

PEMODELAN PROPERTI ELASTIK DAN ANISOTROPI PADA BATUSERPIH ORGANIK *IMMATURE*

ELASTIC PROPERTIES AND ANISOTROPY MODELLING ON IMMATURE ORGANIC SHALE ROCK

Sthevanie Dhita Sudrazat^{1*}, Ida Herawati²

^{1,2}Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Eksplorasi dan Produksi, Universitas Pertamina

Received: 2021, September 28th
Accepted: 2021, November 25th

Keywords:

Anisotropy;
Kerogen;
Organic shale;
Rock physics modeling.

Correspondent Email:

shevanied@gmail.com

How to cite this article:

Sudrazat, S.D. & Herawati, I.
(2022). Pemodelan Properti
Elastik dan Anisotropi Pada
Batuserpih Organik, Studi
Kasus: Batuan Induk *Immature*.
Jurnal Geofisika Eksplorasi,
08(01), 5-16.

Abstrak. Batuserpih organik merupakan salah satu reservoir non konvensional yang memiliki heterogenitas dan struktur yang kompleks. Pemodelan fisika batuan pada batu serpih organik penting dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari reservoir tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kerogen dan mineral terhadap properti fisis dan sifat anisotropi dari batuserpih organik. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan: teori efektif medium Kuster Toksöz untuk menggabungkan fluida dan solid pada masing-masing matriks, *Self-Consistent Approximation* (SCA) untuk mengetahui properti fisis dari keseluruhan batuserpih, serta *Backus Average* untuk menentukan parameter anisotropi dari batuserpih organik. Penelitian ini melakukan perhitungan rasio V_p/V_s , impedansi akustik, dan parameter anisotropi untuk tingkat kematangan *immature* dengan variasi mineral lempung serta jumlah material organik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio V_p/V_s , impedansi akustik dan parameter anisotropi batuserpih sangat sensitif terhadap kandungan material organik dan variasi mineralogi. Kesimpulan dari penelitian ini bahwa peningkatan kandungan material organik menurunkan rasio V_p/V_s dan impedansi akustik batuan, namun meningkatkan sifat anisotropi. Sementara itu, peningkatan kandungan mineral lempung meningkatkan rasio V_p/V_s namun menurunkan impedansi akustik, serta meningkatkan nilai parameter anisotropi.

Abstract. Organic shale is one of the unconventional reservoirs with heterogeneity and complex structure. Rock physics modeling on organic shale is important to understand the reservoir's characteristics. This research is conducted to determine the effect of kerogen and mineral on organic shale's physical and anisotropy properties. The modeling was carried out using the Kuster Toksöz effective medium theory to combine fluid and solid in each matrix, *Self-Consistent Approximation* (SCA) to determine the physical properties of the entire shale, and *Backus Average* to determine anisotropy parameters of the organic shale. This study calculates the ratio of V_p/V_s , acoustic impedance, and anisotropy parameters for immature levels with variations in clay mineral and the amount of organic material. The results show that the ratio of V_p/V_s , acoustic

© 2022 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

impedance, and shale anisotropy parameters are very sensitive to organic material content and variations of minerals. This research concluded that an increase in organic matter content causes decreasing in V_p/V_s ratio and acoustic impedance but increases the anisotropy effect. Meanwhile, the increase in clay minerals causes the ratio of V_p/V_s to increase but decreases acoustic impedance and increases the anisotropy parameter value of rock.

1. PENDAHULUAN

Eksplorasi minyak dan gas bumi saat ini mulai dilakukan pada sistem migas non-konvensional sebagai upaya pemenuhan kebutuhan energi yang terus meningkat sedangkan cadangan semakin menipis seperti yang disebutkan dalam buletin Energia No. 6 oleh Pertamina tahun 2013. Pada sistem tersebut, hidrokarbon diambil langsung dari batuan induk sehingga batuan induk juga berperan sebagai reservoir. Pada umumnya, batuan induk memiliki permeabilitas yang rendah, salah satu contohnya adalah batuserpih organik.

Batuserpih organik memiliki komposisi yang bervariasi dan struktur mikro yang kompleks (Guo dkk., 2013). Mineral lempung penyusun batuserpih yang berbentuk pipih serta laminasi antara mineral dan kerogen menyebabkan batuserpih organik memiliki sifat anisotropi. Anisotropi pada batuan akan mempengaruhi data seismik, sehingga analisis anisotropi penting dilakukan pada pengolahan data seismik khususnya pada proses analisis kecepatan maupun pada karakterisasi reservoir.

Sifat anisotropi, heterogenitas, dan struktur yang kompleks merupakan tantangan dalam eksplorasi reservoir batuserpih organik. Keberadaan material organik pada batuserpih ini dapat dimodelkan sebagai bagian dari matriks padat, bagian dari inklusi atau gabungan dari keduanya. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memodelkan properti elastik dari batuserpih organik. Guo dkk. (2013) melakukan perhitungan *brittleness index* pada formasi batuserpih Barnett dengan memperhitungkan arah laminasi mineral *clay*. Zhu dkk. (2011) memodelkan respon *Amplitude Versus Offset* pada kasus batuan induk yang *silica-rich* dan *clay-rich*.

Zhu dkk. (2012) mengembangkan model anisotropi batuserpih organik dengan menggunakan persamaan Ciz dan Shapiro (2007) untuk substitusi padat. Zhao dkk. (2016) melakukan pemodelan untuk berbagai tingkat kematangan dengan teori medium efektif yang berbeda-beda.

