

## **BAB II**

### **TEORI DASAR**

#### **2.1 Tinjauan Umum Batupasir**

Batupasir adalah batuan sedimen yang terutama terdiri dari mineral berukuran pasir atau butir-butir batuan yang dapat berasal dari pecahan batuan-batuan lainnya. Batupasir merupakan batuan sedimen klastik kasar dengan ukuran butir berkisar dari 0,0625 mm hingga 2 mm. Komposisi batupasir terdiri dari *grain* (berupa fragmen batuan, kuarsa, feldspar, dan mineral lainnya) matriks dan semen. Kandungan mineral dan komposisi kimia penyusun batupasir akan mempengaruhi besarnya sortasi batuan yang dapat mempengaruhi besarnya pori. Porositas yang terdapat dalam batupasir bersifat intergranular, terdapat pori-pori diantara butiran dan terbentuknya rongga/pori secara primer pada waktu pengendapan. Namun setelah proses pengendapan dapat terjadi berbagai modifikasi pada rongga-rongga, contohnya proses sekunder seperti retakan/rekahan. Batupasir merupakan jenis batuan reservoir konvensional yang umum dijumpai karena 60% dari semua batuan reservoir adalah batupasir. Jenis-jenis batupasir dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan material penyusunnya, yaitu:

1. Orthoquartzites, batupasir yang terbentuk dari suatu proses yang menghasilkan unsur silika tinggi dengan tidak mengalami metamorfosa dan pematatan. Batupasir jenis ini merupakan reservoir yang baik karena pemilahannya sangat baik, butiran yang dihasilkan membundar dan padatnya tidak terdapat matriks kecuali semen yang terdiri atas karbonat dan silika, serta tidak mengandung *shale/clay*.
2. Greywacke, merupakan batupasir yang komposisinya terdiri dari kuarsa, feldspar, *clay*, fragmen batuan, dan mineral lainnya. Asosiasi yang umum adalah abu dan debu vulkanik dengan kuarsa dan fragmen-fragmen feldspar. Indikator untuk mengidentifikasi Greywacke adalah adanya mineral illite.

3. Arkose, umumnya terdiri dari campuran pasir kuarsa dan fragmen feldspar. Dapat juga mengandung fragmen batuan dan mineral yang berbutir kecil dan menyudut.

## **2.2 Konsep Dasar Petrofisika**

Petrofisika merupakan ilmu yang mempelajari sifat-sifat fisis dan kimiawi dari suatu batuan yang diperoleh dari *well-logging* maupun pengukuran laboratorium yang digunakan untuk mengetahui litologi dan sifat petrofisik batuan seperti kandungan lempung, porositas, dan permeabilitas. Dengan pengetahuan litologi dan sifat petrofisik batuan dapat ditentukan interval kedalaman yang merupakan zona reservoir.

### **2.2.1 Prinsip Dasar Well-Logging**

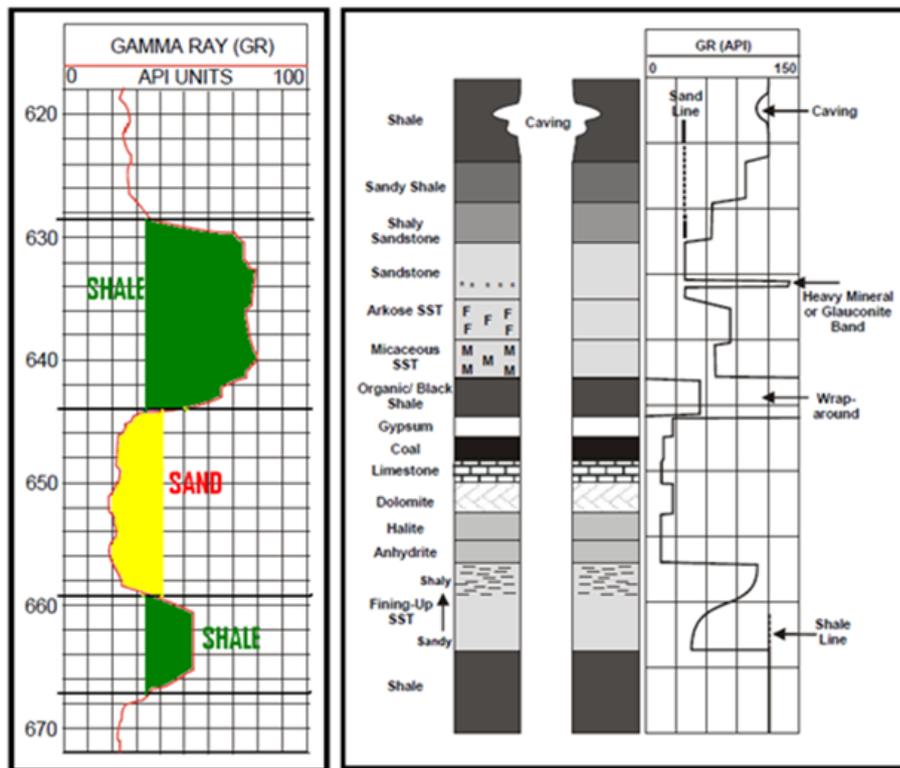
*Well-logging* adalah metode untuk mengkarakterisasi reservoir di bawah permukaan bumi dengan pengukuran parameter-parameter fisis batuan beserta fluida batuan dalam lubang bor yang memanfaatkan prinsip-prinsip petrofisikal seperti elektrik, radioaktif, dan gelombang akustik. Sedangkan *well-log* adalah hasil rekaman dalam fungsi kedalaman terhadap proses *logging*. Tujuan dilakukan pengukuran (*logging*) adalah untuk memperoleh informasi berupa sifat fisik batuan secara insitu sehingga dapat mengetahui kondisi bawah permukaan seperti litologi, porositas, permeabilitas, dan kandungan *shale/clay* yang ada dalam sumur.

