

BAB II DASAR TEORI

2.1 Genesa Batubara

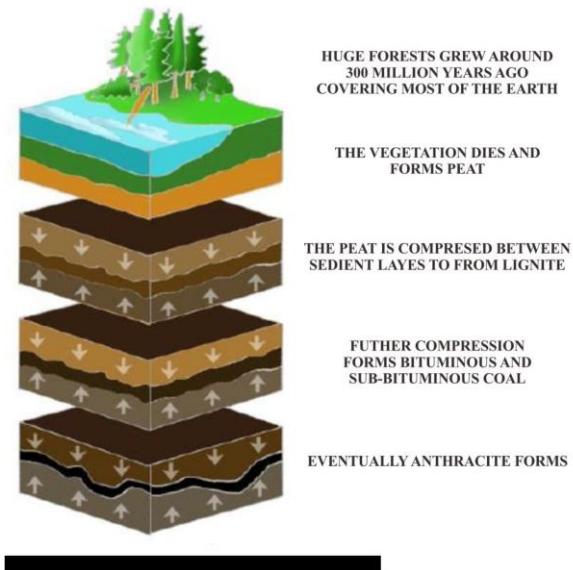
Batubara adalah batuan sedimen (padatan) yang dapat terbakar, berwarna coklat sampai hitam yang selanjutnya terkena proses fisika dan kimia yang berlangsung selama jutaan tahun sehingga mengakibatkan pengkayaan kandungan karbonnya (Anggayana, 2002).

Secara garis besar, batubara terdiri dari zat organik, air dan bahan mineral. Untuk menjadi batubara, ada beberapa tahapan penting yang harus dilewati oleh batuan dasar pembentuknya. Tahapan penting tersebut yaitu: tahap pertama adalah terbentuknya gambut (*peatification*) yang merupakan proses mikrobial dan perubahan kimia (*biochemical coalification*). Serta tahap berikutnya adalah proses-proses yang terdiri dari perubahan struktur kimia dan fisika pada endapan pembentukan batubara (*geochemical coalification*) karena pengaruh suhu, tekanan dan waktu. Ada enam parameter yang mengendalikan pembentukan batubara, yaitu adanya sumber vegetasi, posisi muka air tanah, penurunan yang terjadi bersamaan dengan pengendapan, penurunan yang terjadi setelah pengendapan, kendali lingkungan geoteknik endapan batubara dan lingkungan pengendapan terbentuknya batubara. Model geologi untuk pengendapan batubara menerangkan hubungan antara genesa batubara dan batuan sekitarnya baik secara vertikal maupun lateral pada suatu cekungan pengendapan dalam kurun waktu tertentu (Diessel, 1992).

2.1.1 Proses Pembentukan Batubara

Batubara berasal dari tumbuhan yang disebabkan karena adanya proses-proses geologi, kemudian berbentuk endapan batubara yang dikenal sekarang ini. Bahan-bahan tumbuhan mempunyai komposisi utama yang terdiri dari karbon dan hidrogen. Selain itu, terdapat kandungan mineral nitrogen. Substansi utamanya adalah *cellulose* yang merupakan bagian dari selaput sel tumbuhan yang mengandung karbohidrat yang tahan terhadap perubahan kimiawi. Pembusukan

dari bahan tumbuhan merupakan proses yang terjadi tanpa adanya oksigen, kemudian berlangsung di bawah air yang disertai aksi dari bakteri, sehingga terbentuklah arang kayu. Tidak adanya oksigen menyebabkan hidrogen lepas dalam bentuk karbondioksida atau karbonmonoksida dan beberapa dari keduanya berubah menjadi metan. Vegasi pada lingkungan tersebut mati kemudian terbentuklah *peat* (gambut). Kemudian gambut tersebut mengalami kompresi dan pengendapan di antara lapisan sedimen dan juga mengalami kenaikan temperatur akibat *geothermal gradient*. Karena banyaknya unsur oksigen dan hidrogen yang terlepas maka unsur karbon relatif bertambah yang mengakibatkan terjadinya lignit (*brown coal*). Kemudian dengan adanya kompresi yang terus menerus serta kenaikan temperatur maka terbentuklah batubara *subbituminous* dan *bituminous* dengan tingkat kalori yang lebih tinggi dibandingkan dengan *brown coal*. Bumi tidak pernah berhenti, oleh karena itu kompresi terus berlangsung diiringi bertambahnya temperatur sehingga *moisture* sangat sedikit serta unsur karbon yang banyak merubah batubara sebelumnya ke tingkat yang lebih tinggi, yaitu antrasit yang merupakan kasta tertinggi pada batubara (Cook, 1982). Proses pembentukan batubara sendiri dapat dilihat pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Proses Pembentukan Batubara (Cook, 1982)

