

BAB II

TEORI DASAR

2.1. Fisika Batuan

Fisika batuan (*rock physics*) merupakan ilmu sains untuk interpretasi seismik kuantitatif yang membahas mengenai hubungan antara pengamatan geofisika, terutama hasil pengukuran seismik dengan sifat fisik batuan, seperti komposisi, porositas, dan kandungan fluida (Ambarsari, 2015). Pemodelan fisika batuan adalah salah satu cara untuk memahami karakteristik dari batuan reservoir. Pemodelan fisika batuan didasarkan dari ketersediaan data yang digunakan, baik dari data core maupun data log. Dengan mengetahui jenis batuan penyusun dari reservoir, dapat dilakukan pemodelan fisika batuan berdasarkan sifat elatisitas dari batuan. Kalibrasi hubungan fisika batuan didasarkan pada log sumur lokal yang biasanya dilengkapi dengan data regional.

Pemodelan fisika batuan menghubungkan perubahan dalam sifat-sifat reservoir, seperti saturasi fluida pori, *stress-strain*, dan parameter gelombang. Fisika batuan memerlukan pertimbangan bagaimana komposisi batuan tersebut untuk menentukan hubungan *stress-strain* dan respon seismiknya. Efek fluida pori dapat diterapkan pada industri hidrokarbon. Dalam alur kerja interpretasi seismik, fisika batuan dapat digunakan untuk menghubungkan parameter impedansi dan elastisitas yang berasal dari data seismik ke sifat batuan tertentu.

2.2. Petrofisika

Petrofisika (*petrophysics*) merupakan salah satu ilmu geofisika yang mempelajari tentang sifat fisik dari suatu batuan yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan dan laboratorium berupa rekaman *logging*. Beberapa sifat fisik tersebut adalah porositas, permeabilitas, tingkat saturasi air, resistivitas batuan, dan beberapa sifat fisik lainnya. Ilmu ini diperlukan untuk melakukan analisa formasi batuan, serta hasil dari pengambilan data pada lubang bor untuk mengetahui unsur kandungan batuan.

Mempelajari karakteristik fisik suatu batuan sangat penting untuk lebih mengenal batuan yang akan diamati. Hal tersebut dapat membantu dalam meramalkan cadangan minyak dengan cara mengetahui sifat fisik batuan tersebut. Di industri minyak dan gas, sifat fisik batuan sangat penting dipelajari mengetahui karakter reservoir (batuan tempat menyimpan hidrokarbon) sebagai batuan yang layak untuk dilakukan pengeboran ataupun produksi lebih lanjut.

2.3. Digital Rock Physics

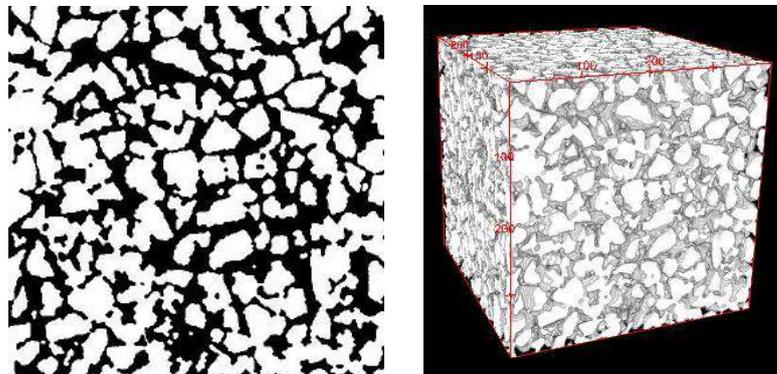
Digital Rock Physics (DRP) merupakan salah satu metode berbasis citra digital untuk mencari besaran-besaran fisis dari batuan dengan sifat yang lebih efektif dan efisien. Sifat batuan yang biasanya dicari adalah porositas, *specific surface area*, dan permeabilitas. Dalam perkembangannya, DRP dapat menunjukkan properti fisik batuan dalam skala mikro dengan parameter mikrostruktur seperti pori, ukuran butir, konektivitas pori, dan luas permukaan (Latief dkk, 2012).

DRP mengubah sampel reservoir menjadi citra digital dengan alat *Micro Computed Tomography Scan* (μ CT-Scan) yang menghasilkan citra proyeksi dari sampel batuan reservoir. Dari proyeksi sampel tersebut, dilakukan rekonstruksi menjadi citra penampang atau sayatan. Kemudian, citra hasil rekonstruksi diolah agar mendapatkan besaran-besaran fisis batuan yang diinginkan seperti porositas, *specific surface area*, dan permeabilitas. Nilai porositas, *specific surface area*, dan permeabilitas dapat dimodelkan dengan menggunakan *software* sehingga akan menghasilkan model 3D porositas dan permeabilitas dari sampel batuan reservoir.