Pada penelitian ini, pemodelan kedepan fisika batuan dilakukan untuk mempelajari pengaruh variasi mineralogi dan kandungan material organik terhadap properti fisis dan parameter anisotropi pada batuserpih organik pada tingkat kematangan *immature*. Karena sifat fisis maupun nilai modulus dari masing-masing mineral (mineral non-lempung dan lempung) dan kerogen yang terkandung pada batuserpih organik memiliki pengaruh yang berbeda terhadap rasio V_p/V_s , impedansi akustik, dan parameter anisotropi dari batuserpih organik. Pada penelitian digunakan teori medium efektif dengan menggunakan metode SCA dan Kuster Toksöz untuk menghitung nilai modulus K dan μ , serta *Backus Averaging* untuk menghitung nilai anisotropi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Batuserpih Organik

Batuserpih merupakan batuan dengan ukuran butir yang kecil yakni sekitar 1/256 mm. Mineral penyusun batuserpih terdiri atas mineral lempung (*illite*, *kaolinite*, *smectite*), dan non lempung seperti kuarsa, feldspar, dan *chert*. Batuan ini memiliki sifat laminasi yang berarti batuan terdiri atas lapisan tipis, dan bersifat fisil yaitu batuan mudah terbelah menjadi potongan tipis (Okeke & Okogbue, 2011). Batuserpih memiliki komposisi penyusun yang bervariasi dan struktur mikro yang kompleks (Guo dkk., 2013). Selain itu,

heterogenitas dari kecepatan secara vertikal menyebabkan batuan ini memiliki sifat anisotropi.

Batuserpih yang kaya akan kandungan organik memiliki nilai resistivitas yang tinggi, waktu transit lebih cepat, dan kemungkinan memiliki kandungan radioaktif yang tinggi dibandingkan dengan batuserpih biasa dengan kandungan organik yang sedikit (Ahmad dkk., 2017). Kandungan organik dalam batuserpih akan mengalami proses sedimentasi dan diagenesis di bawah permukaan sehingga membentuk hidrokarbon ketika material organik matang pada suhu dan tekanan tertentu. Pada sistem minyak dan gas bumi (migas) non-konvensional, batuserpih bertindak sebagai batuan induk sekaligus batuan reservoir (Guo dkk., 2013).

2.2. Kerogen

Kerogen merupakan material organik yang tidak dapat larut di dalam air, larutan basa dan asam, serta pelarut organik lain. Kerogen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap properti elastik batuserpih akibat densitas yang rendah (Li dkk., 2015). Tipe dan jumlah kandungan kerogen dalam suatu batuan akan mempengaruhi hidrokarbon yang terbentuk dalam batuan (Bjørlykke, 2015).

2.3. Parameter Anisotropi

Penelitian oleh Thomsen (1986) memberikan anotasi parameter untuk material *Transverse Isotropy* (TI) yang memiliki anisotropi lemah. Parameter Thomsen tersebut menjelaskan perbandingan kecepatan gelombang P dan S pada arah vertikal dan horizontal suatu batuan. Persamaan parameter Thomsen adalah sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \approx \frac{V_p(90^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_p(0^\circ)} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}} \approx \frac{V_{SH}(90^\circ) - V_{SH}(0^\circ)}{V_{SH}(0^\circ)} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \approx \frac{V_p(90^\circ) - V_p(0^\circ)}{V_p(0^\circ)} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \frac{c_{33}}{c_{44}} \varepsilon \quad (4)$$

2.4. Pemodelan Fisika Batuan

2.4.1. Teori Medium Efektif Voigt-Reuss Hill

Modulus efektif suatu konstituen berada diantara suatu batas. Model yang paling sederhana adalah Voigt dan Reuss. Model ini terdiri atas dua batas, yakni batas atas (Voigt) dan batas bawah (Hill). Perhitungan kedua model batas tersebut ditunjukkan dalam perumusan sebagai berikut (Mavko dkk., 2009):

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (5)$$

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (6)$$

Dimana f_i merupakan fraksi volume dari suatu fasa ke i , sedangkan M_i merupakan modulus elastik fasa ke- i tersebut. Perhitungan dengan kedua model tersebut dapat digunakan untuk menentukan nilai modulus efektif rata-rata mineral dari suatu butir mineral atau matriks solid. Selain itu, dapat pula digunakan untuk menghitung batas atas dan bawah dari suatu campuran mineral dan fluida pori. Apabila dibutuhkan satu nilai modulus efektif, bukan berupa rentang, maka dilakukan perhitungan rata-rata aritmetik antara Model batas atas Voigt dan Model batas bawah Reuss menggunakan persamaan Voigt-Reuss-Hill berikut (Mavko dkk., 2009):

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (7)$$

2.4.2. Teori Medium Efektif Kuster Toksöz

Teori Kuster Toksöz (Kuster & Toksöz, 1974) menggunakan aspek rasio dari pori batuan untuk mendeskripsikan bentuk pori. Hal tersebut kemudian digunakan untuk menghitung modulus efektif bulk dan shear dari kandungan fluida dalam kerogen. Perhitungan modulus efektif tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$(K_{KT}^* - K_m) \frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_m)}{(K_{KT}^* + \frac{4}{3}\mu_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P^{mi} \quad (8)$$

$$(\mu_{KT}^* - \mu_m) \frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_{KT}^* + \zeta_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{\mu}{6} \frac{(9K + 8\mu)}{(K + 2\mu)} \quad (10)$$

$$\beta = \mu \frac{(3K+\mu)}{(3K+4\mu)} \quad (11)$$

$$\gamma = \mu \frac{(3K+\mu)}{(3K+7\mu)} \quad (12)$$

Dimana koefisien P_{mi} dan Q_{mi} merupakan efek inklusi dari material i pada medium latar belakang m . Berryman (1995) merumuskan perhitungan P_{mi} dan Q_{mi} berdasarkan perbedaan bentuk inklusi

sebagai persamaan seperti yang ditunjukkan oleh **Tabel 1**.

Metode ini memiliki beberapa limitasi. Dimana, bentuk inklusi diasumsikan elipsoid ideal dan keadaan diasumsikan isotropik (Wang dkk., 2018). Persamaan modulus efektif terbatas pada porositas rendah, densitas retakan rendah, dan mendeskripsikan model frekuensi tinggi.