2.1.2 Tempat Terbentuknya Batubara

Tempat terbentuknya batubara dikenal dua macam teori :

a. Teori Insitu

Teori ini mengatakan bahwa bahan – bahan pembentukan lapisan batubara, terbentuknya di tempat dimana tumbuh – tumbuhan asal itu berada. Setelah tumbuhan tersebut mati, belum mengalami proses transportasi, tertutup oleh lapisan sedimen dan mengalami proses *coalification*. Jenis batubara yang terbentuk dengan cara imi mempunyai penyebaran luas dan merata kualitasnya lebih baik, karena abunya relatif kecil.

b. Teori *Drift*

Teori ini menyebutkan bahwa bahan-bahan pembentuk lapisan batubara terjadinya di tempat yang berbeda dengan tempat tumbuhnya semula hidup dan berkembang. Tumbuhan yang telah mati diangkat oleh media air dan berakumulasi di suatu tempat, tertutup oleh batuan sedimen dan mengalami proses *coalification*. Jenis batubara yang terbentuk dengan cara ini mempunyai penyebaran yang tidak luas, tetapi dijumpai di beberapa tempat, kualitasnya kurang baik karena banyak mengandung material pengotor yang terangkut bersama selama selama proses pengangkutan dari tempat asal tanaman ke tempat sedimentasi. Batubara yang terbentuk seperti di Indonesia di dapatkan di area pertambangan batubara delta Mahakam purba, Kalimantan Timur.

2.1.3 Jenis Batubara dan Sifatnya

Berdasarkan tingkat proses pembentukannya yang dikontrol oleh tekanan, panas, dan waktu, batubara umumnya dibagi dalam lima jenis yaitu antrasit, bituminus, sub-bituminus, lignit dan gambut.

1. Antrasit

Antrasit merupakan kelas batubara tertinggi, dengan warna hitam berkilauan (*luster*) metalik, mengandung antara 86-98% unsur karbon (C) dengan kadar air kurang dari 80%. Nilai yang dihasilkan hampir 15.000 BTU per pon.

2. Bituminus

Bituminus mengandung 68-86% unsur karbon (C) serta kadar air 8 -10% dari beratnya, nilai panas yang dihasilkan antara 10.500-15.500 BTU per pon.

3. Sub – Bituminus

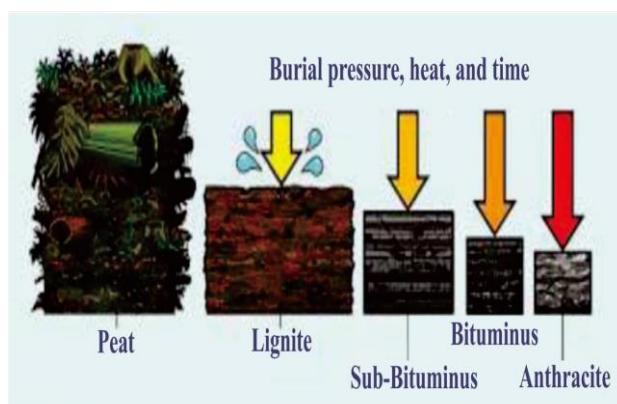
Sub – Bituminus mengandung sedikit karbon dan banyak air, oleh karenanya menjadi sumber panas yang kurang efisien dibandingkan dengan *Bituminus*, dengan kandungan karbon 3-45% dan menghasilkan nilai panas antara 8.300 hingga 13.000 BTU per pon.

4. Lignit

Lignite biasa disebut juga dengan *brown coal* adalah batubara yang sangat lunak yang mengandung air 35-75% dari beratnya. Lignite merupakan batubara geologis muda yang memiliki kandungan karbon terendah, 25-35%. Nilai panas yang dihasilkan berkisar antara 4.000 hingga 8.300 BTU per pon.

5. Gambut

Gambut berpori dan memiliki kadar air diatas 75% serta nilai kalori yang paling rendah.



Gambar 2.2 Jenis, Kelas, dan Sifat Batubara (Sukandarrumidi, 1995)

2.2 Konsep Dasar Well Logging

Konsep dasar pengukuran *well logging* merupakan suatu pengukuran pada sumur atau lubang bor secara berkesinambungan dengan beberapa parameter ukur sesuai dengan kedalaman. Sesuai dengan tujuan *logging* yaitu menentukan besaran fisik batuan maka dasar dari *logging* sendiri adalah sifat-sifat fisik atau petrofisik dari batuan (Harsono, 1997). Parameter fisik tersebut berupa sifat-sifat porositas, resistivitas, temperatur, densitas, permeabilitas, dan kemampuan cepat rambat yang direkam oleh gelombang elektron.

Well Logging secara sederhana merupakan suatu pencatatan perekaman penggambaran sifat, karakter, ciri, data, keterangan, dan urutan bawah permukaan. Sehingga diagram yang didapatkan akan merupakan gambaran hubungan antara kedalaman (*depth*) dengan karakter atau sifat yang terdapat pada formasi. Data logging diperoleh dengan cara memasukkan alat deteksi (*sound*) ke dalam lubang bor sehingga akan diperoleh kurva log yang akan memberikan gambaran hubungan antara kedalaman dan sifat fisik batuan. Dalam eksplorasi batubara, sasaran yang ingin dicapai adalah nilai ekonomis dari cadangan. Untuk menghitung cadangan ini diperlukan data ketebalan lapisan batubara. Interpretasi litologi dilakukan berdasarkan data log yang diambil.

