

Konversi Konstanta Elastik Dinamik ke Statik pada Porositas Hidrokarbon Batupasir (*Sandstone*)

Mochammad Ahied

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Trunojoyo Madura

Jalan Raya Telang PO. BOX 2 Kamal, Bangkalan, Madura

E-mail: moch.ahied@trunojoyo.ac.id

Abstrak

Pengukuran dinamik untuk mendapatkan konstanta elastik dihubungkan dengan besaran petrofisika utamanya porositas sangat penting untuk penerapan penyebaran adanya reservoir. Sedangkan pengukuran statik biasanya dilakukan juga di dunia minyak bumi dan gas (migas) untuk mendapatkan parameter mekanika batuan seperti, modulus young (E), modulus ongkok (K) dan nisbah poisson (ν), sehingga perlu dilakukan hubungan keduanya. Berdasarkan pengukuran dinamik dan statik dibuat model hubungan konstanta elastik seperti, modulus young (E), modulus ongkok (K), dan nisbah poisson (ν) dengan porositas terhadap batupasir yang tersaturasi air secara penuh ($S_w = 100\%$). Sehingga dengan diketahuinya satu konstanta elastik dari pengukuran dinamik saja, maka dapat ditentukan pula semua konstanta elastik pada pengukuran statik tanpa mengukurnya.

Kata kunci: Mekanika batuan, saturasi, porositas, modulus young, nisbah poisson, dan modulus ongkok.

Abstract

Dynamic measurements to obtain the elastic constants associated with values of petrophysics especially porosity and water saturation is very important for applying the spread of the reservoir. While static measurements are usually done well in world oil and gas to get the parameter rock mechanics such as, young modulus (E), modulus bulk (K) and poisson ratio (ν), so we need both relationship. Based on dynamic and static measurements are made of constants elastic the relationship model such as, young modulus (E), modulus bulk (K) and poisson ratio (ν) the porosity of sandstone which are fully saturated by water ($S_w = 100\%$). So that, it new one the measurements of dynamic elastic constants only, it can be determined also all on the measurements of static elastic constants without measuring it.

Keywords: rock mechanics, saturated, porosity, modulus young, poisson ratio, and modulus bulk.

Pendahuluan

Dalam dua dekade terakhir, banyak usaha dilakukan untuk meningkatkan penggunaan data seismik untuk estimasi minyak bumi dan gas (migas). Secara umum para ahli mengukur dan menghasilkan waktu penjalaran gelombang seismik (*travel time*) dan impedansi akustik yang kemudian dapat mencerminkan litologi batuan [1]. Perkembangan selanjutnya memperlihatkan usaha dikembangkannya cara untuk mengekstraksi data seismik lebih jauh guna mendapatkan parameter-parameter petrofisika dari reservoir migas yang dalam hal ini disebut petrofisika seismik [□]. Besaran petrofisika yang dimaksud di sini adalah porositas dan saturasi fluida reservoir dengan menggunakan model hubungan antara besaran elastik nisbah poisson dan impedansi akustik [2].

Jenis data lain yang semakin dirasakan pentingnya dalam dunia perminyakan dan gas adalah data mekanika batuan. Khususnya aplikasi dalam perekahan hidraulik (*hydraulic fracturing*) dan aplikasi dalam operasi pemboran [3]. Perekahan hidraulik (*hydraulic fracturing*) gunanya untuk merekahkan atau meluaskan rekahan pada batuan reservoir sehingga menambah laju minyak di sumur. Aplikasi dalam operasi pemboran membantu dalam pemilihan bit yang tepat.

Parameter mekanik batuan yang diperlukan tersebut seperti kuat tekan (τ_c), nisbah Poisson (ν), modulus young (E), di samping parameter sifat mekanik yang lain umumnya diperoleh dari uji kompresi triaksial atas batuan perconton atau pengukuran statik. Modulus young (E) adalah parameter mekanik yang kerap dipakai dalam aplikasi perekahan hidraulik (*hydraulic fracturing*) sedangkan nisbah Poisson (ν) sering

digunakan untuk mengestimasi gradien tekanan rekah (Fr). Namun pengukuran statik tersebut tidak banyak dilakukan karena hanya mengkonsentrasikan pada deformasi, kekuatan batuan (*strength*), dan keruntuhan batuan utuh (*failure of intact rock*) [7] dan oleh karena itu maka data statik tersebut, pada umumnya, masih kurang tersedia di lapangan. Data-data elastik diperoleh berdasarkan kelakuan kurva tegangan (*stress*) – regangan (*strain*) dari batuan.