Tabel 1. Koefisien P dan Q untuk bentuk spesifik inklusi (Berryman, 1995).

| Shape | P_{mi} | Q_{mi} |
|--------------|--|---|
| Sphere | $\frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_m)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_m)}$ | $\frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_i + \zeta_m)}$ |
| Needles | $\frac{(K_m + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i)}{(K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i)}$ | $\frac{1}{5} \left(\frac{\mu_m}{\mu_m + \mu_i} + 2 \frac{\mu_m + \gamma_m}{\mu_i + \gamma_m} + \frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{(K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i)} \right)$ |
| Disks | $\frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_i)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_i)}$ | $\frac{(\mu_m + \zeta_i)}{(\mu_i + \zeta_i)}$ |
| Penny cracks | $\frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_i)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m)}$ | $\frac{1}{5} \left(1 + \frac{8\mu_m}{4\mu_i + \pi\alpha(\mu_m + 2\beta_m)} + 2 \frac{K_i + \frac{2}{3}(\mu_i + \mu_m)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m)} \right)$ |

2.4.3. Teori Medium Efektif Self-Consistent Approximation (SCA)

Berryman (1995) melakukan estimasi modulus elastik dengan beberapa n -fasa mineralogi dan ruang pori dengan persamaan SCA:

$$\sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_{SC}^*) P^{*i} = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_{SC}^*) Q^{*i} = 0 \quad (14)$$

Dimana i merupakan jumlah i material, x_i adalah fraksi volum, K_i dan μ_i merupakan modulus *bulk* dan *shear* tiap fraksi, K_{SC}^* dan μ_{SC}^* adalah modulus efektif *bulk* dan *shear*. Sedangkan P^{*i} dan Q^{*i} adalah koefisien dari perbedaan bentuk rekahan. Faktor P^{*i} dan Q^{*i} mendeskripsikan geometri inklusi dari fasa i diantara medium latar (*background medium*) ketika aspek rasio $\alpha \leq 1$:

$$P^{*i} = \frac{(K_m + \frac{4}{3}\mu_i)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\mu_m \frac{3K_m + \mu_m}{3K_m + 4\mu_m})} \quad (15)$$

$$Q^{*i} = \frac{1}{5} \left[1 + \frac{8\mu_m}{4\mu_i + \pi\alpha\mu_m (1 + 2 \frac{3K_m + \mu_m}{3K_m + 4\mu_m})} + \frac{K_i + \frac{2}{3}(\mu_i + \mu_m)}{(K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\mu_m \frac{3K_m + \mu_m}{3K_m + 4\mu_m})} \right] \quad (16)$$

Keterbatasan dari model ini adalah asumsi bahwa porositas dianggap tidak cocok dan panjang gelombang lebih besar dari ukuran inklusi (Wang dkk., 2018). Inklusi pada SCA diasumsikan hanya berada pada rentang yang sempit (Zhang dkk., 2017). Selain itu, model ini lebih sesuai untuk porositas medium, karena persamaan yang digunakan untuk kondisi dengan frekuensi yang tinggi.

2.4.4. Teori Backus Average

Backus mengasumsikan bahwa batuserpih merupakan komposit berlapis-lapis dari laminasi mineral lempung dan laminasi kerogen, serta campuran semua mineral non lempung lainnya. Perhitungan *Backus Average* menghasilkan medium efektif isotropik transversal yang

direpresentasikan oleh lima kekakuan Cij dimana:

$$\begin{aligned} C_{11}^* &= \langle C_{11} - C_{13}^2 C_{33}^{-1} \rangle + \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle C_{13} C_{33}^{-1} \rangle^2 \\ C_{33}^* &= \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1} \\ C_{13}^* &= \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle C_{13} C_{33}^{-1} \rangle \\ C_{44}^* &= \langle C_{44}^{-1} \rangle^{-1} \\ C_{66}^* &= \langle C_{66} \rangle \end{aligned} \quad (17)$$

Cij merepresentasikan kekakuan yang kompleks dari suatu konstituen, sedangkan tanda braket $\langle \cdot \rangle$ mengindikasikan rata-rata properti yang diberi bobot berdasarkan fraksi volume. Persamaan *backus average* dalam pemodelan fisika batuan adalah sebagai berikut:

$$\langle \alpha \rangle = f_m \alpha_m + f_c \alpha_c + f_k \alpha_k \quad (18)$$

dengan m merupakan campuran seluruh komposisi termasuk mineral non lempung, c adalah mineral lempung yang berlaminasi, k adalah laminasi kerogen, dan f adalah bobot dari perata-rataan.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Data Penelitian

Tabel 2. Modulus elastik material organik berdasarkan tingkat kematangan (Lucier dkk., 2011; Yan & Han, 2013).

| Level Kematangan | Komposisi Hidrokarbon | K _{kerogen} (GPa) | G _{kerogen} (GPa) | $\rho_{kerogen}$ (g/cm ³) |
|------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| <i>Immature</i> | - | 3,5 | 1,75 | 1,1 |

Tabel 3. Modulus elastik komponen material (Lee, 2005; Mavko dkk., 2009).

| Material | Bulk Modulus (GPa) | Shear Modulus (GPa) | Densitas (g/cm ³) |
|----------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| Kuarsa | 37 – 38 | 44 | 2,65 |
| Feldspar | 37,5 | 15 | 2,62 |
| Dolomit | 69,4 – 94,9 | 45 – 51,6 | 2,87 – 2,88 |
| Clay | 20,9 – 25 | 7 – 9 | 2,55 – 2,58 |
| Minyak | 0,57 | 0 | 0,7 |
| Gas | 0,04 | 0 | 0,11 |
| Air | 2,25 | 0 | 1,04 |

3.2. Tahapan Penelitian

Pemodelan kedepan fisika batuan dilakukan dengan membuat model fisika batuan untuk tingkat kematangan *immature* (**Gambar 1**) dengan batuserpih organik yang

Data yang digunakan merupakan data sintetik dengan nilai yang didasarkan pada studi literatur untuk diolah sesuai dengan tujuan penelitian. Data modulus *bulk*, modulus *shear*, dan densitas dari kerogen dan mineral disajikan pada **Tabel 2** dan **3**.