Well logging dapat dilakukan dengan dua cara yaitu *openhole logging* dimana *logging* tidak memakai *casing* dan *casedhole logging* dimana *logging* dengan memakai *casing*. Dalam proses pengeboran, komponen utama yang digunakan yakni lumpur pemboran atau *mud logging*. Digunakannya komponen ini adalah agar tidak terjadinya *blow out* saat fase pemboran sebelum dilakukannya *casing* dengan sistem memberi tekanan pada formasi. Namun dalam kenyataannya lumpur memaksa hidrokarbon masuk ke dalam formasi untuk menjauhi lubang bor dan berupaya untuk mencegah hidrokarbon tersembur keluar permukaan. Akibatnya pada beberapa lapisan *permeabel* terdapat penyusupan (*infiltrasi*) air lumpur pada dinding sumur sehingga memaksa kandungan lapisan semula lebih dalam dan pada dinding sumur tersebut membentuk suatu kerak lumpur (*mud*

cake) yang menyebabkan diameter sumur lebih kecil. Akibatnya pada lapisan ini terbentuk tiga daerah infiltrasi sebagai berikut :

a. *Flushed zone atau Invanded zone*

Zona ini merupakan yang paling dekat dengan lubang sumur bor dan terisi oleh lumpur. Sehingga jika dilakukan pengukuran fisik pada zona ini, yang dikur bukan sifat kandungan semula (asli) melainkan sifat dari air lumpurnya.

b. *Transition zone*

Zona ini merupakan daerah yang lebih dalam dari *invanded zone* atau biasa disebut dengan zona yang berada di tengah-tengah. Daerah ini terisi oleh campuran air lumpur dan kandungan semula.

c. *Uninvanded zone*

Zona ini merupakan daerah yang tidak adanya pengaruh air lumpur dan letaknya paling jauh dari lubang sumur bor.

Pemboran sumur dibagi menjadi dua, yaitu *Openhole logging* dan *Casedhole logging*.

a. *Openhole logging*

Pada umumnya tahap ini semua jenis log dapat dilakukan. *Openhole logging* adalah kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur atau lubang bor yang belum dilakukan pemasangan *casing*.

b. *Casedhole logging*

Casedhole logging merupakan kegiatan *logging* yang dilakukan pada sumur atau lubang bor yang telah dipasang *casing*.

Kegunaan *well logging* dan hubungannya dalam eksplorasi geofisika (Harsono, 1993) yaitu :

1. Membantu menemukan litologi bawah permukaan dan kedalaman serta ketebalan lapisan.
2. Membantu menemukan kualitas batubara sejak awal kegiatan eksplorasi dan membantu menemukan porositas dan suhu bawah permukaan.

3. Mengkorelasikan lapisan batubara. Menentukan kandungan *shale* serta menentukan lapisan *permeable* dan *impermeable*.

Logging geofisika digunakan untuk mengecek apakah data yang dihasilkan dari pengeboran eksplorasi dengan cara openhole maupun coring sama atau tidak, khususnya untuk lapisan batubara, karena perbedaan ketebalan akan memiliki pengaruh terhadap perhitungan cadangan batubara.

2.2.1 Jenis Log yang Digunakan

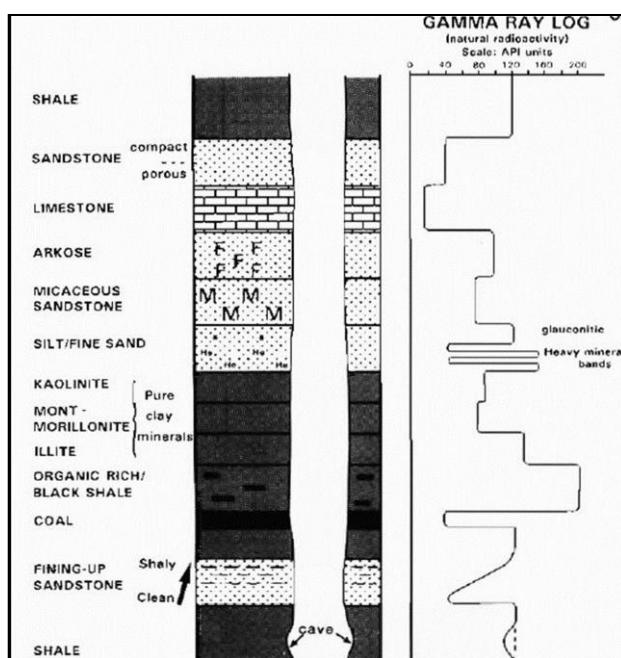
Dalam eksplorasi batubara, kombinasi log yang terdiri dari Log *Gamma ray*, Log *Caliper*, Log *Long Spaced Density*, dan Log *Short Spaced Density* digunakan untuk mengetahui secara langsung keadaan di bawah permukaan dengan memasukkan kombinasi alat log tersebut ke dalam sumur bor yang pengukurannya berdasarkan sifat-sifat fisik batuan dengan target yaitu mencari lapisan batubara.