Alternatif lain adalah dengan melakukan pengujian dinamis yaitu melalui uji akustik baik di laboratorium, survei seismik, maupun log akustik, secara umum dapat diperoleh secara luas. Permasalahannya adalah survei dinamik sering dianggap tidak representatif dan tidak menunjukkan perilaku elastik batuan yang sesungguhnya. Untuk ini survei statik tetap dianggap terbaik. Dengan bertolak dari kenyataan di atas maka perlu untuk mencari hubungan statik-dinamik.

Tujuan dari makalah ini adalah membuat pemodelan porositas dan konstanta elastik yang didapat dari pengukuran akustik di laboratorium (dinamik) dan parameter mekanik (statik) dari uji triaksial untuk batupasir. Dengan menggunakan hubungan tersebut, diharapkan akan mempermudah para praktisi lapangan migas untuk memperoleh data mekanika batuan statik dari data mekanika batuan dinamik yang secara umum lebih mudah diperoleh dan lebih murah.

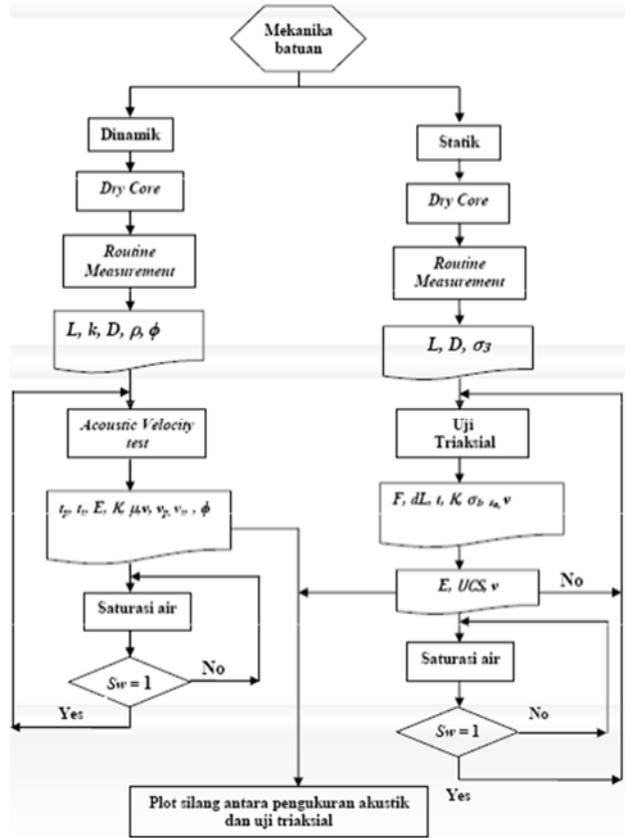
Metodologi Penelitian

Metodologi penulisan makalah ini terdiri dari tahap-tahap untuk mempelajari tentang mekanika batuan, yang terdiri dari pengukuran dinamik (*acoustic test*) dan statik (uji kompresi triaksial) serta memahami keterkaitan dari penjalaran gelombang dilatasi t_p dan t_s dari pengukuran dinamik (*acoustic test*) terhadap konstanta elastisitas dan hubungannya dengan statik (uji kompresi triaksial). Adapun bagan alir dari metode penulisan makalah dapat dilihat pada gambar 1.