Gambar 2.1. Alat μ CT-Scan Tipe SkyScan 1173 (FMIPA ITB)

μ CT-Scanning merupakan teknik investigasi contoh batuan tanpa harus merusak contoh batuan itu sendiri (*non-destructive*) yang mulai berkembang di pertengahan tahun 1980an. Objek dapat diputar satu putaran penuh (*rotation stage*) untuk mendapatkan citra digital dari semua sisi. μ CT-Scan digunakan untuk memetakan, memproyeksikan struktur suatu material dalam ruang tiga dimensi (*3D projection*) dengan bantuan penyinaran sinar-X. Cara kerja alat ini sama dengan perangkat *CT-Scan* yang digunakan dalam dunia medis. Perbedaan utama antara perangkat μ CT dengan perangkat *CT-Scan* medis adalah bahwa resolusi (ketelitian) struktur yang bisa diproyeksikan perangkat μ CT-Scan bisa mencapai 5 mikrometer per pixel. Perangkat μ CT-Scan menghasilkan serangkaian citra proyeksi yang kemudian direkonstruksi untuk menghasilkan citra struktur 3D dari material sampel. Dengan citra struktur 3D ini, maka serangkaian analisis dapat dilakukan dengan berbasis pemrosesan dan analisis citra.



Gambar 2.2. Hasil Citra Batuan 2D dan 3D

Metode DRP akan menghasilkan *CT image* yang mampu memvisualisasikan struktur mikro batuan seperti pori dan kepadatan matriks. *CT image* yang dikombinasikan dengan perhitungan digital mampu memberikan hasil visualisasi pori, nilai prediksi porositas, nilai prediksi permeabilitas, fraksi matriks padat batuan, serta elastisitas sampel batupasir. Metode DRP ini dikombinasikan dengan fisika batuan dapat menjadi metode yang praktis untuk menentukan sifat batuan dari fragmen batuan kecil atau mikroskopis (Handoyo, 2018).

2.4. Parameter Petrofisika Batuan

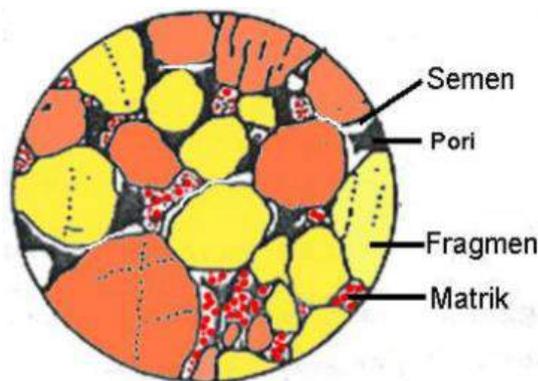
Parameter-parameter fisis batuan yang meliputi porositas, permeabilitas, densitas, dan saturasi air saling berkaitan. Parameter-parameter tersebut akan mempengaruhi nilai parameter gelombang seperti kecepatan, frekuensi, dan atenuasi. Parameter fisis batuan juga mempengaruhi sifat elastisitas batuan seperti modulus bulk, modulus shear, poisson rasio, dan modulus young.

2.4.1. Porositas

Porositas (ϕ) adalah perbandingan volume rongga-rongga pori terhadap total volume batuan. Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persen.

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{total}} = 1 - \frac{V_{matriks}}{V_{total}} \quad (2.1)$$

dengan $V_{matriks}$ adalah volume batuan bagian yang padat.



Gambar 2.3. Pori, Fragmen, Semen, dan Matriks Batuan (Pettijohn, 1975)

Rongga pada batuan yang dihasilkan melalui lapisan diantara butiran disebut pori-pori yang ditempati oleh suatu fluida. Porositas bernilai pecahan antara 0 sampai 1 atau dalam persentase antara 0% sampai 100%. Pada umumnya porositas batuan sedimen lebih kecil dari 50%.

Ukuran butir, distribusi butir, dan bentuk geometri butiran sangat menentukan besar porositas (Schon, 1998).

a. Ukuran butir

Semakin kecil ukuran butir maka porositas yang dihasilkan akan semakin besar (Tabel 2.1)

b. Distribusi dan pemilahan ukuran butir (*sorting*)

Dengan meningkatnya pemilahan ukuran butir (*sorting*), maka porositas akan meningkat pula. Pada sedimen yang pemilahannya buruk, ruang antar butiran dengan diameter besar akan diisi oleh butiran-butiran yang lebih kecil.