Nilai modulus *bulk* yang digunakan adalah 25 GPa untuk mineral lempung, 37 GPa untuk mineral kuarsa, 37,5 GPa untuk mineral felspar, 94,9 GPa untuk mineral dolomit. Nilai modulus *shear* 9 GPa untuk mineral lempung, 44 GPa untuk mineral kuarsa, 15 GPa untuk mineral felspar, dan 45 GPa untuk mineral dolomit.

Nilai densitas 2,55 g/cm³ untuk mineral lempung, 2,65 g/cm³ untuk mineral kuarsa, 2,62 g/cm³ untuk mineral felspar, dan 2,87 g/cm³ untuk mineral dolomit. Nilai-nilai tersebut berasal dari studi literatur yang menggunakan sampel kerogen tipe 1 (*oil-prone*) dari cekungan *Green River*, Colorado (Yan & Han, 2013).

Data-data tersebut merupakan parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan seperti parameter elastik, densitas, kecepatan gelombang P dan S, impedansi akustik, dan parameter anisotropi.

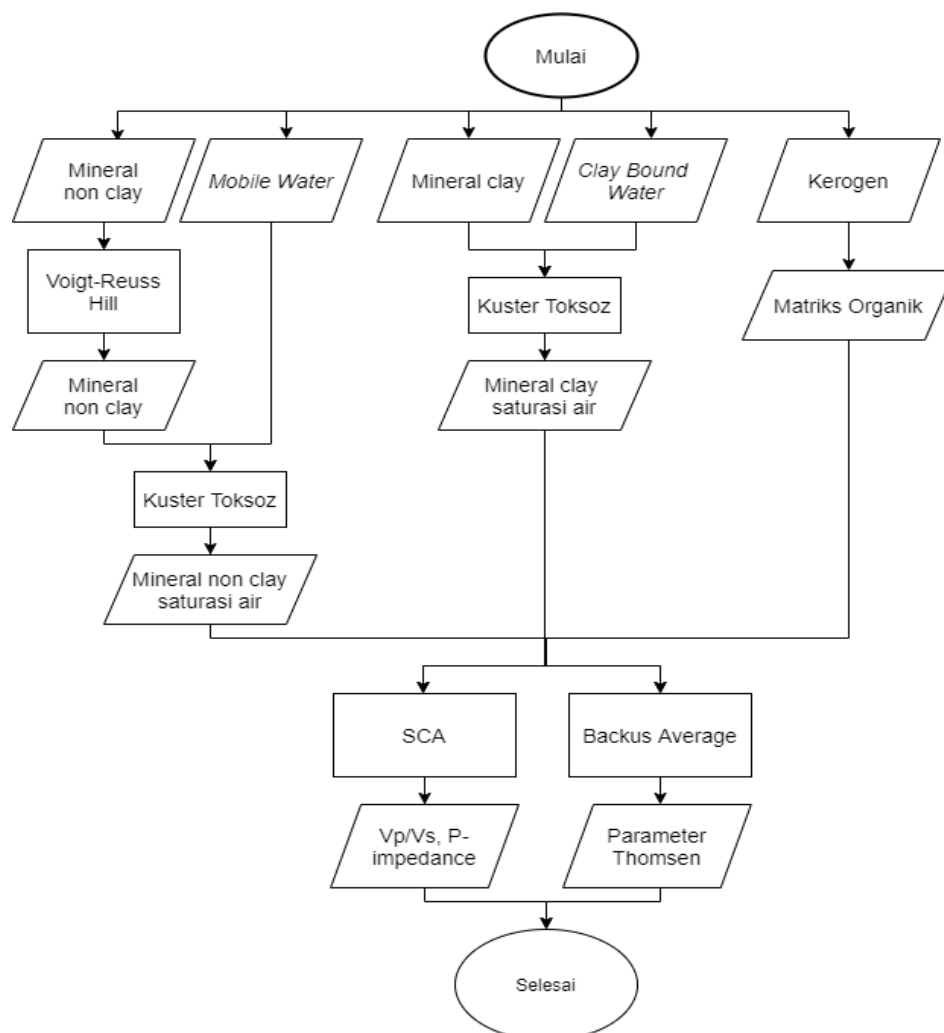
kaya akan mineral lempung. Pada penelitian ini kandungan material organik berupa kerogen divariasikan dengan rentang 0-0,1 untuk melihat pengaruh kerogen terhadap rasio Vp/Vs, impedansi akustik, dan

parameter anisotropi. Selain itu, dilakukan pula variasi mineralogi menyesuaikan *ternary diagram* untuk batuserpih organik yang kaya akan mineral lempung seperti yang ditunjukkan oleh **Tabel 4**. Variasi mineralogi dilakukan untuk melihat pengaruh mineralogi terhadap properti fisis dan parameter anisotropi batuserpih organik.

Batuserpih organik pada pemodelan terdiri atas dua matriks yaitu matriks organik dan inorganik. Pada penelitian ini matriks organik terdiri atas kerogen saja, karena diasumsikan belum terdapat hidrokarbon yang terbentuk pada tingkat

kematangan *immature*. Sedangkan matriks inorganik terdiri atas porositas lempung dan non lempung. Pada porositas lempung, mineral lempung terikat dengan air, keduanya digabungkan menggunakan teori medium efektif Kuster-Toksöz.