1. Log *Gamma Ray*

Log *Gamma Ray* adalah metode untuk mengukur radiasi sinar gamma yang dihasilkan oleh unsur-unsur radioaktif yang terdapat dalam lapisan batuan di sepanjang lubang bor. Unsur radioaktif yang terdapat dalam lapisan batuan tersebut diantaranya *Uranium*, *Thorium*, *Potassium*, *Radium*, dan lain-lainnya. Unsur radioaktif umumnya banyak terdapat dalam *shale* dan sedikit sekali terdapat dalam *sandstone*, *limestone*, *dolomite*, *coal*, *gypsum*, dan lain-lainnya. Oleh karena itu *shale* akan memberikan response gamma ray yang sangat signifikan dibandingkan dengan batuan yang lainnya. Log sinar gamma merekam puncaran radioaktif dari formasi. Sinar radioaktif alami yang direkam berupa *Uranium*, *Thorium*, dan *Potassium*. Log sinar gamma sederhana memberikan rekaman kombinasi dari tiga unsur radioaktif, sedangkan spektral gamma ray menunjukkan masing-masing unsur radioaktif (Rider, 1996). Log *gamma ray* memiliki satuan API (*American Petroleum Institute*).

Log *gamma ray* digunakan untuk membedakan lapisan-lapisan *shale* dan *nonshale* pada sumur-sumur *openhole* atau *casedhole* dan juga pada kondisi ada lumpur maupun tidak. Sinar gamma sangat efektif dalam membedakan lapisan *permeable* dan *non-permeable* karena unsur-unsur radioaktif cenderung berpusat di dalam serpih yang *non-permeable* dan tidak banyak terdapat dalam batuan karbonat atau pasir yang secara umum besifat *permeable*. Selain itu, Log *gamma ray* dapat digunakan sebagai pengganti SP Log untuk pendekstian lapisan *permeable*, karena untuk formasi yang tidak terlalu resistif hasil SP Log tidak terlalu akurat.

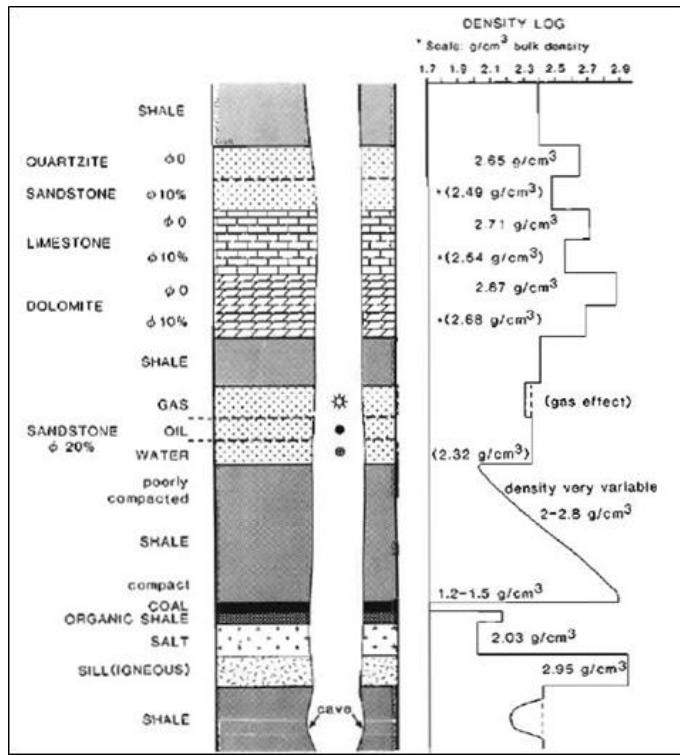
Pada interpretasi lapisan batubara, nilai gamma raynya memperlihatkan harga yang paling rendah, karena batubara sangat sedikit mengandung unsur *Kalium*. Respon gamma dengan harga yang lebih besar daripada batubara diperlihatkan oleh respon lapisan keras yang banyak mengandung silica, dan kemudian oleh respon batupasir. Respon gamma yang tinggi diperlihatkan oleh batulanau dan batulempung (Abdullah, 2009).