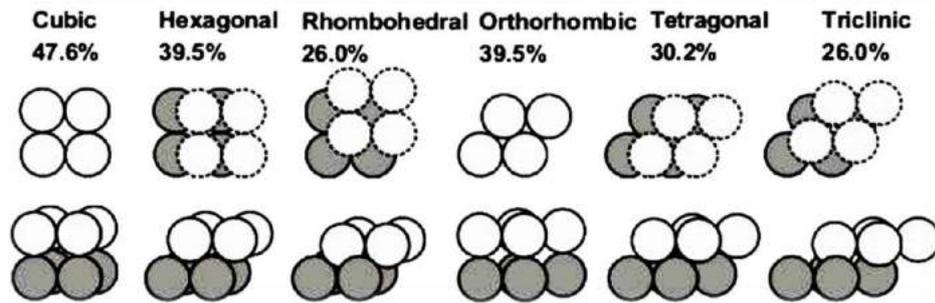
c. Bentuk geometri butiran

Porositas cenderung naik pada butiran berbentuk bola, sedangkan porositas akan mengecil pada butiran yang menyudut.

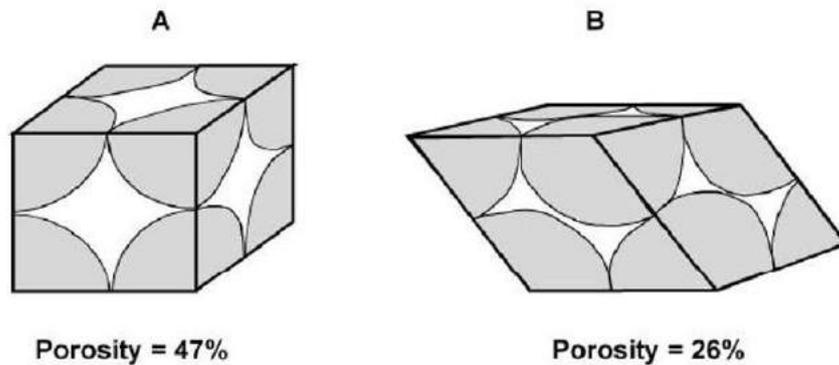
Tabel 2.1. Pengaruh Diameter Butiran Terhadap Porositas (Schon, 1998)

Jenis Sedimen	Diameter Butiran Rata- Rata (mm)	Densitas (gram/Cm ³)	Porositas (%)
Sand (coarse)	0,5285	2,034	38,6
Sand (fine)	0,1638	1,962	44,5
Sand (very fine)	0,0988	1,878	48,5
Silty Sand	0,0529	1,783	54,2
Sandy Silt	0,0340	1,769	54,7
Silt	0,0237	1,740	56,2
Sand-silt-clay	0,0177	1,575	66,3
Clavey Silt	0,0071	1,489	71,6
Silty Clay	0,0022	1,480	73,0

Nilai porositas juga dipengaruhi oleh kemas (*packing*) bulir partikelnya. Untuk bulir berbentuk bola yang terkemas di dalam kubus akan berbeda dengan yang terkemas dalam bentuk hexagonal. Perhitungan porositas dengan asumsi butiran matriks batuan berbentuk bola teratur di dalam kubus akan menghasilkan porositas terbesar. Perhitungan nilai porositas berdasarkan kemas ditunjukkan oleh gambar 2.4. dan gambar 2.5.



Gambar 2.4. Konfigurasi Susunan Butiran (Glover, 2000).
Asumsi Matriks Batuan berupa Bola Simetris.



Gambar 2.5. Perbandingan Porositas antara Kemas Berbentuk
(a) Kubus, dan (b) Hexagonal (Beard dan Weyl, 1973)

2.4.2. *Specific Surface Area*

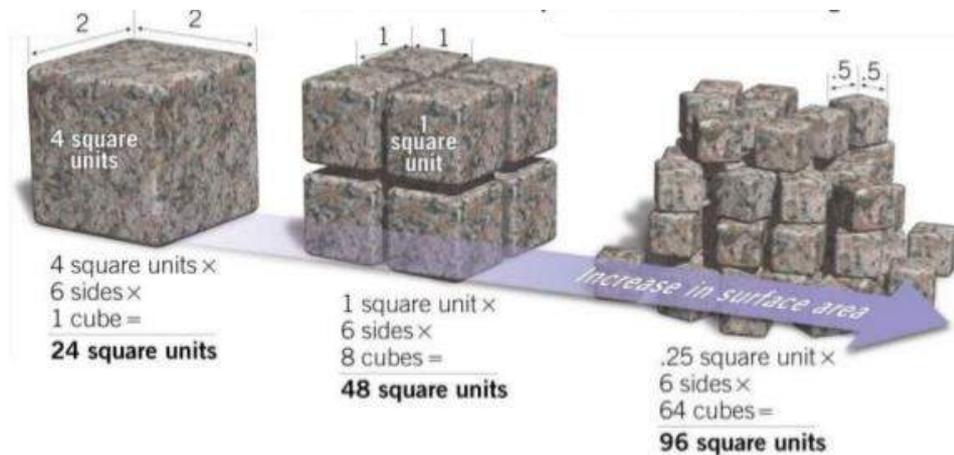
Luas permukaan merupakan luasan yang ditempati satu molekul adsorbat atau zat terlarut yang merupakan fungsi langsung dari luas permukaan sampel. Sedangkan luas permukaan spesifik (*specific surface area*) merupakan luas permukaan per gram sampel. Luas permukaan dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, dan susunan pori dalam partikel (Martin, dkk., 1993).