Mineral non lempung pada penelitian ini terdiri atas kuarsa, felspar, dan dolomit. Ketiga mineral tersebut digabungkan dengan teori medium efektif Voigt-Reuss-Hill. Porositas non lempung yang tersaturasi dengan *mobile water* menunjukkan bahwa keduanya digabungkan dengan teori medium efektif Kuster-Toksöz.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

Tabel 4. Variasi mineralogi dalam matriks inorganik.

| Mineral | Lempung | | | | |
|---------|---------|-------|-----|-------|-------|
| | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% |
| Kuarsa | 33,6% | 28,8% | 24% | 19,2% | 14,4% |
| Felspar | 22,4% | 19,2% | 16% | 12,8% | 9,6% |
| Dolomit | 14% | 12% | 10% | 8% | 6% |

Gabungan matriks organik dan inorganik dilakukan dengan metode SCA. *Aspect ratio* yang digunakan untuk kerogen sebesar 0,5 sedangkan *aspect ratio* untuk mineral non lempung sebesar 0,25 dan lempung sebesar 0,1. Nilai-nilai tersebut disesuaikan dengan penelitian Zhao dkk. (2016). Modulus elastik yang dihasilkan dari penggabungan dengan metode SCA tersebut digunakan untuk menghitung rasio Vp/Vs dan impedansi akustik. Sedangkan perhitungan parameter anisotropi (epsilon, gamma, dan delta) dilakukan dengan menggunakan *Backus Average*.

4. HASIL PENELITIAN

4.1. Pemodelan Fisika Batuan

Pemodelan batuserpih organik dilakukan dengan memvariasikan mineralogi pada matriks inorganik seperti yang ditunjukkan

pada **Tabel 4**. Pada tingkat kematangan *immature* belum terdapat hidrokarbon yang dihasilkan sehingga kandungan material organik hanya berupa kerogen.

Sebelum itu, dilakukan perhitungan nilai Vp, Vs dan rasio Vp/Vs terhadap nilai modulus dan densitas mineral yang berbeda. Mineral lempung dan kuarsa mengikuti nilai modulus dan densitas mineral pada penelitian oleh Lee (2005) yaitu modulus bulk 20,9 GPa, modulus *shear* 6,85 GPa, dan densitas 2,58 g/cm³ untuk mineral lempung, serta modulus bulk 38 GPa, modulus *shear* 44 GPa, dan densitas 2,65 g/cm³ untuk mineral kuarsa. Sedangkan mineral dolomit nilainya diganti mengikuti nilai modulus dan densitas mineral oleh Mavko dkk. (2009) yaitu modulus bulk 69,4 GPa, modulus *shear* 51,6 GPa, dan densitas 2,88 g/cm³.

Tabel 5. Perubahan kecepatan terhadap nilai modulus mineral.

| Mineral yang Divariasikan Nilai Modulus | Properti Fisis | Persentase Perubahan (%) | | | Jenis Perubahan |
|---|----------------|--------------------------|----------|----------|-----------------|
| | | Mean | Max | Min | |
| Lempung | Vp | 1,88993 | 2,621403 | 1,174588 | Naik |
| | Vs | 3,713108 | 5,302383 | 2,194873 | Naik |
| | Vp/Vs | 1,899955 | 1,00671 | 2,98081 | Turun |
| Kuarsa | Vp | 0,162217 | 0,090819 | 0,237196 | Turun |
| | Vs | 0,083093 | 0,048161 | 0,116893 | Turun |
| | Vp/Vs | 0,079052 | 0,042638 | 0,120162 | Turun |
| Dolomit | Vp | 0,559112 | 0,822739 | 0,316652 | Naik |
| | Vs | 0,566854 | 0,315465 | 0,838016 | Turun |
| | Vp/Vs | 1,119109 | 1,646953 | 0,630129 | Naik |
| Lempung dan Kuarsa | Vp | 1,728982 | 2,532235 | 0,93796 | Naik |
| | Vs | 3,63267 | 5,254297 | 2,081804 | Naik |
| | Vp/Vs | 1,981805 | 1,112568 | 3,034128 | Turun |
| Lempung, Kuarsa dan Dolomit | Vp | 6,005897 | 8,042996 | 3,944186 | Naik |
| | Vs | 6,204711 | 9,16498 | 3,344756 | Naik |
| | Vp/Vs | 0,226353 | 0,806798 | 1,252909 | Turun |

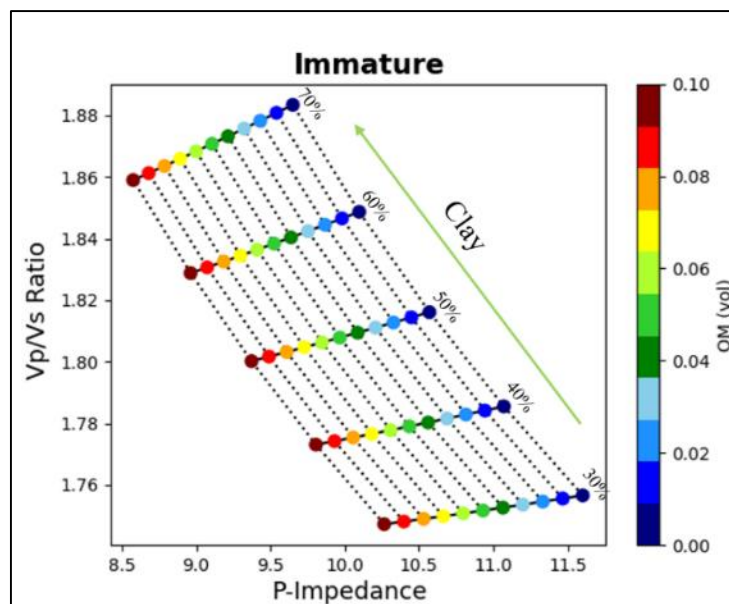
Tabel 5 menunjukkan persentase perubahan nilai V_p , V_s maupun rasio V_p/V_s terhadap penggantian nilai modulus dan densitas dari mineral berupa nilai rata-rata perubahan, nilai perubahan maksimum dan nilai perubahan minimum. Perubahan pertama dilakukan hanya pada mineral lempung, kemudian hanya pada mineral kuarsa, lalu hanya pada mineral dolomit. Perubahan selanjutnya dilakukan pada penggantian nilai modulus dan densitas untuk mineral lempung dan kuarsa. Terakhir, dilakukan perubahan untuk tiga mineral yaitu mineral lempung, mineral kuarsa dan mineral dolomit.