Gambar 2.3 Respon log *gamma ray* terhadap berbagai litologi (Rider, 1996)

2. Log Densitas

Log densitas merupakan kurva yang menunjukan nilai densitas (*bulk density*) batuan yang ditembus lubang bor, dinyatakan dalam gr/cc. Secara geologi *bulk density* adalah fungsi dari densitas dari mineral-mineral pembentuk batuan (misalnya matriks) dan volume dari fluida bebas yang mengisi pori (Rider, 1996). Besaran densitas ini selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai porositas batuan tersebut. Log densitas merupakan suatu tipe log porositas yang mengukur densitas elektron suatu formasi. Prinsip pencatatan dari log *density* adalah suatu sumber radioaktif yang dimasukkan kedalam lubang bor mengemisikan sinar gamma ke dalam formasi. Pada formasi tersebut sinar akan bertabrakan dengan elektron dari formasi. Pada setiap tabrakan sinar gamma akan berkurang energinya. Sinar gamma yang terhamburkan dan mencapai detektor pada suatu jarak tertentu dari sumber dihitung sebagai indikasi densitas formasi. Jumlah tabrakan merupakan fungsi langsung dari jumlah elektron didalam suatu formasi. Karena itu log densitas dapat mendeterminasi densitas elektron formasi dihubungkan dengan densitas *bulk* sesungguhnya didalam *gr/cc*. Harga densitas matriks batuan, porositas, dan densitas fluida pengisi formasi. Log densitas merupakan log yang sangat baik digunakan untuk megidentifikasi batubara. Pada log ini batubara memiliki harga densitas yang rendah karena batubara memiliki density matrix yang rendah. Hal tersebut dapat menyebabkan porositas semu batubara akan menurun sedangkan densitas batubara akan meningkat. (Franscisca, 2011).



Gambar 2.4 Respon log densitas terhadap beberapa litologi (Rider, 1996)

Karakteristik masing-masing batuan pada *log density* sebagai berikut :

- Batubara mempunyai densitas yang rendah (1,20-1,80) gr/cc
- Konglomerat mempunyai densitas menengah (2,25 gr/cc)
- Mudstone, batupasir, batugamping mempunyai densitas menengah sampai tinggi (2,65-2,71) gr/cc
- Batuan vulkanik bassa dan batuan vulkanik non basa mempunyai densitas tinggi (2,75-2,85) gr/cc

2.2.2 Korelasi Lapisan Batubara

Korelasi merupakan suatu proses yang digunakan untuk menghubungkan titik-titik kesamaan waktu atau penghubungan satuan-satuan stratigrafi dengan mempertimbangkan kesamaan waktu (Sains Stratigrafi Indonesia, 1996).

Menurut *North American Stratigraphy Code* (1983). Ada tiga prinsip korelasi, yaitu:

- a. Litokorelasi, yang menghubungkan unit yang sama pada litologi dan posisi stratigrafinya.
- b. Biokorelasi, yang secara cepat menyamakan fosil dan posisi biostratigrafinya.
- c. Kronokorelasi, yang secara cepat menyesuaikan umur dan posisi kronostratigrafi.

2.3 Parameter Elastik Batuan

Parameter elastik batuan merupakan parameter yang menggambarkan hubungan *stress-strain* pada batuan. Teori elastisitas berhubungan dengan deformasi yang disebabkan oleh tekanan pada batuan tertentu. Elastisitas merupakan suatu kajian yang membahas tentang masalah *strain* (regangan) yang terjadi pada suatu benda bila benda tersebut dikenai *stress*, sehingga mengakibatkan bahan tersebut mengalami deformasi. Dalam kasus ini, bahan dikatakan mempunyai sifat elastis jika bahan tersebut merenggang bila dikenai *stress* dan kembali keadaan semula bila stress dihilangkan (Turcote: 1982, Telford: 1975). *Stress* merupakan gaya persatuhan luas yang ditransmisikan melalui materi suatu benda oleh medan gaya antar atom. Bila suatu benda elastik dikenakan *stress*, maka benda akan mengalami perubahan dalam bentuk dimensi. Batuan sebagai bahan utama pembentuk kerak bumi berperan penting pada tata ruang pada kerak bumi mempunyai parameter elastik, seperti Poisson ratio, *modulus of rigidity*, modulus *Young*, modulus *Bulk* dan tetapan *Lame*, serta porositas. Semua parameter elastik ini disebut dengan konstanta elastik.

Pengetahuan tentang konstanta elastik suatu batuan sangat penting karena harga ini mencerminkan sifat batuan tersebut. Berdasarkan harga konstanta ini dapat diketahui kekuatan dan daya dukung (*bearing capacity*) batuan terhadap beban yang dikenakan padanya. Harga porositas suatu batuan sangat membantu dalam menentukan kandungan fluida seperti gas alam, minyak bumi, atau air tanah dalam suatu reservoir.