Specific surface area (S) merupakan perbandingan luas permukaan ruang-ruang pori yang berhubungan (S_{pore}) terhadap total volume batuan (V_{total}). Hubungan parameter-parameter tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$S = \frac{S_{pore}}{V_{total}} \quad (2.2)$$

Untuk batuan dengan butir speris dengan porositas ϕ dan jari-jari butiran R , *specific surface area* ditulis sebagai:

$$S = \frac{(1-\phi)}{R} \quad (2.3)$$



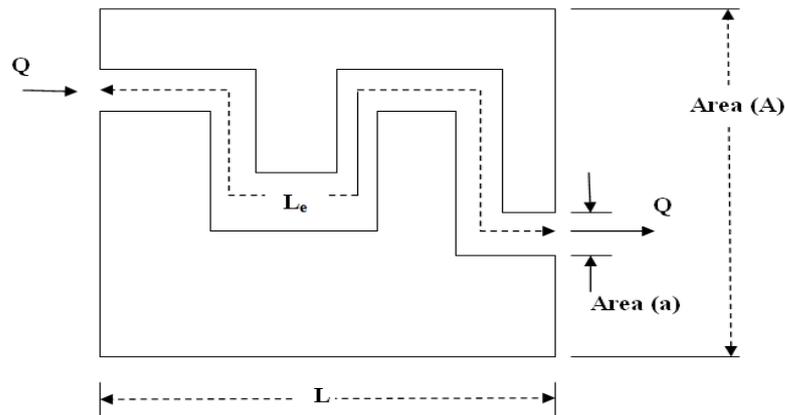
Gambar 2.6. Skema *Specific Surface Area* pada Batuan (Tarbuck dan Lutgens, 2015)

Bentuk, ukuran pori, struktur mikro, dan morfologi dari matriks dan pori akan sangat mempengaruhi *specific surface area*. Nilai *specific surface area* akan bertambah naik apabila terdapat keberadaan partikel dengan butir yang lebih halus seperti lempung atau karbonat pada permukaan pori yang menimbulkan adanya jenis struktur permukaan baru.

2.4.3. Tortuositas

Tortuositas (τ) didefinisikan sebagai kuadrat rasio antara panjang lintasan efektif pada media pori (L_e) terhadap panjang lintasan medium tempat aliran fluida (L), sehingga tortuositas dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2 \quad (2.4)$$



Gambar 2.7. Skema Media dalam Suatu Batuan (Putra, 2011)

Debit fluida Q yang mengalir melewati lintasan L_e di dalam pori batuan memiliki panjang lintasan lebih besar dari panjang sisi batuan L .

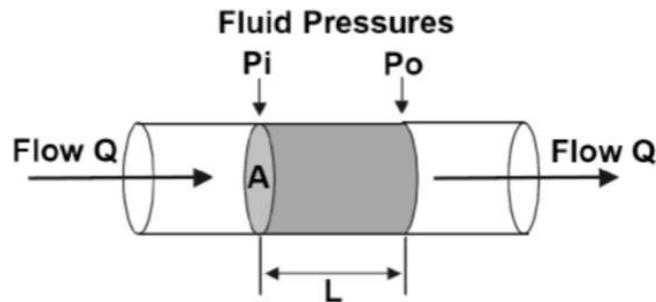
Tortuositas dan porositas memiliki hubungan yang bervariasi, dimana perubahan porositas akan mengubah nilai tortuositas. Hal ini disebabkan karena tortuositas dipandang memiliki arah yang berbeda dalam bentuk tiga dimensi. Berryman (1981) menurunkan persamaan yang menyatakan hubungan antara porositas dan tortuositas sebagai:

$$\tau = \frac{1+\phi^{-1}}{2} \quad (2.5)$$

2.4.4. Permeabilitas

Permeabilitas (k) adalah kemampuan medium berpori untuk meloloskan atau mengalirkan suatu fluida. Dalam penentuan permeabilitas batuan, berbagai jenis metode dapat digunakan pada berbagai media yang berbeda pula. Permeabilitas sangat penting untuk menentukan besarnya cadangan fluida yang dapat diproduksi. Pada umumnya, seiring bertambahnya tingkat porositas pada suatu batuan, maka akan diikuti dengan penambahan tingkat permeabilitas batuan tersebut. Namun, anggapan ini tidak selalu benar. Batuan yang memiliki porositas tinggi belum tentu memiliki permeabilitas

yang tinggi. Pori atau rongga antar butir harus saling berhubungan agar batuan memiliki nilai permeabilitas yang tinggi.