Berdasarkan hasil perhitungan, dapat dilihat bahwa perubahan yang terjadi tidak signifikan dimana persentase kurang dari 10%. Perbedaan nilai modulus dan densitas mineral tidak memberi pengaruh yang besar terhadap rasio V_p/V_s khususnya, dengan nilai persentase tidak mencapai 4%. Sehingga dengan persentase yang kecil tersebut, nilai modulus dan densitas untuk masing-masing mineral pada penelitian

akan menggunakan nilai yang merujuk pada Mavko dkk. (2009) yang juga digunakan pada penelitian (Guo dkk., 2013) untuk Barnett Shale seperti yang disebutkan pada bagian data penelitian.

4.1.1. Analisis Properti Fisis Batuserpih

Grafik (**Gambar 2**) menunjukkan bahwa rasio V_p/V_s menurun dengan pertambahan kandungan material organik pada batuserpih. Sedangkan rasio V_p/V_s meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan mineral lempung pada batuan. Perubahan rasio V_p/V_s lebih sensitif terhadap perubahan kandungan mineral lempung dibandingkan dengan kandungan material organik. Hal tersebut dikarenakan semakin meningkat kandungan mineral lempung, maka kandungan mineral silika (kuarsa dan felspar) mengalami penurunan. Karakteristik elastik mineral silika memiliki modulus yang tinggi yang menurunkan nilai rasio V_p/V_s . Sehingga kandungan mineral silika yang lebih sedikit akan mengurangi pengaruh modulus dari mineral silika terhadap rasio V_p/V_s .



Gambar 2. Grafik rasio V_p/V_s terhadap impedansi akustik dengan variasi mineral dan kerogen.

Kandungan material organik pada batuserpih cenderung meningkatkan kompresibilitas elastik batuserpih karena memiliki kecepatan dan densitas yang

rendah sehingga menyebabkan nilai rasio V_p/V_s menurun terhadap pertambahan kandungan material organik. Pada kasus kematangan *immature*, rasio V_p/V_s tidak

terlalu sensitif terhadap perubahan kandungan material organik.

Sedangkan nilai impedansi akustik meningkat seiring dengan penurunan kandungan material organik dan kandungan mineral lempung pada batuserpih. Mineral lempung merupakan mineral ringan dan mudah terkompresi sehingga dengan meningkatnya kandungan mineral lempung maka nilai impedansi akustik akan semakin menurun. Selain itu, mineral lempung memiliki modulus elastik yang lebih rendah dibandingkan dengan mineral silika (kuarsa dan felspar) sehingga peningkatan mineral lempung akan menurunkan nilai impedansi akustik. Sedangkan pengaruh kandungan material organik disebabkan oleh kerogen yang memiliki densitas dan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan mineral. Hal tersebut menyebabkan penurunan nilai impedansi akustik terhadap peningkatan kandungan material organik, dan begitupula sebaliknya.

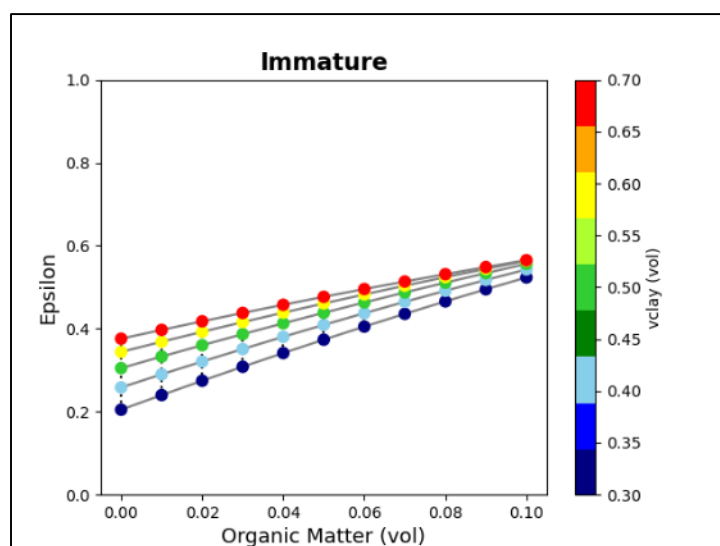
Grafik rasio V_p/V_s terhadap impedansi akustik memiliki tren yang kurang lebih sama seperti pada penelitian oleh Guo dkk. (2013) maupun Zhao dkk. (2016). Guo dkk. (2013) dan Herawati dkk. (2015) juga memodelkan rasio V_p/V_s dan impedansi akustik terhadap variasi porositas. Dari

pemodelan tersebut dapat disimpulkan bahwa perubahan porositas pada setiap variasi kandungan mineral terlihat pada rasio V_p/V_s dan juga akustik impedansi. Namun demikian pada porositas yang tinggi, perubahan akustik impedansi tidak sebesar perubahan rasio V_p/V_s .