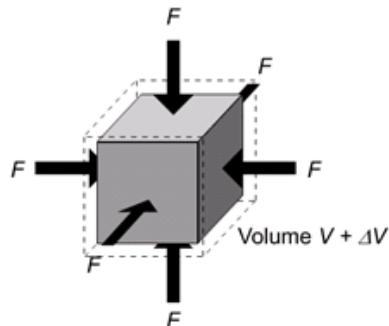
2.3.1 Modulus Bulk dan Modulus Shear

Bulk modulus disebut juga dengan inkompresibilitas atau didefinisikan sebagai ketahanan suatu batuan terhadap gaya kompresional. Modulus bulk (k) merupakan parameter elastik batuan yang peka terhadap kehadiran gas dalam pori-pori batuan. Parameter *bulk modulus*, *shear modulus* dan parameter-parameter elastik batuan lainnya tidak secara langsung dapat diukur, melainkan dengan menggunakan perantara parameter lain yang berhubungan. Sehingga dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$K = \frac{F/A}{\Delta V/V} \quad (2.1)$$

Dengan,

K	: modulus bulk (Gpa)
F	: gaya kompresional (N)
A	: luas area (m^2)
V	: volume awal (m^3)
ΔV	: selisih perubahan volume (m^3)



Gambar 2.5 Gaya kompresional pada batuan (Mavko et al., 2009)

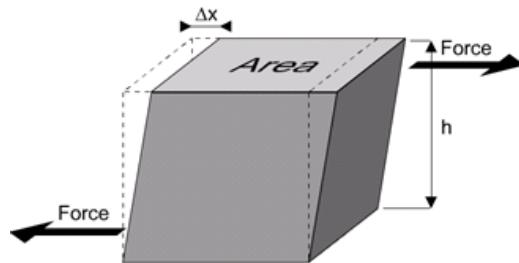
Shear modulus merupakan konstanta perbandingan antara *stress-strain* terhadap gaya geser. Pada gambar 2.5 terlihat pada saat *shear* mengenai *body* batuan, maka akan menghasilkan *stress* yang kemudian akan menghasilkan suatu *strain* berupa perubahan panjang permukaan yang bergeser. *Shear modulus* disebut juga dengan

rigidity, yang didefinisikan sebagai ketahanan suatu *body* batuan terhadap *shear stress*. *Shear modulus* dinyatakan dalam suatu persamaan sebagai berikut :

$$\mu = \frac{F/A}{\Delta x/h} \quad (2.2)$$

Dengan,

- μ : *shear modulus* (Gpa)
- F : gaya geser (N)
- A : luas area (m^2)
- h : perubahan panjang bodi batuan yang sejajar dengan F (m)
- Δx : panjang *body* batuan tegak lurus F (m)



Gambar 2.6 Gaya *shear* pada batuan (Mavko et al., 2009)

2.3.2 Densitas

Densitas merupakan properti fisika yang berubah secara signifikan pada berbagai jenis batuan yang memiliki perbedaan dalam mineralogi dan porositas. Dengan mengetahui distribusi densitas batuan bawah permukaan, maka banyak informasi mengenai geologi bawah permukaan yang dapat dipelajari (Wyllie *et al*, 1956). Densitas (ρ) didefinisikan sebagai hasil bagi massa (m) dengan volume (vol) material:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.3)$$

Dengan satuan densitas adalah $kg.m^{-3}$

Besarnya densitas batuan suatu material dipengaruhi oleh jenis dan jumlah mineral serta persentasenya, porositas batuan, dan fluida pengisi rongga.

2.3.3 Porositas

Porositas batuan didefinisikan adalah salah satu sifat akustik dari reservoir sebagai parameter kemampuan batuan dalam menyimpan fluida, dinyatakan dalam persen (%) atau fraksi. Terdapat dua jenis porositas, yaitu:

- a. Porositas absolut adalah perbandingan antara volume pori-pori total batuan terhadap volume total batuan.

$$\phi = \frac{\text{volume pori-pori}}{\text{volume total batuan}} \times 100\% \quad (2.4)$$

- b. Porositas efektif adalah perbandingan antara volume pori-pori batuan yang saling berhubungan dengan volume total batuan.

$$\phi_{\text{efektif}} = \frac{\text{volume pori yang berhubungan}}{\text{volume total batuan}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Adapun perhitungan nilai porositas berdasarkan log densitas atau nilai densitasnya maka secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\phi D = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (2.6)$$

Dimana:

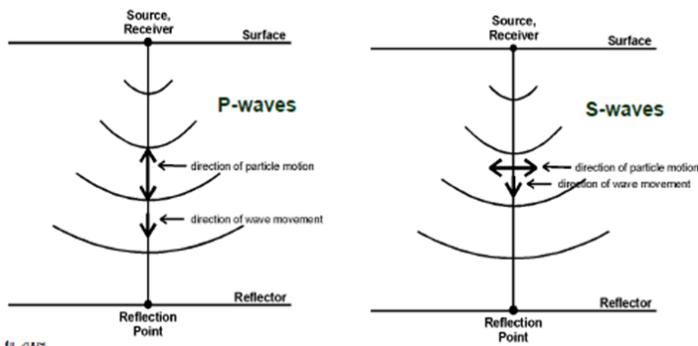
- | | |
|-------------|---|
| ΦD | : Porositas Densitas |
| ρ_{ma} | : Densitas matriks batuan (gr/cc) |
| ρ_b | : Densitas matriks batuan dari log (gr/cc) atau <i>RHOB</i> |
| ρ_f | : Densitas fluida batuan |