Untuk mendapatkan pemahaman tentang keterkaitan data pengukuran dinamik dan statik dari batupasir (*sandstone*), maka ditempuh langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pembuatan plot silang antara lain, E_d (dari pengukuran dinamik) vs porositas (j) yang tersaturasi air secara penuh ($S_w = 100\%$), E_s (dari pengukuran dinamik) vs porositas (j) yang tersaturasi air secara penuh ($S_w = 100\%$), juga modulus ongkok (K) vs porositas (j).
2. Pemodelan antara data dinamik dan statik untuk semua konstanta elastik dengan porositas.

(Misalnya plot silang antara porositas vs $E_{dinamik}$ dan E_{statik} , porositas vs $K_{dinamik}$ dan K_{statik} , Poisson vs $E_{dinamik}$ dan E_{statik} .



Gambar 1. Bagan alir penelitian

Hubungan antara konstanta-konstanta elastik

Perbandingan properti batuan dari laboratorium dinamik (kecepatan gelombang akustik) dan pengukuran statik telah banyak dilakukan karena antara keduanya selalu terdapat perbedaan yang cukup berarti. Beberapa peneliti menyatakan bahwa parameter elastik batuan yang diturunkan dari pengukuran dinamik selalu lebih besar daripada pengukuran statik [5]. King dalam Cheng dan Johnston [6] merekomendasikan modulus ongkok dinamik selalu lebih besar daripada statik mulai dari *confining pressure* 6000 Psia. Penelitian tersebut hanya dijelaskan tentang perbandingan pengukuran statik dan dinamik modulus ongkok yang didapatkan pada deformasi maksimum dari berbagai jenis material. Tidak ditemukan hubungan secara teoretis antara pengukuran statik dan dinamik. Sedangkan dalam makalah ini terdapat hubungan keduanya sehingga akan mempermudah nantinya praktisi lapangan untuk mengkonversi antara keduanya.

Perhitungan dan Analisis

1. Perhitungan kecepatan gelombang

Berdasarkan pengukuran akustik didapat t , dari gelombang akustik yang merambat sepanjang batuan, sehingga diperoleh kecepatan rambat (v):

$$v = L/t \dots\dots\dots (1)$$

L : panjang sampel batuan (meter)
 t : t_p untuk waktu rambat gelombang primer dan t_s untuk waktu rambat gelombang sekunder (detik)

Namun dalam penghitungannya sendiri terdapat banyak koreksi berkenaan dengan presisinya alat, sehingga penghitungan t sendiri sebagai berikut.

$$t = T + t_d - t_{instrumen}$$

$T + t_d = time\ arrival$, yaitu time pada waktu mendekati gelombang dengan saat gelombang itu diterimanya.

T adalah waktu yang dibaca dari CRT (*Cathode Ray Tube*), sehingga:

$$T = t_{oscilloscop} \cdot time/divide, \text{ dalam } \mu s$$

$$T_d = t_{delay} - 0,5, \text{ dalam } \mu s$$

Sedangkan $t_{instrumen}$ adalah 2,8 μs untuk waktu rambat gelombang primer dan 3,4 μs untuk waktu rambat gelombang sekunder.

Perhitungan Pengukuran Statik

Berdasarkan pengukuran statik, dapat dihitung konstanta elastik seperti, modulus young (E), modulus ongkok (K), dan nisbah poisson (ν). Perhitungan modulus young sesuai dengan rumus:

$$E = \frac{S_{xx}}{e_{xx}} \dots\dots\dots (2)$$

σ_{xx} : perubahan tegangan aksial saat elastis, pada tekanan overburden 1000 Psia

ϵ_{xx} : regangan, μs

Hasil perhitungan K (modulus ongkok) untuk batuan berpori tersaturasi air penuh, dapat dituliskan sebagai berikut [7]:

$$K = K_d + \frac{K_f \left[1 - \frac{K_d}{K_f} \right]^2}{\left[1 - \frac{K_f}{K_m} \right] \phi + (K_m - K_d) \frac{K_f}{K_m^2}} \dots\dots\dots (3)$$

K_d : modulus ongkok batuan berpori dalam keadaan kering

$$K_f = \frac{1}{C_w S_w + C_{hc} S_{hc}} = \frac{1}{C_w S_w + C_{hc} (1 - S_w)} \dots\dots\dots (4)$$