Gambar 2.8. Model Aliran Fluida dalam Suatu Pipa

Darcy merumuskan hubungan dasar untuk suatu aliran laminar fluida viskos yang melalui batuan berpori sebagai:

$$Q = \frac{k A (P_i - P_o)}{\mu L} \quad (2.6)$$

dimana:

- Q = debit aliran fluida (m^3/s)
- k = permeabilitas (Darcy)
- A = luas permukaan (m^2)
- P_o = tekanan dari luar fluida (Pa)
- P_i = tekanan di dalam pipa (Pa)
- μ = viskositas fluida (Pa.s)
- L = tinggi pipa (m)

Dalam industri dan keperluan teknis, permeabilitas sering dinyatakan dalam Darcy (D) atau miliDarcy (mD). Untuk reservoir migas, nilai permeabilitas yang baik adalah sekitar $k \geq 100$ mD (Gueguen dan Palciauskas, 1994).

Kozeny-Carman memberikan hubungan antara porositas, permeabilitas, *specific surface area*, dan tortuositas (Dvorkin, 2009) sebagai:

$$k_{absolute} = \frac{1}{2} \frac{\phi^3}{S^2 \tau^2} \quad (2.7)$$

atau dapat juga dihitung dengan:

$$k_{absolute} = b^2 \frac{\phi}{8\tau^2} \quad (2.8)$$

dimana:

k = permeabilitas

ϕ = porositas

S = *specific surface area*

τ = tortuositas

b = radius

Faktor-faktor yang mempengaruhi permeabilitas antara lain:

1. Distribusi ukuran butir: jika ukuran butir batuan semakin beragam, maka pori-pori batuan akan semakin kecil sehingga permeabilitas batuan juga akan semakin kecil
2. Susunan butiran: jika susunan butirannya semakin rapi, maka semakin besar pula nilai permeabilitasnya
3. Geometri butiran: semakin menyudut geometri butiran, maka permeabilitasnya akan semakin kecil
4. Hubungan antar pori: semakin bagus hubungan antar pori pada batuan, maka permeabilitasnya akan semakin besar
5. Sementasi: semakin banyak kandungan semen dalam suatu batuan, maka nilai permeabilitas akan semakin kecil
6. Kandungan lempung: semakin banyak kandungan lempung pada suatu batuan, maka semakin kecil nilai permeabilitas batuan tersebut

2.4.5. Densitas

Densitas merupakan perbandingan massa terhadap volume batuan dalam satuan gr/cc atau kg/m³. Hubungan antara densitas dan kecepatan dipengaruhi oleh jumlah mineral dan presentasinya, seperti bentuk butir (matriks batuan), porositas batuan, dan tipe fluida pengisi pori batuan. Densitas (ρ) didefinisikan sebagai perbandingan antara massa (m) terhadap volume (V) suatu batuan.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.9)$$

Untuk densitas batuan berpori, maka sebagian volumenya adalah volume pori yang dinyatakan dalam nilai porositas. Sehingga densitas bulk merupakan jumlah dari densitas matriks padat (ρ_m) dan densitas pori (ρ_{pore}) yang dituliskan dengan:

$$\rho = (1 - \phi) \rho_m + \phi \rho_{pore} \quad (2.10)$$

dimana:

ϕ = porositas

ρ_m = densitas matriks batuan

ρ_{pore} = densitas pori

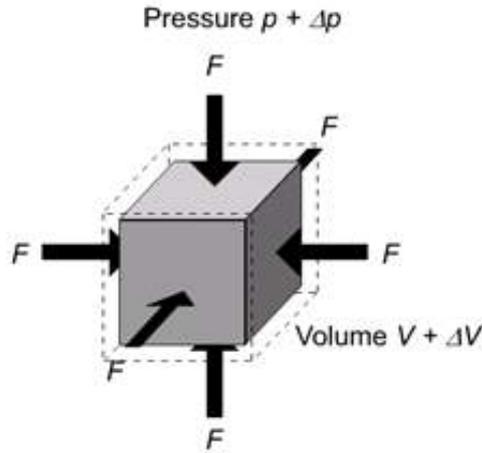
2.5. Sifat Elastisitas Batuan

Proses perambatan gelombang yang terjadi di dalam lapisan batuan dikontrol oleh sifat elastisitas batuan. Sifat elastisitas batuan menjelaskan bahwa suatu batuan mengalami deformasi atau perubahan bentuk yang disebabkan karena adanya gaya yang bekerja pada batuan tersebut. Setiap batuan mempunyai sifat keelastisitasan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, batuan lunak akan menghasilkan *strain* yang berbeda jika dibandingkan batuan lain yang lebih keras. Teori elastisitas berhubungan dengan deformasi yang disebabkan oleh tekanan yang dikenakan pada batuan tertentu. *Stress* (σ) adalah gaya per satuan luas atau gaya yang mengenai suatu batuan, sedangkan *strain* (ϵ) adalah perubahan dalam ukuran, bentuk, atau volume suatu batuan sebagai reaksi terhadap *stress*. Jika *stress* diterapkan pada batuan, maka batuan tersebut akan terdeformasi yang menyebabkan terjadinya *strain*. Konstanta elastis menggambarkan ketahanan material batuan sebagai respon terhadap penjarangan gelombang yang diwakilkan oleh modulus bulk dan modulus shear.