Nilai porositas batuan biasanya diperoleh dari hasil perhitungan data log sumur, yaitu dari data log densitas, log neutron, dan log kecepatan. Secara umum

porositas batuan akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman batuan, karena semakin dalam batuan akan semakin kompak akibat efek tekanan diatasnya. Nilai porositas juga akan mempengaruhi kecepatan gelombang seismik. Semakin besar porositas batuan maka kecepatan gelombang yang melewatiinya akan semakin kecil, dan demikian pula sebaliknya. Butiran dan karakter geometris (susunan, bentuk, ukuran dan distribusi) proses diagenesa dan kandungan semen, kedalaman dan tekanan (Koesomadinata, 1978).

2.3.4 Hubungan Gelombang P dan Gelombang S

Kecepatan gelombang seismik berkaitan dengan deformasi batuan dalam fungsi waktu. Terdapat dua jenis kecepatan gelombang seismik, yaitu kecepatan gelombang P dan gelombang S. Arah pergerakan partikel saat dijalari gelombang S akan tegak lurus dengan arah perambatan gelombang.



Gambar 2.7 Arah perambatan gelombang P dan gelombang S (HRS, 2009)

Untuk mendapatkan nilai V_p dan V_s menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_p = \sqrt{\frac{K+4/3\mu}{\rho}} \quad (2.7)$$

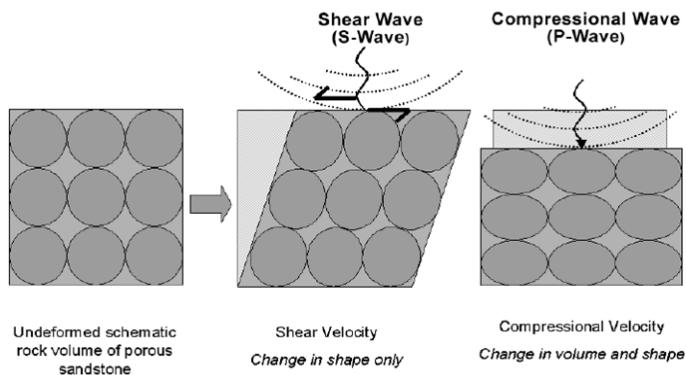
$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.7, maka persamaan 2.8 dapat dinyatakan ke dalam bentuk:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \quad (2.9)$$

Dimana:

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| V_p | : kecepatan gelombang P |
| V_s | : kecepatan gelombang S |
| k | : modulus bulk |
| μ | : modulus shear |
| ρ | : densitas batuan |
| λ dan μ | : parameter Lame |



Gambar 2.8 Deformasi batuan akibat gelombang P dan gelombang S

Hubungan antara V_p dan V_s diperoleh juga melalui hubungan empiris yang dinyatakan oleh Raymer (1980).

Wyllie (1956) menurunkan persamaan empiris untuk menghitung nilai kecepatan sebagai fungsi porositas yang dikenal dengan persamaan *time average*. Kecepatan dihitung dengan mengetahui nilai kecepatan gelombang pada matriks batuan (V_m) dan kecepatan gelombang pada fluida (V_f). Persamaan Wyllie dituliskan,

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{1-\phi}{V_m} \quad (2.10)$$

Persamaan empiris yang menyatakan hubungan antara kecepatan dan porositas pada batuan sedimen tak termampatkan untuk porositas kurang dari 37% adalah (Raymer, 1980),

$$V_p = (1 - \phi)^2 V_m + \phi V_f \quad (2.11)$$

$$V_s = (1 - \phi)^2 V_m \sqrt{\frac{(1-\phi)\rho_m}{(1-\phi)\rho_m + \phi\rho_f}} \quad (2.12)$$

Dimana V_p adalah kecepatan gelombang P dalam batuan sedimen berpori tersaturasi fluida, V_m adalah kecepatan gelombang di dalam matriks batuan dan V_f adalah kecepatan gelombang di dalam fluida pori.

2.4 Pemodelan Fisika Batuan

Pemodelan fisika batuan merupakan salah satu bentuk dari *forward modelling* dalam memodelkan suatu batuan. Pemodelan ini membutuhkan kerangka untuk mengenai tahapan pemodelan tersebut sehingga mendapatkan parameter yang diinginkan. Berikut ini merupakan tahap-tahap yang dilakukan pada pemodelan *rock physics* (Ambarsari, 2015).

2.4.1 Pemodelan Kerangka *Solid Rock*

Solid rock merupakan suatu fasa batuan yang sepenuhnya terisi matriks dan tersusun atas beberapa mineral. Pada pembuatan kerangka *solid rock* ini tidak melibatkan inklusi dan fluida, karena pada hal ini beranggapan bahwa *solid rock* merupakan murni dari batuan itu saja dan dianggap tidak memiliki porositas ($\phi=0$).