Ada beberapa jenis log berdasarkan fungsinya, yaitu log untuk menentukan zona permeabel (log gamma ray) dan log untuk mengukur porositas (log densitas dan log sonic).

#### **1. Log Gamma Ray**

Log gamma ray merupakan log yang digunakan untuk perekaman radioaktif alami bumi. Prinsip kerja dari log gamma ray adalah merekam unsur-unsur

radioaktif yang berada di dalam lapisan batuan sepanjang lubang bor. Unsur-unsur radioaktif tersebut antara lain Uranium (U), Thorium (Th), dan Potasium (K), yang secara kontinu memancarkan sinar gamma ray dalam bentuk pulsa-pulsa energi radiasi tinggi yang mampu menembus batuan sehingga dapat dideteksi oleh detektor gamma ray. Detektor gamma ray bekerja dengan cara menghitung jumlah dari gamma ray per satuan waktu dalam satuan API (*American Petroleum Institute*). Unsur-unsur radioaktif cenderung mengendap di lapisan tidak permeabel, hal ini terjadi selama proses perubahan geologi batuan. Sedangkan formasi permeabel tingkat radiasi gamma ray lebih rendah. Kegunaan dari gamma ray sendiri yaitu evaluasi kandungan *shale/clay*, menentukan lapisan permeabel dan non-permeabel, menentukan ketebalan lapisan batuan, serta dapat mengorelasikan antar sumur.



Gambar 2.1 Contoh analisa log gamma ray efek perbedaan litologi (Glover, 2007)

## 2. Log Densitas

Log Densitas merupakan log yang mengukur densitas elektron suatu formasi batuan. Prinsip kerja dari log densitas adalah sumber radioaktif dari alat

pengukur memancarkan sinar gamma yang menembus formasi batuan yang bertumbukan dengan elektron-elektron dalam batuan. Pada saat proses tersebut terjadi, gamma ray yang dianggap sebagai energi partikel akan kehilangan sebagian energinya karena diserap oleh elektron dan kemudian dihamburkan ke arah yang tidak sama dengan arah partikel awal dan akan menumbuk elektron lainnya. Proses ini akan terus berlangsung hingga energi partikel gamma ray habis atau sebagian partikel terbelokkan menuju detektor.

Intensitas partikel gamma ray yang kembali ke detektor akan berbanding terbalik dengan kerapatan elektron di dalam medium. Semakin rapat matriks batuanya maka densitasnya akan semakin besar dan semakin sedikit partikel gamma ray yang menuju detektor, karena semakin sering bertumbukan dengan elektron maka energi dari partikel gamma ray akan lebih cepat habis.

Persamaan untuk menghitung porositas dari log densitas adalah:

$$\emptyset = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}} \quad (2.1)$$

$\emptyset$  = Porositas

$\rho_{ma}$  = Densitas matriks (gr/cc)

$\rho_b$  = Log densitas bacaan (gr/cc)

$\rho_{fl}$  = Densitas fluida (gr/cc)

### 3. Log Sonik

Log sonik merupakan log yang digunakan untuk mengukur waktu perambatan gelombang elastik yang melalui formasi batuan pada jarak tertentu. Prinsip kerja alat ini yaitu memancarkan gelombang elastik kedalam suatu formasi kemudian merekam waktu kedatangan gelombang pantul. Waktu yang dibutuhkan gelombang suara untuk sampai ke penerima disebut interval *transit time*. Log sonik direkam sebagai kelambatan (*slowness*) biasanya dinyatakan dalam satuan  $\mu\text{s}/\text{ft}$ . Peralatan log sonik terdiri atas 2 *transmitter* suara dan 4 *receiver* untuk

memperkecil pengaruh lubang bor. Log sonik dapat digunakan untuk mendapatkan kecepatan elastik gelombang serta data porositas (porositas sonik). Porositas sonik dapat dihitung melalui persamaan Raymer-Hunt-Gardner, yaitu:

$$\phi_s = \frac{5}{8} \left( \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{log}} \right) \quad (2.2)$$

Interval *transit time* pada formasi batuan akan meningkat seiring adanya hidrokarbon (*hydrocarbon effect*), maka harus dikoreksi agar menghilangkan efek tersebut melalui:

$$\phi = \phi_s \times 0,7 \quad (2.3)$$

- $\phi_s$  = Porositas sonik
- $\Delta t_{log}$  = Interval waktu tempuh data log ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )
- $\Delta t_{ma}$  = Interval waktu tempuh matriks ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )
- $\phi$  = Porositas sonik terkoreksi

### 2.2.2 Volume of Clay ( $V_{clay}$ )

*Volume of clay* merupakan jumlah kandungan *clay* pada suatu interval di dalam formasi batuan yang dinyatakan dalam persentase terhadap keseluruhan batuan. Dalam petrofisika harus dilakukan perhitungan  $V_{clay}$  karena kandungan *clay* dapat mempengaruhi dalam penilaian produktifitas suatu lapisan reservoir (Wijaya, 2014). Dari perhitungan  $V_{clay}$  dapat ditentukan nilai *cut off* yang digunakan untuk membedakan litologi pada formasi batuan. Pendekatan yang digunakan untuk mengestimasi nilai  $V_{clay}$  yaitu:

Pendekatan Larionov (1969) untuk *tertiary rock*:

$$V_{cl} = 0,083(2^{3,71 I_{GR}} - 1) \quad (2.4)$$

Dengan  $I_{GR}$ :

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (2.5)$$

$V_{cl}$  = Volume of clay

$I_{GR}$  = Indeks Gamma Ray

$GR_{log}$  = Gamma Ray bacaan pada log (API)

$GR_{max}$  = Gamma Ray bacaan maksimum (API)

$GR_{min}$  = Gamma Ray bacaan minimum (API)

### 2.2.3 Porositas

Porositas didefinisikan sebagai rasio antara volume pori terhadap total volume batuan dan dinyatakan dalam persen volume. Besar porositas batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

1. *Packing*, suatu batuan dikatakan porositasnya kecil jika sisi-sisi butir yang saling mengunci seperti pada batuan beku sehingga tidak memungkinkan adanya rongga dalam batuan tersebut.
2. Bentuk butir, suatu batuan dengan bentuk butir yang membulat akan memiliki porositas yang baik karena terdapat banyak rongga antar butir batuan, sedangkan porositas akan mengecil pada butiran yang menyudut.
3. Keseragaman butir, semakin banyak butir yang tidak seragam maka butir yang berukuran kecil akan mengisi rongga antar butir sehingga porositasnya mengecil.