S_w : saturasi air

S_{hc} : saturasi hidrokarbon

C_w : kompresi air

C_{hc} : kompresi hidrokarbon

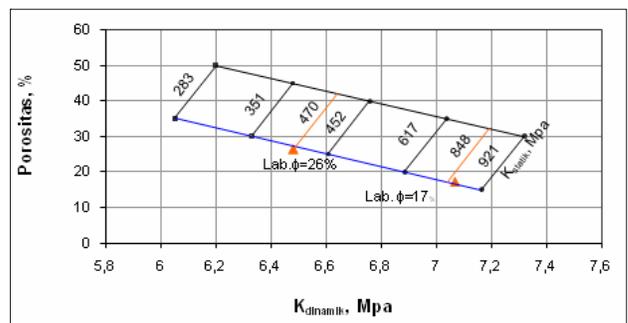
Sedangkan, Nisbah Poisson (ν) adalah perbandingan antara regangan lateral (ϵ_l) dengan delta regangan vertikal (ϵ_v) yang diukur pada suatu delta tegangan vertikal saat terjadi tahapan elastis pada batuan. Dapat dituliskan, sebagai berikut:

$$\text{Nisbah Poisson } (\nu) = \frac{\epsilon_l}{\epsilon_v} / \frac{\epsilon_l}{\epsilon_v} \dots\dots\dots (5)$$

Hubungan porositas dengan konstanta elastik dinamik dan statik.

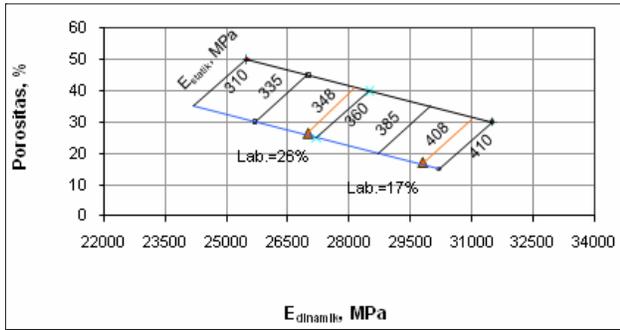
Sesuai tujuan penulisan makalah ini untuk mendapatkan model dengan hanya didapat satu pengukuran dinamik maka didapat semua konstanta elastik statik, dengan adanya koreksi, model terlihat bagus.

Gambar 2. Pada porositas tertentu dengan ditarik garis horisontal dari porositas dan ditarik vertikal ke bawah didapat $E_{dinamik}$ dan ditarik ke atas didapat E_{statik} batupasir tersaturasi air secara penuh ($S_w = 100\%$) dengan $P_{overburden} = 1000$ Psia dengan validitasnya terhadap pengukuran laboratorium.

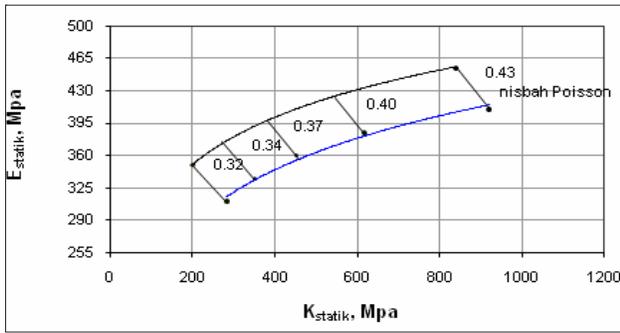


Gambar 2. Hubungan modulus young dinamik, statik dengan porositas batupasir $S_w = 100\%$ pada $P_{overburden} = 1000$ psia

Hubungan porositas dengan K_{statik} dan $K_{dinamik}$ Gambar 3. dengan validasi $\Phi = 26\%$ dan $\Phi = 17\%$ dari laboratorium.

