatan terhadap persamaan Zoeppritz oleh Aki dan Richard ini dalam 3 parameter elastisitas.

$$R(\theta) = A + B \sin^2 \theta + C \tan^2 \theta \sin^2 \theta \quad 3.14$$

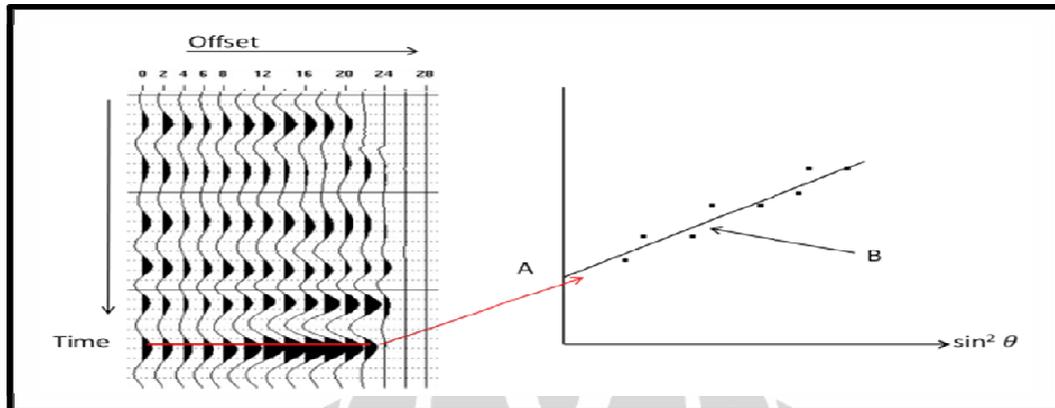
dimana :

$$A = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] \quad 3.15$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \left[ \frac{V_s}{V_p} \right]^2 \frac{\Delta V_s}{V_s} - 2 \left[ \frac{V_s}{V_p} \right]^2 \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad 3.16$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad 3.17$$

Persamaan ini merupakan penyelesaian dari hubungan linier antara amplitudo dan  $\sin^2 \theta$  (Aki dan Richard, 1980). A merupakan intersep yaitu koefisien refleksi *zero-offset* yang merupakan fungsi dari kecepatan gelombang P dan densitas. B merupakan gradien AVO yang bergantung pada kecepatan gelombang P dan gelombang S serta densitas batuan. Dibandingkan dengan intersep, gradien mempunyai efek lebih besar pada AVO. C sebagai faktor kelengkungan hanya berpengaruh kecil terhadap amplitudo pada sudut datang di bawah  $30^\circ$ . Gambar 3.4 merupakan contoh analisis AVO kelas III, adanya kenaikan amplitudo dengan bertambahnya *offset*.



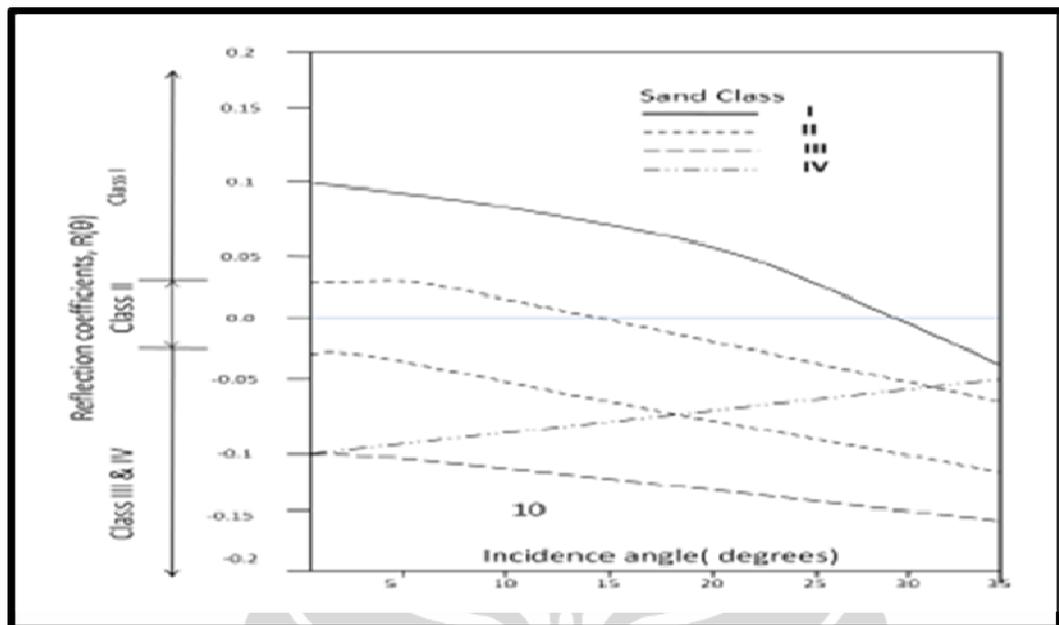
Gambar 3.4 Analisis AVO, contoh AVO kelas III, terjadinya kenaikan amplitudo dengan semakin bertambahnya offset