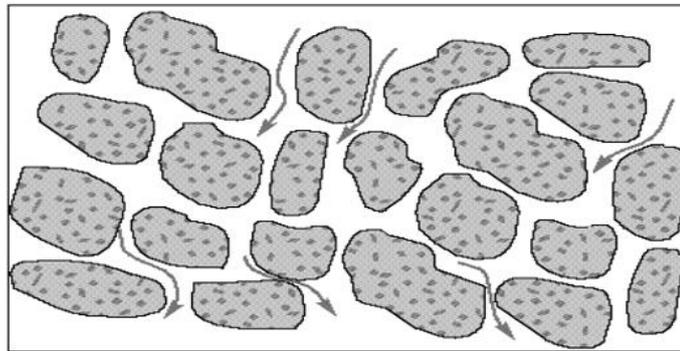
Porositas juga dibedakan berdasarkan strukturnya, yaitu:

1. Porositas total, merupakan porositas yang memperhitungkan seluruh pori-pori, baik pori-pori yang saling berhubungan atau tidak dengan volume batuan.

2. Porositas terisolasi, merupakan porositas dengan volume ruang pori yang tidak saling terhubung.
3. Porositas efektif, merupakan porositas dengan volume ruang antar pori yang saling terhubung.

#### 2.2.4 Permeabilitas

Permeabilitas merupakan kemampuan suatu batuan mengalirkan fluida, dengan satuan *millidarcy* (mD). Permeabilitas berkaitan dengan porositas tetapi tidak selalu berbanding lurus terhadapnya. Batuan yang memiliki porositas tinggi belum tentu memiliki permeabilitas yang tinggi. Agar batuan memiliki permeabilitas yang tinggi, batuan tersebut harus memiliki pori atau rongga antar butir yang saling berhubungan (Harsono, 1993). Faktor yang mempengaruhi permeabilitas antara lain ukuran, keseragaman, kebundaran, dan kemas butir.



Gambar 2.2 Permeabilitas batuan yang berhubungan dengan porositas (T. Darling, 2005).

Fluida yang mengalir dalam batuan biasanya lebih dari satu macam, sehingga permeabilitas dapat dibagi menjadi:

1. Permeabilitas absolute, merupakan nilai permeabilitas suatu batuan apabila fluida yang mengalir melalui pori-pori batuan hanya terdiri dari satu fasa. Contoh yang mengalir hanya gas, minyak, atau air saja.

2. Permeabilitas efektif, merupakan permeabilitas bila fluida yang mengalir lebih dari satu macam. Contoh minyak-air, air-gas, gas-minyak, ataupun semuanya.
3. Permeabilitas relative, merupakan perbandingan antara permeabilitas efektif dengan permeabilitas absolute.

Pada hubungan Kozeny-Carman, permeabilitas berkaitan dengan porositas melalui:

$$k = \frac{k_0 \emptyset^3}{(1 - \emptyset)^2} \quad (2.6)$$

$k$  = Permeabilitas (mD)

$k_0$  = Konstanta kozeny (2500 mD)

$\emptyset$  = porositas

### 2.3 Konsep Dasar Fisika Batuan

Fisika batuan merupakan ilmu yang memahami hubungan antara pengukuran geofisika, terutama hasil pengukuran seismik dengan sifat fisik batuan seperti komposisi, porositas, pori, dan kandungan fluida. Respon amplitudo seismik tergantung pada parameter elastik dari komponen batuan berpori (Ambarsari, 2015).

#### 2.3.1 Bulk Modulus dan Shear Modulus

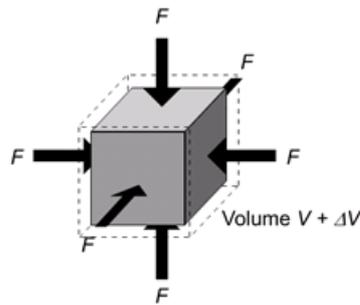
Modulus elastisitas adalah konstanta yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan suatu material batuan sebagai respon terhadap penjalaran gelombang. Menentukan bagaimana *stress* dan *strain* yang akan diukur, diwakilkan oleh *bulk modulus* dan *shear modulus*.

*Bulk modulus* didefinisikan sebagai perbandingan antara tekanan hidrostatik terhadap regangan volume benda. Gaya kompresional yang mengenai *body* batuan akan menghasilkan *stress*, kemudian akibat *stress* tersebut akan dihasilkan *strain*

berupa perubahan volume. *Bulk modulus* disebut juga sebagai inkompresibilitas, yaitu ketahanan suatu material atau batuan terhadap tekanan. Serta dinyatakan dalam persamaan:

$$K = \frac{F/A}{\Delta V/V} \quad (2.7)$$

- $K$  = *Bulk modulus* (GPa)
- $F$  = Gaya kompresional (N)
- $A$  = Luas area (m<sup>2</sup>)
- $V$  = Volume awal (m<sup>3</sup>)
- $\Delta V$  = Selisih perubahan volume (m<sup>3</sup>)



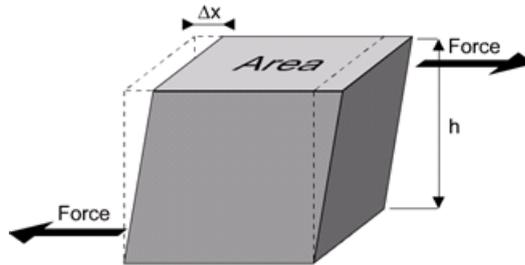
Gambar 2.3 Gaya kompresional pada batuan (Mavko dkk, 2009).