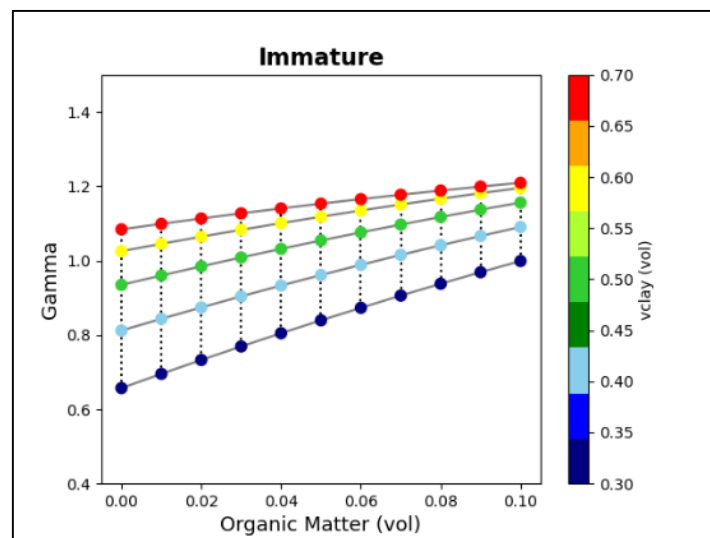
Secara keseluruhan, pengaruh kandungan material organik terhadap properti fisis lebih kecil dibandingkan pengaruh kandungan mineral. Pada dasarnya respon elastisitas batuan dikendalikan oleh peristiwa geologi yang disebabkan oleh proses kematangan termal. Sehingga prediksi properti elastis batuan juga membutuhkan pengaruh tingkat kematangan. Selain itu, perbedaan kesensitifan rasio V_p/V_s dan impedansi akustik terhadap kandungan material organik dan mineral pada batuan dapat membantu memisahkan fluida yang terkandung dalam batuan atau jenis litologi dari batuan.

4.1.2. Analisis Parameter Anisotropi Batuserpih Organik

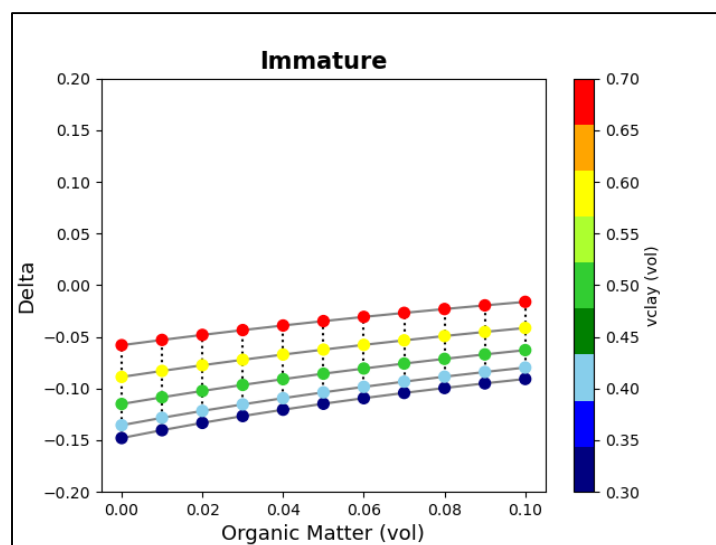
Grafik parameter epsilon (ϵ) terhadap kandungan material organik (**Gambar 3**) menunjukkan bahwa nilai epsilon meningkat seiring bertambahnya kandungan material organik.



Gambar 3. Grafik parameter epsilon terhadap *organic matter* dengan variasi mineral.



Gambar 4. Grafik parameter gamma terhadap *organic matter* dengan variasi mineral.



Gambar 5. Grafik parameter delta terhadap *organic matter* pada tingkat kematangan *immature*.

Grafik parameter gamma (γ) terhadap kandungan material organik pada batuserpih (**Gambar 4**) menunjukkan tren yang kurang lebih sama dengan parameter epsilon. Namun nilai anisotropi dari parameter gamma memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan parameter epsilon. Sama seperti tren pada parameter epsilon, nilai gamma meningkat seiring dengan bertambahnya kandungan material organik dari batuserpih. Sedangkan grafik parameter delta (δ) terhadap kandungan

material organik pada batuserpih (**Gambar 5**) menunjukkan grafik yang cukup berbeda dari parameter epsilon dan gamma. Delta meningkat seiring bertambahnya kandungan material organik batuserpih. Delta juga meningkat seiring dengan pertambahan kandungan mineral lempung pada batuan. Berbeda dengan kedua parameter anisotropi sebelumnya, delta memiliki nilai negatif. Nilai negatif pada delta disebabkan oleh rasio V_p/V_s pada

lapisan yang lebih kaku memiliki nilai yang lebih rendah.

Peningkatan parameter anisotropi terhadap peningkatan fraksi material organik disebabkan oleh peningkatan kontras antara material organik dan inorganik. Semakin meningkat fraksi material organik maka pengaruh anisotropi oleh laminasi material organik dan inorganik juga semakin meningkat.

Parameter anisotropi hasil penelitian apabila dibandingkan dengan hasil penelitian oleh Zhao dkk. (2016) menunjukkan tren yang kurang lebih sama untuk tingkat kematangan *immature*. Perbedaannya terletak pada nilai anisotropi nya. Perbedaan nilai anisotropi yang kecil tersebut disebabkan oleh perbedaan metode pemodelan yang digunakan. Namun secara prinsip, tren dari setiap parameter anisotropi telah sesuai dengan teori dan penelitian terdahulu.

Pada model *immature* ditunjukkan bahwa ketiga parameter anisotropi meningkat bersamaan dengan peningkatan kandungan mineral lempung pada batuserpih. Peningkatan nilai anisotropi tersebut disebabkan oleh sifat anisotropi dalam mineral lempung itu sendiri. Bentuk mineral lempung yang pipih memunculkan sifat anisotropi intrinsik. Sehingga semakin besar kandungan mineral lempung menyebabkan anisotropi juga semakin meningkat.

Parameter epsilon yang merepresentasikan anisotropi gelombang P selalu memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan parameter gamma yang merepresentasikan anisotropi gelombang S. Hal tersebut sesuai dengan hasil pemodelan fisika batuan pada umumnya yang memiliki nilai gamma selalu positif dan lebih besar dari epsilon akibat nilai C_{33} lebih besar dari C_{44} (persamaan 10).