2.5.1. Modulus Bulk

Modulus bulk adalah modulus elastisitas yang mengukur ketahanan suatu material terhadap *stress* volumetrik. Modulus bulk menjelaskan tentang elastisitas volumetrik, atau kecenderungan suatu benda untuk berubah bentuk ke segala arah ketika diberi tegangan seragam ke segala arah. Modulus bulk

mengukur ketahanan benda padat atau cairan terhadap perubahan volumenya. Modulus bulk didefinisikan sebagai tegangan volumetrik terhadap regangan volumetrik, dan merupakan kebalikan dari kompresibilitas.



Gambar 2.9. Gaya Kompresional pada Batuan (Mavko et al., 2009)

Modulus bulk dapat dinyatakan dengan:

$$K = \frac{F/A}{\Delta V/V_0} \quad (2.11)$$

dimana:

K = modulus bulk (GPa)

F = gaya kompresional (N)

A = luas area (m^2)

V_0 = volume awal (m^3)

ΔV = selisih perubahan volume (m^3)

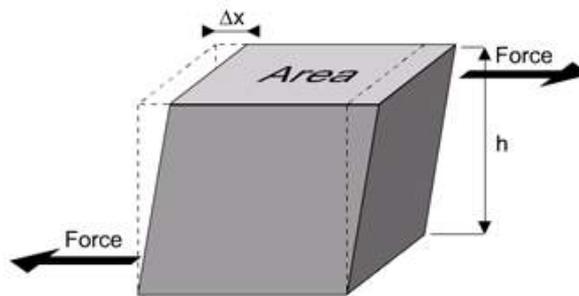
Modulus bulk dapat dihitung menggunakan konstanta Lamé yaitu λ dan μ . Konstanta Lamé adalah modulus elastik batuan yang menggambarkan sifat inkompresibilitas suatu batuan, yang dapat ditulis sebagai:

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (2.12)$$

dengan $\mu \geq 0$.

2.5.2. Modulus Shear

Modulus shear menjelaskan tentang kecenderungan sebuah objek untuk bergeser (deformasi bentuk pada volume konstan) ketika diberi kekuatan yang berlawanan. Modulus shear disebut juga sebagai modulus rigiditas atau modulus kekakuan. Modulus shear didefinisikan sebagai rasio tegangan geser terhadap regangan geser. Modulus shear mengukur resistansi terhadap gerakan bidang paralel yang kuat terhadap satu sama lain. Pada gambar 2.10, terlihat saat *shear* mengenai permukaan *body* batuan, maka akan menghasilkan *stress* yang kemudian pada akhirnya akan dihasilkan suatu *strain* berupa perubahan pada panjang permukaan yang bergeser.



Gambar 2.10. Gaya *Shear* pada Batuan (Mavko et al., 2009)

Modulus geser dapat dinyatakan dengan:

$$\mu = \frac{F/A}{\Delta x/h} \quad (2.13)$$

dimana:

μ = modulus shear (GPa)

F = gaya geser (N)

A = luas area (m²)

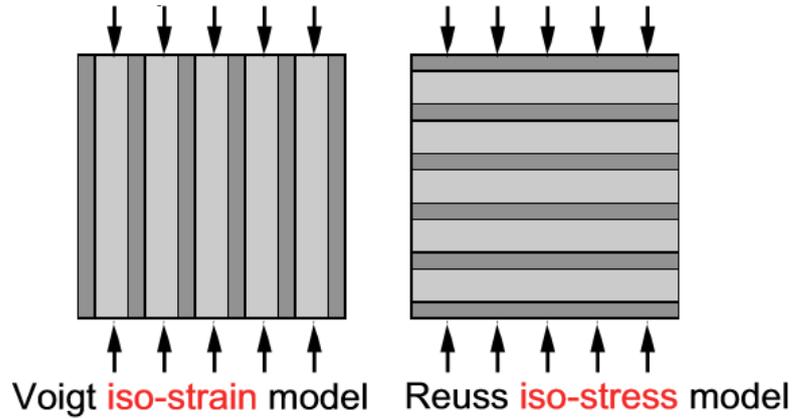
Δx = panjang *body* batuan tegak lurus F (m)

h = perubahan panjang *body* batuan yang sejajar dengan F (m)

2.6. *Effective Medium Theory*

Untuk penerapan batuan, asumsi model didasarkan pada pemisahan komponen batuan individual (seperti mineral, bahan pengisi pori) dan susunannya (seperti urutan lembaran). Gambar 2.11 merupakan suatu keadaan homogenitas

makroskopis yang diasumsikan dengan model *strain* homogen (Voigt) atau *stress* homogen (Reuss).