Atribut A dan B dapat digunakan sebagai indikator hidrokarbon langsung (DHI), namun masih sering menimbulkan interpretasi yang ambigu. Kombinasi dari kedua atribut ini dapat menghasilkan *secondary attribute* seperti :

1. *AVO Product* ( $A*B$ ), *secondary attribute* ini sangat baik untuk mengidentifikasi keberadaan gas di dalam reservoir. Nilai positif merupakan indikator keberadaan gas.
2. *Scaled Poisson's Ratio Change* ( $A+B$ ), *secondary attribute* ini dengan baik mendeteksi perubahan *Poisson's ratio*. Nilai negatif dijadikan indikator keberadaan gas.
3. *Shear Reflectivity* ( $A-B$ ), *secondary attribute* ini sensitif terhadap perubahan gelombang S.

Dengan melakukan *cross plot* antara intersep (A) dan gradien (B) interpretasi penentuan anomali AVO menjadi lebih mudah. Rutherford dan Williams (1989) mengklasifikasikan AVO menjadi 4 kelas (gambar 3.5), yaitu :

1. Kelas I, adanya kontras impedansi yang tinggi dengan berkurangnya AVO.
2. Kelas II, *Near-Zero* impedan, Kelas IIP, sama dengan kelas II, dengan adanya perubahan polaritas.
3. Kelas III, impedansi rendah dengan bertambahnya AVO.
4. Kelas IV, impedansi rendah dengan berkurangnya AVO.



Gambar 3.5, Klasifikasi kelas AVO (Rutherford & Williams, 1989)

### III.6 Lambda-Mu-Rho (LMR)

*Lambda-Mu-Rho* diturunkan dari persamaan reflektivitas impedansi gelombang P dan S (Fatti et al., 1994)

$$R(\theta) = c_1 R_p + c_2 R_s + c_3 R_D \quad 3.18$$

dimana :

$$c_1 = 1 + \tan^2 \theta; c_2 = \frac{-8 \sin^2 \theta}{\gamma_{sat}^2}; c_3 = \frac{1}{2} \tan^2 \theta - \frac{2 \sin^2 \theta}{\gamma_{sat}^2}$$

$R_p$  dan  $R_s$  merupakan reflektivitas gelombang P dan S :

$$R_p = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right], \quad 3.19$$

$$R_s = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right], \quad 3.20$$

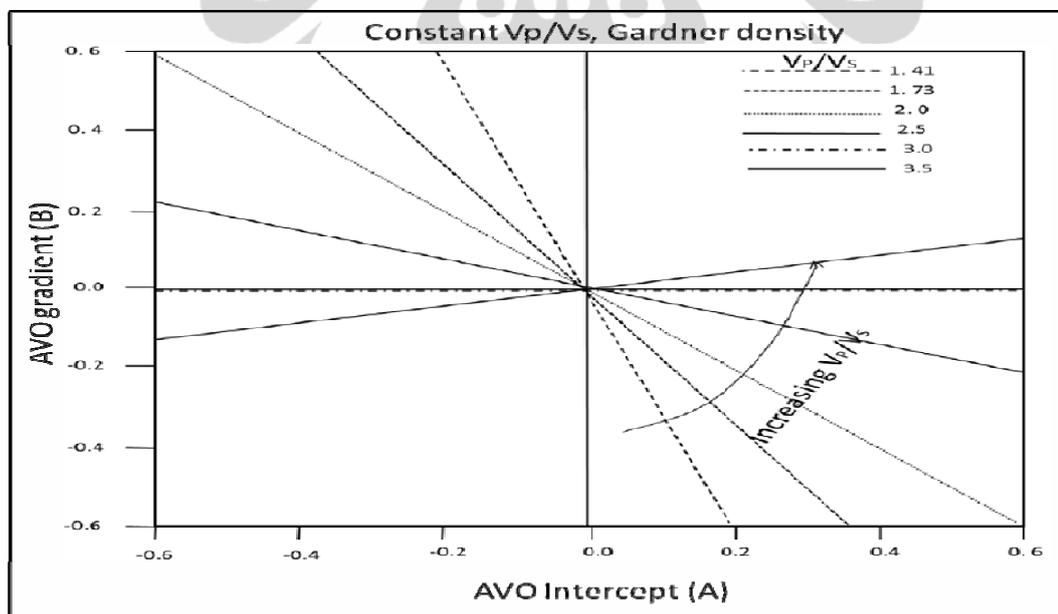
$$R_D = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad 3.21$$

$R_p$  dan  $R_s$  dihitung dari data seismik menggunakan persamaan 3.18. Selisih reflektivitas antara  $R_p$  dan  $R_s$  ( $R_p - R_s$ ) dapat digunakan sebagai indikator untuk membedakan *shale* di atas *brine-sand* dan *shale* di atas *gas-sand*. Nilai dari  $R_p - R_s$  akan negatif untuk *shale* di atas *gas-sand* dan selalu lebih negatif pada kasus *shale* di atas *brine-sand* (Castagna dan Smith, 1994).  $R_p$  dan  $R_s$  dapat ditransformasikan ke dalam atribut baru : *Fluid Factor* dan *Lambda-Mu-Rho* (LMR).