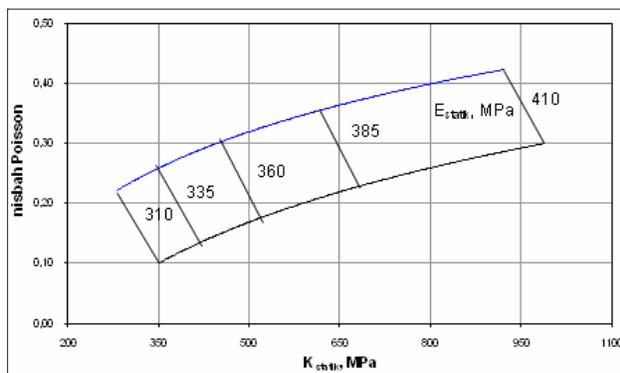


Gambar 3. Hubungan modulus ongkok dinamik, statik porositas batupasir $S_w = 100\%$ pada $P_{overburden} = 1000$ psia



Gambar 4. Hubungan modulus young statik, modulus ongkok statik dengan porositas batupasir $S_w = 100\%$ pada $P_{overburden} = 1000$ psia

Dengan adanya konstanta elastik modulus ongkok (K) dan modulus young (E), maka didapat nisbah poisson Gambar 4. didapat hubungan E_{statik} dengan K_{statik} dan poisson, Gambar 5. didapat E_{statik}, K_{statik} dengan porositas terlihat bahwa semakin besar K_{statik} terdapat jarak yang semakin besar ke Poisson dan E_{statik} .



Gambar 5. Hubungan modulus Young statik, mod. ongkok statik dengan porositas batupasir $S_w = 100\%$ pada $P_{overburden} = 1000$ psia

Perbedaan pengukuran dinamik dan statik

Tidak dapat dipungkiri bahwa secara laboratorium hasil dari pengukuran dinamik dan statik pada batupasir terdapat perbedaan. Adapun faktor-faktor yang membedakan dipengaruhi antara lain:

1. Prosedur eksperimen

Awalnya prosedur eksperimen antara statik dan dinamik sangat kontras untuk perbandingan modulus elastik dinamik dengan secant dan statik dengan tangen. Ternyata dari waktu ke waktu ditemukan bahwa koreksi untuk panjang pada per contoh batuan lebih dapat dipertanggungjawabkan. Dalam makalah ini ternyata pengukuran statik masih bisa dilakukan sampai 1000 psia sedangkan pada dinamik sampai 5000 psia. Dan koreksi panjang batuan memang masih belum diperhatikan benar, karena pengukuran dinamik telah dilakukan sedangkan pengukuran statik dalam tahap belajar *but this is not to say that there will not be experimental error.*

2. Penjalaran gelombang

Persepsi akurasi eksperimen pengukuran statik dan dinamik adalah fundamental pada hubungan *stress - strain* dari batuan, pada kenyataannya tidak hanya perbedaan amplitudo strain, dispersi, dan atenuasi tapi disebabkan kecepatan batuan dalam keadaan kering tidak terpengaruh frekuensi dan frekuensi yang dipakai dalam saturasi meminimalkan efek hamburan pada frekuensi tinggi.

Pengukuran dinamik (pengukuran akustik) dalam penelitian ini dipakai frekuensi 400 kHz untuk gelombang kompresi dan 150 kHz untuk gelombang shear. Gelombang akustik frekuensi tinggi (ultrasonik) cenderung mengalami atenuasi oleh faktor-faktor non geometrik seperti osilasi fasa fluida dan padatan yang tidak sempurna, Johnston dkk [9] sehingga akan memperlambat V_p .

Waktu selama putaran gelombang pada frekuensi rendah tercukupi untuk aliran terjadi, sehingga tekanan fluida akan seimbang dan batuan akan relaks. Sedangkan, pada frekuensi tinggi waktu tidak tercukupi untuk aliran terjadi sehingga batuan tidak relaks di tempatnya. Ini menyebabkan batuan akan lebih kaku pada frekuensi tinggi dan kecepatan gelombang akan lebih tinggi.

Pengaruh pori dan struktur *microcrack*.