Sedangkan *shear modulus* didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan geser terhadap regangan geser. Gaya *shear* yang mengenai permukaan *body* akan menghasilkan *stress*, kemudian menghasilkan *strain* berupa perubahan panjang pada permukaan *body* yang bergeser. *Shear modulus* disebut juga *rigidity* yaitu ketahanan suatu material atau batuan terhadap gaya geser. Dinyatakan dalam persamaan:

$$\mu = \frac{F/A}{\Delta x/h} \quad (2.8)$$

- $\mu$  = *Shear modulus* (GPa)
- $F$  = Gaya kompresional (N)

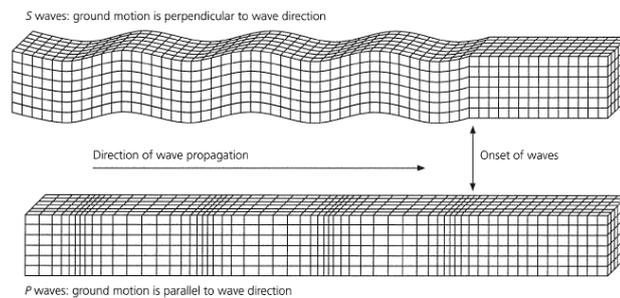
- $A$  = Luas area ( $m^3$ )
- $h$  = Perubahan panjang *body* batuan (m)
- $\Delta x$  = Panjang *body* batuan (m)



Gambar 2.4 Gaya *shear* pada batuan (Mavko dkk, 2009)

### 2.3.2 Kecepatan Gelombang

Gelombang adalah energi yang menjalar pada suatu medium. Terdapat dua kecepatan gelombang seismik, yaitu kecepatan gelombang P (Gelombang kompresi) dan kecepatan gelombang S (Gelombang shear).



Gambar 2.5 Gelombang badan : Gelombang S (atas) dan Gelombang P (bawah) (Stein dan Wysession, 2003).

Gelombang P (Gelombang kompresi) merupakan gelombang yang sifatnya menjalar secara longitudinal, yaitu arah gerak partikel-partikel medium sejajar dengan arah jalar gelombang. Kecepatan gelombang P dinyatakan dengan:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.9)$$

Adapun kecepatan gelombang P dapat didekati dengan log sonic melalui:

$$V_P = \frac{0,3048}{DT \times 10^{-6}} \quad (2.10)$$

$V_P$  = Kecepatan gelombang P (m/s)

$K$  = Modulus bulk (GPa)

$\mu$  = Modulus shear (GPa)

$\rho$  = Densitas (gr/cc)

$DT$  = Log sonic bacaan ( $\mu$ s/ft)

Sedangkan Gelombang S merupakan gelombang yang penjarannya bersifat transversal, yaitu arah gerak partikel-partikel medium tegak lurus terhadap arah jalar gelombang. Kecepatan gelombang S dinyatakan dengan:

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.11)$$

Adapun kecepatan gelombang S dapat didekati dengan persamaan Castagna (1985) yaitu:

$$V_S = 3,89 - 7,07\emptyset - 2,04C \quad (\text{km/s}) \quad (2.12)$$

$V_S$  = Kecepatan gelombang S (m/s)

$\mu$  = Modulus shear (GPa)

$\rho$  = Densitas (gr/cc)

$\emptyset$  = Porositas

$C$  = Volume fraksi lempung

### 2.3.3 Densitas

Densitas adalah suatu besaran kerapatan massa benda yang dinyatakan dalam berat benda per satuan volume benda tersebut. Besaran densitas dapat membantu menerangkan mengapa benda yang berukuran sama memiliki berat yang berbeda. Densitas batuan akan berbeda-beda tergantung mineralogi, porositas dan kandungan fluidanya.

Densitas dapat diketahui dengan transformasi dari kecepatan gelombang P dengan persamaan Gardner. Gardner menemukan hubungan empiris antara densitas dan kecepatan dari suatu pengukuran lapangan dan laboratorium dari batuan. Persamaan transformasi Gardner adalah:

$$\rho = aV_P^b \quad (2.13)$$

$\rho$  = Densitas (gr/cc)

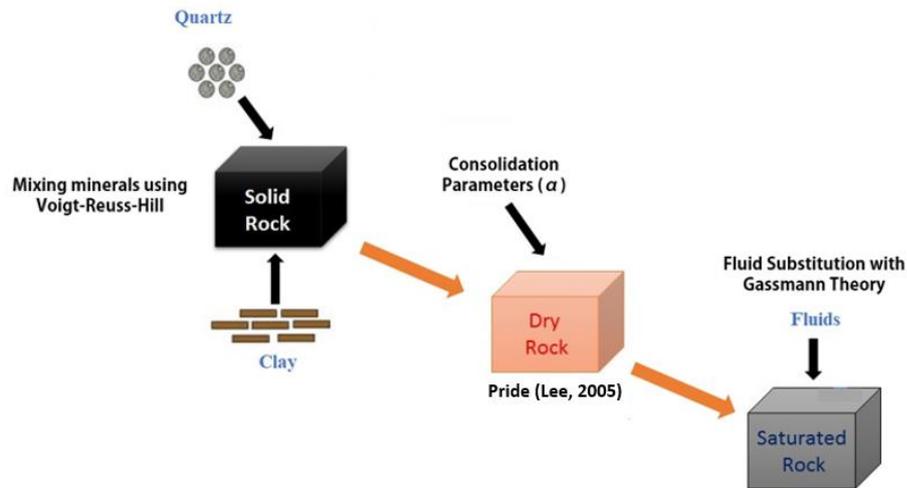
$V_P$  = Kecepatan gelombang P (m/s)

$a$  = 0,31

$b$  = 0,25

### 2.4 Pemodelan Fisika Batuan

Pemodelan fisika batuan adalah proses menemukan model yang sesuai serta menunjukkan konsistensi yang baik dengan data *well-log* yang tersedia. Pemodelan fisika batuan merupakan salah satu bentuk *forward modelling* dalam memodelkan suatu batuan.