Analisis *Fluid Factor* dapat dilakukan berdasarkan garis *mudrock*. Dimana amplitudo tinggi untuk reflektor yang berada jauh dari garis *mudrock* dan amplitudo rendah untuk reflektor yang berada pada garis *mudrock*, lihat gambar 3.7. Persamaan *Fluid Factor* didefinisikan oleh Fatti et al. (1994) :

$$\Delta F = \frac{\Delta V_p}{V_p} - 1.16 \frac{V_s}{V_p} \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad 3.20$$

$$\Delta F = R_p - 1.16 \frac{V_s}{V_p} \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad 3.21$$



Gambar 3.6. Garis *Mudrock*, dengan  $V_p/V_s$  konstan, persamaan Gardner pada AVO, *cross plot* intersep (A) dan gradien (B) (Castagna et al., 1998)

Goodway et al., (1997) mengajukan penyelesaian baru untuk inversi AVO berdasarkan parameter – parameter Lamé  $\lambda$ ,  $\mu$  dan  $\rho$  dapat ditulis :

**Universitas Indonesia**

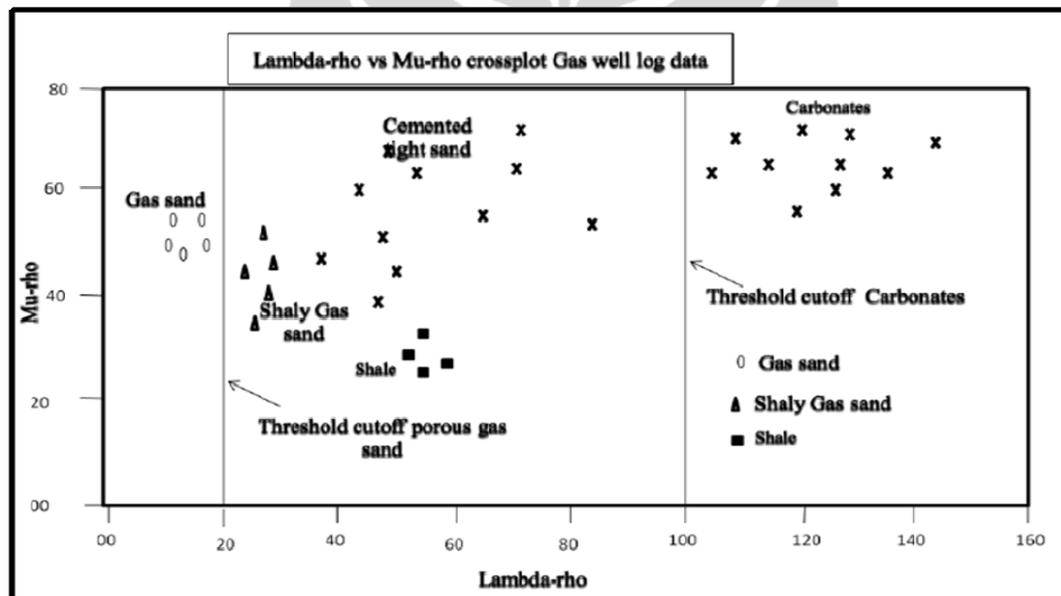
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad 3.22$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad 3.23$$

$$\mu\rho = (V_s\rho)^2 = Z_s^2 \quad 3.24$$

$$(V_p\rho)^2 = Z_p^2 = (\lambda + 2\mu)\rho \quad 3.25$$

$$\lambda\rho = Z_p^2 - 2Z_s^2 \quad 3.26$$



Gambar 3.7 Interpretasi *cross plot* lambda-rho vs Mu-rho ( Goodway et all, 1997)

Parameter  $\lambda$ , *incompressibility* sensitif terhadap adanya fluida pori, sedangkan parameter  $\mu$ , *rigiditas* sensitif terhadap matriks batuan. Gambar 3.7 merupakan *cross plot* antara  $\lambda\rho$  dan  $\mu\rho$  oleh Goodway et al., 1997, dimana *gas sand* selalu mempunyai nilai  $\lambda\rho$  rendah (dibawah 20 Gpa) dan nilai  $\mu\rho$  yang cukup tinggi.