Gambar 2.11. Voigt (*Upper Bound*) dan Reuss (*Lower Bound*)
(Mavko et al., 2009)

Untuk menentukan batas bawah dan batas atas modulus elastisitas batuan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan Voigt, Reuss, dan Hill. Pemodelan Voigt (*upper bound*) dan Reuss (*lower bound*) merupakan pemodelan teoritis yang sangat sederhana untuk mendapatkan modulus elastik dan fraksi mineral batuan yang paling mendekati *properties* batuan sebenarnya dengan menggunakan data *petrophysics* yang ada.

Voigt (batas atas) untuk modulus elastisitas efektif dituliskan dengan persamaan:

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

dan Reuss (batas bawah) dinyatakan oleh:

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

dimana:

M_v = modulus elastik voigt mineral batuan

M_R = modulus elastik reuss mineral batuan

f_i = fraksi modulus elastik mineral batuan

M_i = modulus elastik mineral batuan

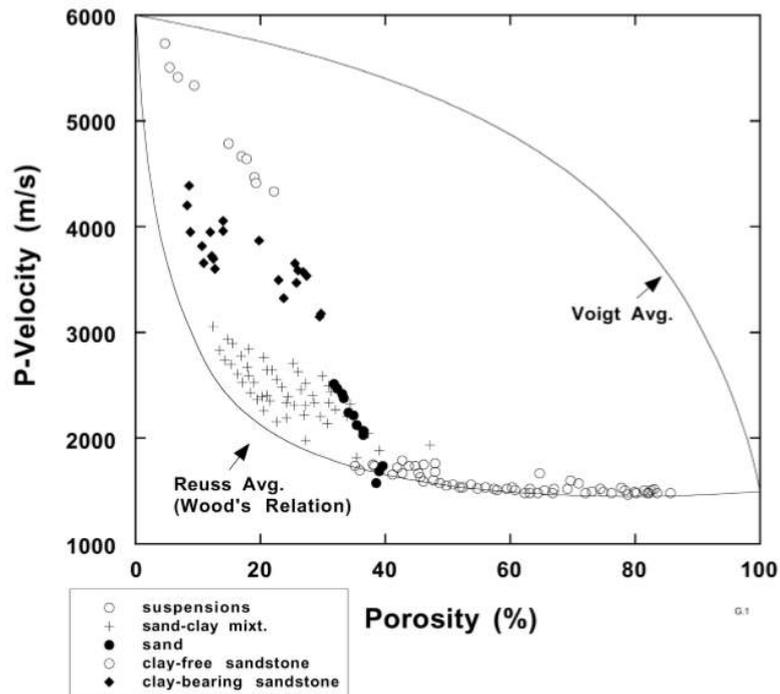
Jika bahan efektif isotropik, modulus bulk dan modulus shear diberikan oleh batas bentuk persamaan dengan nilai yang sesuai, maka hubungan Voigt membawa pada bagian batas atas (maksimum) dan hubungan Reuss pada batas bawah (minimum) seperti pada gambar 2.12. Nilai *real* (terukur) ditempatkan antara kedua batas tersebut. Untuk membatasi kisaran nilai terprediksi tersebut, dua metode yang dapat dipakai:

- Perhitungan nilai rata-rata (yaitu nilai rata-rata Hill)
- Aplikasi batasan lebih lanjut atau prinsip variasi (batas Hashin)

Hill (1952) membuat persamaan empiris yang dikenal sebagai *Voigt-Reuss-Hill Average* untuk menyederhanakan perhitungan yang dinyatakan dengan:

$$M_{VRH} = \frac{M_v + M_R}{2} \quad (2.16)$$

Pada gambar 2.12, terlihat bahwa hubungan kecepatan dengan porositas dalam batuan dapat dibandingkan dengan batas Voigt dan Reuss. Hampir semua titik jatuh di antara batas Voigt dan Reuss. Suspensi yang merupakan bahan *iso-stress* (titik dengan porositas > 40%) jatuh sangat dekat dengan batas Reuss (Han et al., 1986). Nur (1991) menerapkan konsep Voigt dan Reuss pada pasir berpori dan memodifikasi porositas dengan memasukkan *critical porosity* dan kesesuaian pada data percobaan, dimana *critical porosity* berkaitan dengan porositas awal sedimen.