Gambar 2.6 Skema pemodelan fisika batuan.

### 2.4.1 Pemodelan *Solid Rock*

*Solid rock* adalah salah satu dari fasa batuan yang berupa matriks hasil campuran mineral-mineral yang menjadi penyusun dari batuan. Pada model *solid rock* tidak melibatkan inklusi dan juga fluida yang ada pada batuan atau disebut juga dengan batuan yang tidak memiliki porositas ( $\emptyset=0$ ). Pemodelan ini menggunakan pendekatan Voight-Reuss-Hill *bounds* yang merupakan pemodelan teoritis untuk mendapatkan modulus elastik batuan yang mendekati parameter batuan sebenarnya dengan menggunakan data petrofisika yang ada. Pemodelan ini dapat digunakan untuk menghitung rentang estimasi modulus mineral rata-rata untuk campuran butiran mineral, serta untuk menghitung batas atas dan bawah untuk campuran mineral dan pori fluida. Sedangkan kelemahan dari pemodelan ini adalah tidak bisa mengetahui geometri pori pada zona target reservoir. Pada pemodelan ini diasumsikan setiap material adalah isotropik, linier, dan elastik.

Persamaan yang digunakan yaitu:

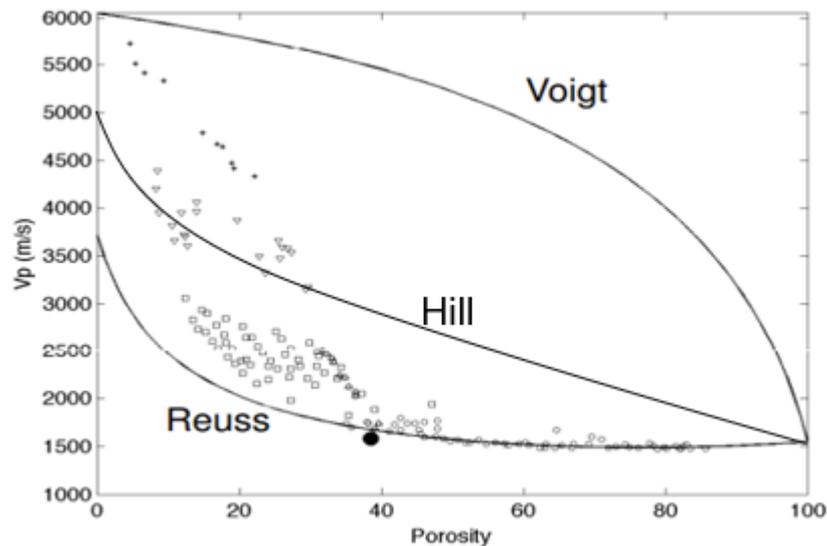
$$Mv = \sum_{i=1}^N fiMi \tag{2.14}$$

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (2.15)$$

Untuk megestimasi modulus elastik efektif batuan maka digunakanlah rata-rata Voight-Reuss melalui:

$$M_H = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (2.16)$$

- $M_V$  = Modulus elastik Voigt
- $M_R$  = Modulus elastik Reuss
- $M_H$  = Modulus elastik Hill
- $f_i$  = Fraksi volume konstituen
- $M_i$  = Modulus elastik konstituen



Gambar 2.7 Voight-Reuss-Hill bounds (Mavko dkk, 2009).

#### 2.4.2 Pemodelan *Dry Rock*

*Dry rock* merupakan batuan dengan pori-pori kosong yang tidak terdapat fluida di dalamnya. Pada pemodelan *dry rock* kali ini menggunakan pendekatan dari Pride (Lee, 2005) yang melibatkan faktor konsolidasi ( $\alpha$ ) yang digunakan sebagai

parameter untuk menentukan tingkat konsolidasi suatu batuan. Untuk batuan yang lebih terkonsolidasi memiliki nilai  $\alpha$  lebih rendah dibandingkan dengan batuan yang kurang terkonsolidasi. Pride merumuskan persamaan sebagai berikut:

$$K_{dry} = \frac{K_{min}(1 - \phi)}{(1 + \alpha\phi)} \quad (2.17)$$

$$\mu_{dry} = \mu_{sat} = \frac{\mu_{min}(1 - \phi)}{(1 + 1.5\alpha\phi)} \quad (2.18)$$

$$\mu_{dry} = \mu_{sat} = \frac{\mu_{min}(1 - \phi)}{(1 + \gamma\alpha\phi)} \quad (2.19)$$

Dengan  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{1 + 2\alpha}{1 + \alpha} \quad (2.20)$$

$K_{dry}$  = Bulk modulus dry rock

$K_{min}$  = Bulk modulus mineral

$\phi$  = Porositas

$\mu_{dry}$  = Shear modulus dry rock

$\mu_{sat}$  = Shear modulus saturated rock

$\alpha$  = Faktor konsolidasi

### 2.4.3 Pemodelan *Fluid Substitution* Gassmann

*Fluid substitution* merupakan bagian dari analisis seismik fisika batuan untuk identifikasi fluida dan kuantifikasi reservoir. Pada pemodelan ini menggunakan persamaan Gassmann yang umumnya dipakai untuk memprediksi perubahan kecepatan gelombang yang dihasilkan dari berbagai substitusi fluida pada zona target reservoir. Persamaan Gassmann dapat mencari nilai dari *bulk modulus* saturasi dari suatu batuan dengan cara menghubungkan *bulk modulus* mineral, *dry rock*, fluida, dan porositas batuan. Persamaan Gasmann diasumsikan porositasnya konstan atau tidak berubah dengan kehadiran fluida, porositas dianggap terhubung

dengan baik, sistemnya terisolasi, model batuan homogen dan isotropis, serta hasilnya yaitu batuan tersaturasi fluida 100%. Kekurangan dari persamaan Gassmann adalah tidak terlalu memperhatikan geometri pori dalam batuan. Berikut adalah persamaan umum Gassmann:

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - \frac{K_{dry}}{K_{min}})^2}{\frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{(1 - \phi)}{K_{min}} - \frac{K_{dry}}{K_{min}^2}} \quad (2.21)$$

Dalam persamaan Gassmann, nilai *shear modulus* pada *dry rock* diasumsikan sama dengan *shear modulus* pada batuan tersaturasi karena *shear modulus* tidak dipengaruhi atau tidak bergantung pada fluida. Serta *shear modulus* pada fluida adalah nol.

$$\mu_{dry} = \mu_{sat} \quad (2.22)$$

Tahap selanjutnya yaitu menghitung  $\rho_{sat}$  melalui:

$$\rho_{sat} = (1 - \phi)\rho_{min} + \rho_{fl}\phi \quad (2.23)$$

Dimana  $\rho_{min}$  jika terdiri dari 2 mineral:

$$\rho_{min} = f_1\rho_{min1} + f_2\rho_{min2} \quad (2.24)$$

Kemudian mensubstitusikannya ke dalam persamaan  $V_{P_{sat}}$  dan  $V_{S_{sat}}$  dari nilai  $K_{sat}$ ,  $\mu_{sat}$ , dan  $\rho_{sat}$  melalui:

$$V_{P_{sat}} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (2.25)$$

$$V_{S_{sat}} = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (2.26)$$

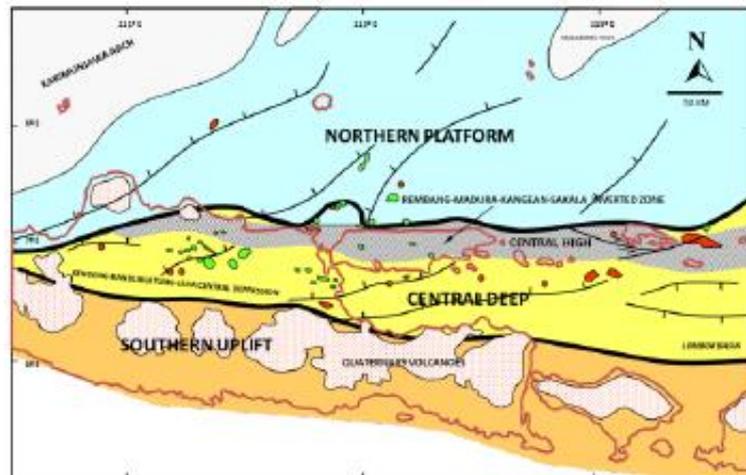
$K_{sat}$	= Bulk modulus saturated rock
$K_{dry}$	= Bulk modulus dry rock
$K_{min}$	= Bulk modulus mineral
$K_{fl}$	= Bulk modulus fluida
$\phi$	= Porositas
$\mu_{dry}$	= Shear modulus dry rock
$\mu_{sat}$	= Shear modulus saturated rock
$\rho_{sat}$	= Densitas saturated rock
$\rho_{min}$	= Densitas mineral
$\rho_{fl}$	= Densitas fluida
$f_1$ dan $f_2$	= Fraksi volume masing-masing mineral
$\rho_1$ dan $\rho_2$	= Densitas masing-masing mineral
$V_{P_{sat}}$ dan $V_{S_{sat}}$	= Kecepatan gelombang P dan S substitusi fluida

## BAB III

### TINJAUAN GEOLOGI

#### 3.1 Tinjauan Umum Geologi Regional

Lokasi penelitian berada di lapangan Gundih, Blora, Jawa Tengah, Indonesia. Secara geografis, Kabupaten Blora terletak diantara 111°16'-111°338' BT dan 6°528'-7°248' LS. Lapangan Gundih terletak di Cekungan Jawa Timur Utara yang merupakan zona lemah akibat penunjaman lempeng Indo-Australia ke arah barat laut di bawah lempeng Eurasia. Kemudian karena adanya pemindahan jalur zona tumbukan yang terus-menerus ke arah selatan Indonesia, maka sekarang Cekungan Jawa Timur Utara terbentuk sebagai *back-arc basin*. Cekungan Jawa Timur Utara tatanan geologinya terdiri dari *Northern Platform*, *Central Deep*, dan *Southern Upflit*. Cekungan Jawa Timur Utara dibatasi oleh busur Karimunjawa di sebelah Barat, Tinggian Masalembo di sebelah Utara, Cekungan Lombok di sebelah Timur, dan deretan gunung api aktif di sebelah Selatan.



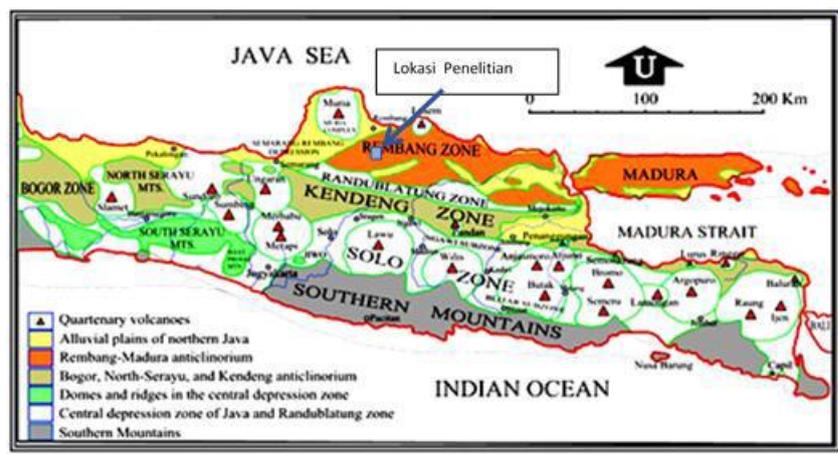
Gambar 3.1 Tatanan struktur geologi Cekungan Jawa Timur Utara (Satyana dan Darwis, 2001 dalam Devi dkk, 2017).