Konfigurasi pori dan struktur *microcracks* berdampak pada nilai statik dan banyak juga dalam pengukuran

dinamik. Ide, 1936 menyatakan kecepatan gelombang dari penjalaran akustik kurang dipengaruhi oleh *mikrocracks* di contoh batuan. *Strain* disebabkan statik *stress*, karena dianggap energi akustik melewati banyak *cracks*, biasanya paralel dengan arah penjalaran [5]. Sedangkan menurut Walls, 1965 pada pengukuran statik berhubungan dengan menutupnya *cracks*. Karenanya pengaruh *mikrocracks* dan pori menghasilkan perbedaan antara $E_{dinamik}$ dan E_{statik} [3].

Pengaruh *confining pressure*

Pada tekanan rendah sampai tidak adanya *confining pressure*, gelombang akustik dipengaruhi struktur *cracks* dan porositas. Semakin besar kecepatan akan melewati rekahan dan kecepatan tidak cukup kuat berpengaruh. Pada tekanan rendah sampai tidak adanya *confining pressure*, pembebanan statik (*loading static*) menjadikan menutupnya *cracks* sehingga akan mengecilkan kekakuan dan modulus dinamik akan meningkat.

Pengaruh saturasi

Jika *cracks* diisi fluida sekecil apapun akan memengaruhi modulus. Dalam pengukuran dinamik kecepatan akan semakin besar seperti dibahas sebelumnya sedangkan dalam pengukuran statik tidak begitu berpengaruh tergantung apakah medium dapat mengalir atau tidak. Pengukuran statik tergantung difusi dan pembebanan (*loading*).

Simpulan

Berdasarkan uraian di atas dapat diambil kesimpulan, sebagai berikut:

1. Dengan dibuatnya pemodelan maka dengan hanya satu data dinamik ($E_{dinamik}$) dapat ditentukan data statik seperti E_{statik} , K_{statik} , dan nisbah Poisson pada batupasir tersaturasi air secara penuh ($S_w = 100\%$).
2. Modulus young (E) dinamik lebih besar daripada modulus Young (E) statik sama seperti penelitian

terdahulu, sedangkan modulus ongkok (K) dinamik lebih kecil daripada modulus ongkok (K) statik sedangkan pada penelitian terdahulu dahulu lebih besar.

3. Kecepatan gelombang dari penjalaran akustik kurang dipengaruhi *mikrocracks*, energi akustik lewat begitu saja meskipun banyak *mikrocracks*. Sedangkan, pada statik berpengaruh pada saat menutupnya *mikrocracks* akan mengecilkan modulus young.
4. Untuk penelitian lebih lanjut mungkin perlu dicoba dengan meningkatkan tekanan overburden di atas 1000 psia dan diperbaiki kekurangan-kekurangan selama penelitian ini misalnya kesalahan prosedur seperti ketelitian sehingga tidak mengurangi sampel.
5. Memperbanyak sampel terutama yang dalam keadaan kering sehingga bisa dipasang *strain gauge* untuk mendapat nilai nisbah Poisson.

Daftar Pustaka

- [1] Munadi, S., (2000), "*Aspek Fisis Seismologi Eksplorasi*", Program studi Geofisika, FMIPA-UI.
- [2] Saptono, F., (2001), "*Pemodelan Sifat Elastik dan Petrofisis Batuan untuk Penentuan Porositas dan Saturasi Fluida dengan Bantuan Data Seismik*", Tesis Program Pascasarjana. Bidang Sains dan Matematika, Universitas Indonesia.
- [3] Hartawan, D., (2001), "*Pengolahan Data Uji Kekuatan Batuan dan Desain Alat Uji Triaksial*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Perminyakan ITB.
- [4] Hudson, J dan Harrison, J, (1997), "*Engineering Rock Mechanics*", Pergamon Press.
- [5] Gregory, A.R., (1981), "Rock Physicks in Seismik Interpretation", *Jurnal Geophysical*, pp. 30–32.
- [6] Cheng, C.H. dan Johnston, D.H., (1981), "*Dynamic and Static Moduli*", Geophysical.
- [7] Schön, J.P., (1999), "Physical properties of Rocks Fundamental and Principles of Petrophysics", *Handbook of geophysical exploration*, vol. 18.