Gambar 2.12. Hubungan Porositas dan Kecepatan Gelombang P berdasarkan Voigt dan Reuss (Han et al., 1986)

Untuk melakukan pemodelan *dry rock*, pada penelitian ini menggunakan pendekatan yang dilakukan oleh Pride (Lee, 2005). Pada pendekatan pride, faktor konsolidasi (α) digunakan sebagai salah satu parameter yang menggambarkan derajat kompaksi atau konsolidasi suatu batuan. Pada umumnya, batuan yang lebih terkonsolidasi memiliki nilai α lebih rendah dibandingkan dengan batuan yang kurang terkonsolidasi. Jadi, semakin kecil nilai α maka batuan semakin terkompaksi. Faktor ini tentu akan mempengaruhi kualitas dari suatu batuan. Properti fisis batuan lainnya yang mempengaruhi kualitas batuan adalah permeabilitas dan porositas. Pendekatan Pride dapat ditulis dengan:

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

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

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

dengan

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

dimana:

K_{dry} = modulus bulk kerangka kering batuan (*dry rock*)

K_{min} = modulus bulk mineral

μ_{dry} = modulus shear kerangka kering batuan (*dry rock*)

μ_{sat} = modulus shear batuan tersaturasi

\emptyset = porositas

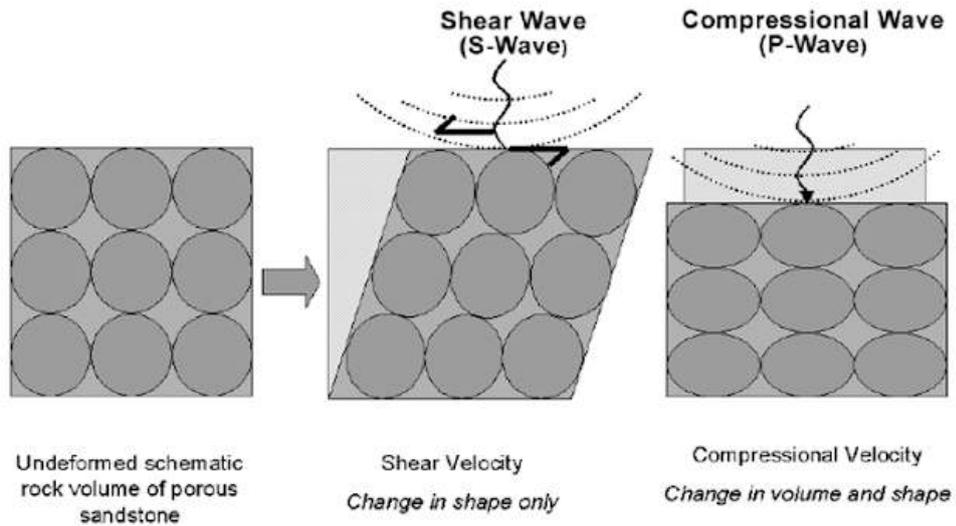
α = faktor konsolidasi

2.7. Kecepatan Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat melalui bumi. Perambatan gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas batuan. Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena medium yang dilalui yaitu bumi yang bersifat elastik. Oleh karena itu, sifat penjarangan gelombang seismik bergantung pada elastisitas batuan yang dilewatinya.

Gelombang seismik berdasarkan tipe penjarannya dibagi menjadi dua, yaitu gelombang P (*pressure wave*) dan gelombang S (*shear wave*). Gelombang P atau disebut juga gelombang longitudinal merupakan gelombang yang mempunyai arah gerakan partikel yang searah dengan arah penjarangan gelombang. Sedangkan gelombang S atau gelombang transversal merupakan gelombang yang arah gerak partikelnya tegak lurus terhadap arah penjarangan gelombang. Gelombang S disebut juga gelombang sekunder yang memiliki kecepatan lebih rendah dari gelombang P.

Kecepatan gelombang seismik berkaitan dengan deformasi batuan dalam fungsi waktu. Pada gambar 2.13. dapat dilihat bahwa terjadi deformasi pada batuan akibat gelombang P dan gelombang S, dimana hanya terjadi perubahan bentuk, namun tidak terjadi perubahan pada volumenya.



Gambar 2.13. Deformasi Batuan Akibat Gelombang P dan S
(Goodway, 2001)

Kecepatan gelombang P dapat dinyatakan:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.21)$$

Sedangkan gelombang S dinyatakan:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.22)$$

dimana:

V_p = kecepatan gelombang P (km/s)

V_s = kecepatan gelombang S (km/s)

K = modulus bulk (GPa)

μ = modulus shear (GPa)

ρ = densitas (kg/m^3)

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

$$V_p = (1 - \phi)^2 V_m + \phi V_f \quad (2.23)$$

$$V_s = (1 - \phi)^2 V_m \sqrt{\frac{(1-\phi) \rho_m}{(1-\phi)\rho_m + \phi \rho_f}} \quad (2.24)$$

dengan V_p adalah kecepatan gelombang P dalam batuan sedimen berpori, V_s adalah kecepatan gelombang S, V_m adalah kecepatan gelombang dalam matriks batuan, dan V_f adalah kecepatan gelombang di dalam fluida pori.