Cekungan Jawa Timur Utara dari utara ke selatan dibagi menjadi tiga mandala struktur antara lain:

1. Paparan Utara terdiri dari Paparan Kangean Utara, Paparan Madura Utara dan Busur Bawean.
2. Bagian tengah yaitu Tinggian Sentral terdiri dari Jawa Barat Laut (Kujung)-Madura-Kangean-Tinggian Lombok.
3. Bagian selatan yaitu Cekungan Selatan terdiri dari Zona Rembang-Selat Madura-Sub Cekungan Lombok.

### 3.2 Fisiografi Regional

Menurut Van Bemmelen (1949), fisiografi Cekungan Jawa Timur Utara yaitu Zona Antiklinorium Kendeng, Zona Antiklinorium Rembang, Dataran Aluvial Jawa Utara, dan Zona Depresi Randublatung.



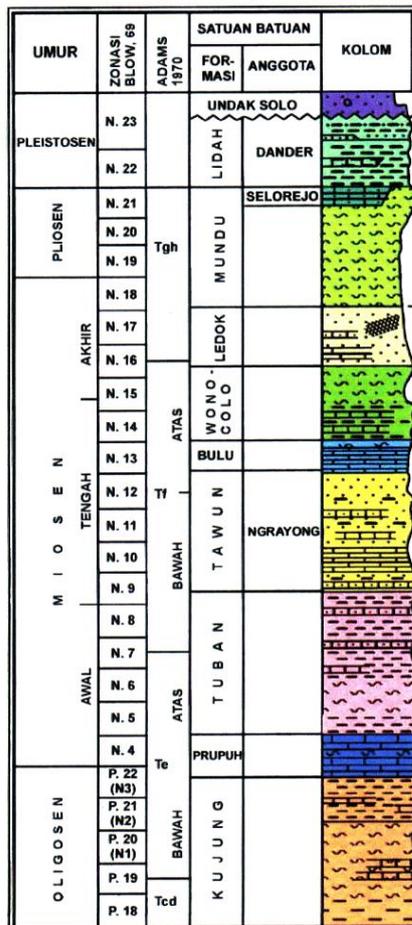
Gambar 3.2 Zona fisiografi cekungan Jawa Timur Utara (Van Bemmelen, 1949).

Daerah penelitian berada pada zona antiklinorium Rembang. Zona Rembang merupakan suatu perbukitan antiklinorium yang memanjang dengan arah timur-barat di sisi utara Pulau Jawa yang membentang dari bagian utara Purwodadi hingga ke Pulau Madura. Perbukitan lipatan di Zona Rembang umumnya tersusun secara *en-echelon* ke arah kiri (*left-stepping*), mengindikasikan kontrol patahan batuan alas (*basement faults*) geser sinistral berarah timur-timurlaut–barat-baratdaya yang membentuk antiklinorium Rembang tersebut. Zona Rembang dibedakan menjadi 2 bagian yaitu bagian Utara (*Northern Rembang Anticlinorium*) dan bagian Selatan

(*Middle Rembang Anticlinorium*) yang dipisahkan oleh lembah aliran Sungai Lusi di bagian barat, dan lembah aliran Sungai Kening (anak Sungai Bengawan Solo) di bagian timur (Husein, 2016).

### 3.3 Stratigrafi Regional

Zona Rembang berisi urutan sedimen Tersier, dimana urutan sedimen ini memiliki potensi *source rock* hidrokarbon dan sebagai reservoir yang baik (Takeshi Tsujidkk, 2015). Stratigrafi zona Rembang mengikuti skema yang disusun oleh Pringgoprawiro (1983) tersusun atas sepuluh formasi, yaitu Formasi Kujung, Prupuh, Tuban, Tawun, Ngrayong, Bulu, Wonocolo, Ledok, Mundu, dan Lidah (Gambar 3.3). Deskripsi dari masing–masing formasi dari urutan tua ke muda adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Kolom stratigrafi zona Rembang (Pringgoprawiro, 1983).

### 1. Formasi Kujung

Formasi Kujung merupakan satuan stratigrafi tertua yang tersingkap, formasi ini tersusun oleh napal abu-abu kehijauan dan lempung napalan kuning kecoklatan dengan sisipan batugamping bioklastik, batugamping bagian bawah merupakan batugamping kranji, sisipan bagian atasnya batulempung dan batugamping bioklastik. Umur Formasi Kujung adalah Oligosen atas, diendapkan pada lingkungan laut terbuka pada kedalaman antara 200 sampai 500 meter. Formasi Kujung ditutupi oleh Formasi Prupuh secara selaras.

### 2. Formasi Prupuh

Formasi Prupuh disusun oleh perselingan antara batugamping berwarna putih kotor dengan batugamping bioklastik putih abu-abu muda. Umur dari formasi ini adalah Oligosen atas-Miosen bawah, diendapkan pada lingkungan neritik luar. Formasi ini selaras terhadap Formasi Kujung di bawahnya, juga terhadap Formasi Tuban yang ada di atasnya.

### 3. Formasi Tuban

Formasi Tuban usia Miosen awal juga menandai perubahan yang dominan endapan karbonat dari siklus formasi Kujung yang dikenal sebagai zona *overpressure* (Takeshi Tsuji dkk, 2015). Kondisi geologi yang mempengaruhi *overpressure* adalah ketika terjadi pengendapan sedimen yang sangat cepat dengan jumlah signifikan dalam waktu yang sangat lama sehingga batuan mengalami kompaksi yang tidak normal (*undercompaction*). Formasi Tuban tersusun atas napal pasir berwarna putih abu-abu, semakin ke atas berubah menjadi endapan batulempung biru kehijauan dengan sisipan batugamping berwarna abu-abu kecoklatan yang kaya akan foraminifera orbitoid, koral dan algae. Semakin ke atas lagi berubah menjadi batugamping pasir berwarna putih kekuningan hingga coklat kekuningan. Umur dari Formasi Tuban ini adalah Miosen Awal bagian tengah, diendapkan pada lingkungan laut dalam.