4.2. Keterbatasan Penelitian

Pada penelitian ini hanya dilakukan pemodelan kedepan fisika batuan untuk tingkat kematangan *immature*, tidak dilakukan pemodelan untuk tingkat kematangan batuan induk lainnya seperti *mature* dan *overmature*. Penelitian ini

menggunakan Kuster Toksöz untuk menghitung modulus efektif dari mineral lempung yang terikat dengan air, dengan limitasi Kuster Toksöz yang diasumsikan untuk porositas rendah dapat menjadi kurang tepat untuk mineral lempung tersebut yang kemungkinan memiliki porositas medium. Selain itu, pemodelan dilakukan secara sederhana tanpa menyertakan porositas dari struktur seperti *microcracks*.

5. KESIMPULAN

Properti fisis dan parameter anisotropi batuserpih organik dipengaruhi oleh fraksi mineral penyusun batuan, dan fraksi material organik.

- Rasio V_p/V_s menurun seiring dengan bertambahnya fraksi material organik akibat dari kecepatan dan densitas kerogen yang rendah. Serta selaras dengan penurunan fraksi mineral lempung karena pengaruh mineral silika yang memiliki modulus yang tinggi menjadi meningkat dan menurunkan nilai rasio V_p/V_s .
- Nilai impedansi akustik menurun seiring dengan bertambahnya fraksi material organik yang disebabkan oleh kerogen dalam fraksi material organik memiliki kecepatan dan densitas yang rendah. Impedansi akustik juga menurun seiring dengan peningkatan fraksi mineral lempung karena mineral lempung merupakan mineral yang ringan dan mudah dikompres.
- Peningkatan fraksi mineral lempung meningkatkan ketiga nilai parameter anisotropi. Hal tersebut disebabkan oleh sifat anisotropi intrinsik pada mineral lempung, sehingga semakin besar fraksi mineral lempung maka pengaruh anisotropi intrinsik mineral lempung semakin besar dan menyebabkan peningkatan nilai parameter anisotropi.
- Ketiga nilai parameter anisotropi meningkat seiring dengan pertambahan fraksi material organik yang disebabkan oleh peningkatan kontras antara material organik dan inorganik. Semakin meningkat fraksi material organik maka pengaruh anisotropi oleh laminasi

material organik dan inorganik juga semakin meningkat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Iqbal, O., & Kadir, A. A. (2017). Quantification of Organic Richness Through Wireline Logs: A Case Study of Roseneath Shale Formation, Cooper Basin, Australia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 88 012020.
- Berryman, J. G. (1995). Mixture Theories for Rock Properties. *Rock Physics and Phase Relations*, 3.
- Bjørlykke, K. . (2015). *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics (2nd ed)*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ciz, R. ., & Shapiro, S. (2007). Generalization of Gassmann equations for porous media saturated with a solid material. *Geophysics*, 72(6), A75–A79.
- Guo, Z., Li, X. Y., Liu, C., Feng, X., & Shen, Y. (2013). A Shale Rock Physics Model for Analysis of Brittleness Index, Mineralogy and Porosity in The Barnett Shale. *Journal Geophysics and Engineering*, 10(2).
- Herawati, I., Winardhi, S., & Priyono, A. (2015). Estimation of Anisotropy Parameters in Organic-Rich Shale: Rock Physics Forward Modeling Approach. *AIP Conference Proceedings* 1677, 060011.
- Kuster, G., & Toksöz, M. (1974). Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I – Theoretical formulations. *Geophysics*, 39, 587–606.
- Lee, M. W. (2005). *Proposed moduli of dry rock and their application to predicting elastic velocities of sandstones: Scientific Investigations Report*.
- Li, Y., Guo, Z. Q., Li, X. Y., & Wang, G. (2015). A Rock Physics Model for the Characterization of Organic-rich Shale from Elastic Properties. *Petroleum Science*, 12(2).
- Lucier, A. M., Hoffman, R., & Bryndzia, L. T. (2011). Evaluation of variable gas saturation on acoustic log data from the Haynesville Shale gas play, NW Louisiana, USA. *The Leading Edge*, 30(3), 241–368.
- Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J. (2009). *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Okeke, O., & Okogbue, C. (2011). Shales: A Review of Their Classifications, Properties and Importance to The Petroleum Industry. *Global Journal of Geological Sciences*, 9(1), 55–73.
- Pertamina. (2013). *Energia*. Corporate Communication Sekretaris Perseroan PT PERTAMINA (PERSERO).
- Thomsen, L. (1986). Weak Elastic Anisotropy. *Geophysics*, 31(10), 1954–1966.
- Wang, B., Chen, Y., Lu, J., & Jin, W. (2018). A rock physics modelling algorithm for simulating the elastic parameters of shale using well logging data. *Science Report* 8 (12151).
- Yan, F., & Han, D. (2013). Measurement of Elastic Properties of Kerogen. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013*, 2778–2782.
- Zhang, F., Li, X., & Qian, K. (2017). Estimation of anisotropy parameters for shale based on an improved rock physics model, Part 1: Theory. *Journal of Geophysics and Engineering*, 14(1), 143–158.
- Zhao, L., Qin, X., Han, D. H., Geng, J., Yang, Z., & Cao, H. (2016). Rock-physics Modeling for the Elastic Properties of Organic Shale at Different Maturity Stages. *Geophysics*, 81(5), D527–D541.
- Zhu, Y., Liu, E., Martinez, A., Payne, M. A., & Harris, C. E. (2011). Understanding Geophysical Responses of Shale-gas Plays. *The Leading Edge*, 30(3), 332–338.
- Zhu, Y., Xu, S., Payne, M., Martinez, A., Liu, E., Harris, C., & Bandyopadhyay, K. (2012). Improved Rock-Physics Model for Shale Gas Reservoirs. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1–5.