2.4.2 Voigt-Reuss-Hill Bound

Pendekatan lain untuk menentukan batas bawah dan batas atas modulus elastisitas (batuan adalah dengan menggunakan persamaan Voigt, Reuss dan Hill. Pemodelan Voigt (*upper bound*) dan Reuss (*lower bound*) merupakan pemodelan secara teoritis yang sederhana untuk mendapatkan besaran modulus elastik dan fraksi mineral batuan yang paling mendekati *properties* batuan sebenarnya dengan menggunakan data *petrophysics* yang ada. Kelemahan dari pemodelan ini adalah tidak bisa mengetahui geometri pori pada reservoir tersebut. Batas atas Voigt M_v untuk modulus elastisitas efektif adalah,

$$M_v = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (2.13)$$

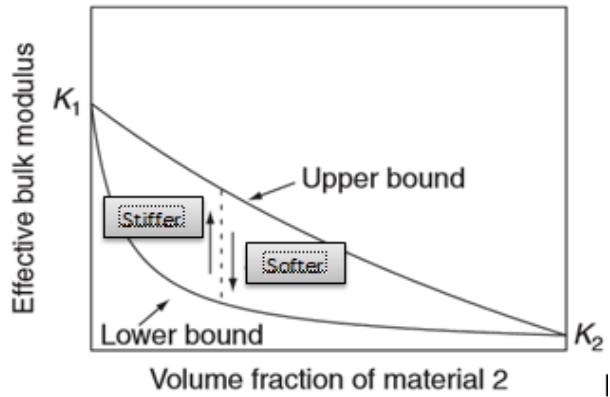
Dan batas bawah Reuss (1929) diberikan oleh,

$$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i} \quad (2.14)$$

Dimana f_i menunjukkan fraksi volume dari fasa pengisi, M_i adalah modulus elastisitas pada fasa ke-i (mavko, 2009). Hill (1952) membuat persamaan empiris yang dikenal sebagai *Voigt-Reuss-Hill Average* untuk menyederhanakan perhitungan dengan persamaan sebagai berikut :

Dengan M_v adalah modulus elastisitas Voigt dan M_R adalah nilai modulus elastisitas Reuss.

$$M_{VRH} = \frac{M_v + M_R}{2} \quad (2.15)$$



Gambar 2.9 Model Voigt-Reuss-Hill (Mavko et al., 2009)

2.4.3 Pendekatan Pride

Pendekatan Pride secara umum didapatkan melalui pengukuran di laboratorium (Murphy et al., 1993) dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K_{dry} = \frac{K_{min}(1-\phi)}{(1+\alpha\phi)} \quad (2.16)$$

dan,

$$\mu_{dry} = \frac{\mu_{min}(1-\phi)}{(1+1.5\alpha\phi)} \quad (2.17)$$

K_{dry} : modulus bulk *dry rock*

K_{min} : modulus bulk mineral

μ_{dry} : modulus *shear dry rock*

μ_{sat} : modulus *shear saturated rock*

ϕ : porositas

α : faktor konsolidasi

Pada penelitian ini pemodelan *dry rock* digunakan dengan menggunakan pendekatan Pride yang melibatkan faktor konsolidasi (α). Faktor konsolidasi Pride digunakan sebagai parameter untuk menentukan tingkat konsolidasi suatu batuan. Pada umumnya batuan yang lebih terkonsolidasi memiliki nilai α lebih rendah dibandingkan dengan batuan yang kurang terkonsolidasi.

2.4.4 Persamaan Lee

Persamaan Lee merupakan persamaan untuk mendapatkan nilai dari modulus *shear*, persamaan modulus *shear* dari *dry rock* dengan menggunakan nilai γ sehingga didapatkan nilai dari modulus *shear* (Lee, 2005) dengan menggunakan persamaan :

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

dimana,

$$\gamma = \frac{1+2\alpha}{1+\alpha} \quad (2.19)$$

Ketika $\alpha=1$, maka $\gamma=1.5$. Nilai γ akan berbeda seiring dengan faktor konsolidasi yang akan dimasukkan kedalam persamaan tersebut. Faktor konsolidasi ini akan berperan pada saat pemodelan kerangka *solid rock*.

2.4.5 Prediksi Kecepatan Gelombang S

Untuk menentukan kecepatan gelombang dalam kerangka *dry rock* dapat dikalkulasikan secara apriori. Persamaan tersebut dapat digunakan untuk memprediksi kecepatan gelombang P dan S dengan menggunakan persamaan

kecepatan gelombang P dan S pada umumnya, namun menggunakan parameter elastik pada keadaan *dry rock*. Sehingga persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{dry} + \frac{4}{3}\mu_{dry}}{\rho}} \quad (2.19)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{dry}}{\rho}} \quad (2.20)$$

K_{dry} : *bulk modulus* kerangka *dry rock*

μ_{dry} : *shear modulus* kerangka *dry rock*

ρ : densitas batuan