#### 4. Formasi Tawun

Formasi Tawun tersusun atas serpih pasiran berwarna abu-abu hingga coklat abu-abu, kemudian disusul dengan perselingan antara batupasir coklat kemerahan, serpih pasiran dan batugamping kekuningan hingga kecoklatan, dimana makin ke atas batugamping menjadi lebih dominan dan mengandung fosil orbitoid yang besar-besar. Umur dari Formasi Tawun adalah Miosen awal bagian tengah-Miosen tengah, diendapkan pada lingkungan paparan yang agak dalam dari suatu laut terbuka.

#### 5. Formasi Ngrayong

Pada umur Miosen Tengah, juga dijumpai adanya batupasir kuarsa pada bagian bawah dan cenderung mengkasar pada bagian atas dan terkadang gampingan. Batupasir ini sebelumnya disebut sebagai anggota Ngrayong dari Formasi Tawun, namun kemudian disebut sebagai Formasi Ngrayong. Lokasi tipe Formasi Ngrayong adalah desa Ngrayong yang terletak kurang lebih 30 km di sebelah utara kota Cepu. Pada umumnya, satuan batuan ini dicirikan oleh batupasir kuarsa berselingan dengan batulempung, lanau, dan batugamping bioklastik. Ke arah atas dijumpai sisipan batugamping bioklastik yang mengandung fosil Orbitoid. Formasi Ngrayong diendapkan dalam fase regresif dari lingkungan laut dangkal zona neritik pinggir hingga rawa-rawa pada waktu Miosen Tengah. Ketebalan keseluruhan Formasi Ngrayong sangat beragam, di sebelah utara mencapai 800 sampai 1000 meter, sedangkan menipis di sebelah selatan menjadi 400 meter karena perubahan fasies menjadi batulempung. Dari sampel yang telah diambil menunjukkan batupasir tersortir dengan baik, menunjukkan permeabilitas yang baik (Takeshi Tsuji dkk, 2015). Formasi Ngrayong kontak dengan batugamping Formasi Tawun pada bagian bawah dan dibagian atas ditutupi oleh batugamping Formasi Bulu.

#### 6. Formasi Bulu

Formasi Bulu terletak di atas batupasir Ngrayong, mempunyai penyebaran yang luas di Antiklinorium Rembang Utara. Formasi Bulu terdiri dari batugamping putih kekuningan dan batugamping pasiran berwarna putih kelabu hingga

kuning keabuan, terdapat sisipan napal berwarna abu-abu, kaya akan foram besar dan kecil, koral, ganggang. Ketebalan satuan ini 54 sampai 248 meter. Umur Formasi Bulu adalah Miosen akhir bagian bawah, diendapkan pada lingkungan neritik luar. Formasi Bulu ditutupi oleh Formasi Wonocolo secara selaras.

#### 7. Formasi Wonocolo

Formasi Wonocolo tersusun oleh napal, napal lempungan, hingga napal pasiran, yang kaya akan foram plankton, terdapat sisipan kalkarenit dengan tebal lapisan 5 sampai 20 cm. Formasi Wonocolo memiliki tebal 89 sampai 600 meter, diendapkan pada Miosen akhir bagian bawah-Miosen akhir bagian tengah pada lingkungan neritik luar. Formasi Wonocolo ditutupi oleh Formasi Ledok secara selaras.

#### 8. Formasi Ledok

Formasi Ledok tersusun atas perulangan napal pasiran dan kalkarenit, dengan napal dan batupasir. Bagian atas dari satuan ini dicirikan batupasir dengan konsentrasi glaukonit. Kalkarenitnya sering memperlihatkan perlapisan silang-siur. Umur formasi ini adalah Miosen akhir bagian atas, diendapkan pada lingkungan neritik luar. Ketebalan Formasi Ledok secara keseluruhan mencapai 230 meter.

#### 9. Formasi Mundu

Formasi Mundu terdiri dari napal yang kaya foraminifera planktonik, tidak berlapis. Bagian paling atas dari satuan ini ditempati oleh batugamping pasiran yang kaya foraminifera planktonik. Bagian atas dari Formasi Mundu ini disebut anggota Selorejo, terdiri dari perselingan batugamping pasiran dan napal pasiran. Penyebarannya cukup luas, dengan ketebalan 75m sampai 342 meter. Berdasarkan fosil foraminifera planktonik yang ditemukan, umur anggota Selorejo adalah Pliosen. Formasi Mundu terbentuk sebagai hasil pengendapan laut dalam.

#### 10. Formasi Lidah

Formasi Lidah terdiri atas satuan batulempung biru tua, masif, tidak berlapis. Satuan ini dapat dipisahkan menjadi bagian atas, tengah, bawah. Pada bagian bawah Formasi Lidah merupakan satuan batulempung berwarna biru (Anggota Tambakromo). Bagian atasnya terdiri batulempung dengan sisipan napal dan batupasir kuarsa mengandung glaukonit (Anggota Turi). Di daerah Antiklin Kawengan kehadiran dua satuan ini dipisahkan dengan suatu satuan batugamping cocquina terdapat cangkang-cangkang moluska (Anggota Malo). Umur formasi ini Pliosen awal-Pleistosen akhir, diendapkan di lingkungan laut tertutup, dan berangsur-angsur menjadi semakin dangkal. Hubungan dengan Formasi Mundu adalah selaras, dan di atas Formasi Lidah ditutup secara tidak selaras oleh endapan alluvial dan endapan teras sungai.