



## Pengukuran Parameter Seismik dan Difraksi Sinar-X (XRD) pada Batuan Karbonat Formasi Parigi

John Adler<sup>1,2</sup> & Bagus Endar Bachtiar Nur Handoko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Inversi Gelombang dan Pencitraan Fluida Bawah Permukaan (WISFIR), Kelompok Keahlian Fisika Sistem Kompleks, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung, Indonesia 40132

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Komputer, Universitas Komputer Indonesia  
Jl. Dipati Ukur 112-118 Bandung, Indonesia 40132, email: johnadl\_007@yahoo.com

**Abstrak.** Substitusi fluida merupakan bagian dari studi seismik untuk memodelkan dan menghitung berbagai macam skenario substitusi fluida yang memberi petunjuk pada pengamatan respon AVO (Amplitude Variation with Offset) dan data seismik post stack. Substitusi fluida melibatkan persamaan Gassmann yang akan mengestimasi efek fluida terhadap parameter modulus *bulk*. Prediksi parameter modulus *bulk* ini dapat dipakai untuk mencari keberadaan hidrokarbon.

Eksperimen dilakukan terhadap beberapa sampel core batuan karbonat formasi Parigi di daerah Cirebon. Batuan karbonat yang diprediksi berkategori reef dengan kandungan mineral *Calcite* yang dominan. Kemudian diukur di dalam laboratorium seismik batuan tekanan tinggi dengan variasi tekanan berupa overburden dan pore pressure. Pengamatan dilakukan saat fluida berupa air disubstitusikan ke dalam batuan serta mengamati efek fluida yang terjadi ketika variasi tekanan diberikan. Pengaruh dari kehadiran fluida ini akan digunakan untuk menjelaskan efek substitusi fluida pada batuan karbonat.

Kenaikan atau bertambahnya kecepatan gelombang-P ini berbanding lurus dengan modulus *bulk* dari fluida pengisi pori, sedangkan kecepatan gelombang-S cenderung menurun dengan kehadiran fluida. Hal ini menyatakan bahwa asumsi Gassmann tidak berlaku untuk batuan karbonat.

**Kata kunci:** *Gelombang-S dalam Batuan Karbonat; Persamaan Gassmann; Reservoir Batuan Karbonat; Substitusi Fluida.*

### 1 Pendahuluan

Parameter seismik secara kompleks dipengaruhi oleh banyak faktor seperti tekanan, temperatur, saturasi, jenis fluida, porositas, jenis pori batuan, dan lain-lain. Faktor-faktor ini sering saling berhubungan satu sama lain sehingga perubahan pada satu faktor berakibat pada perubahan faktor lain. Karena itu, penyelidikan efek perubahan suatu parameter tunggal dengan tidak mengubah parameter-parameter yang lainnya menjadi sangat penting dalam memahami aplikasi *rock physics* pada interpretasi seismik.

Untuk menghitung modulus *bulk* tersaturasi fluida dari persamaan Gassmann terhadap batuan karbonat menggunakan empat konstanta elastik yaitu *modulus Young*, *modulus Geser*, *Poisson Ratio*, dan *konstanta Lamé* dan kemudian menganalisis karakter konstanta elastik tersebut dalam keadaan jenuh 100% dan 0%. Dapat menjadi sebuah model prosedur standar untuk kajian-kajian sejenis menyangkut perilaku perambatan gelombang seismik dalam medium isotropik.

Pentingnya pengukuran ini adalah:

1. Batuan karbonat merupakan salah satu indikator keberadaan minyak di suatu daerah, disamping itu batuan ini merupakan batuan reservoir alami yang paling banyak diteliti di alam, khususnya dalam eksplorasi minyak bumi.
2. Batuan karbonat relatif lebih mudah ditemui di atas permukaan bumi, bekas eksplorasi minyak bumi. Dan tidak membutuhkan biaya yang besar.
3. Sampel batuan ini cukup kuat untuk menahan berbagai macam tekanan tinggi yang dapat digunakan untuk pengukuran berulang-ulang.
4. Bahan baku medium yang digunakan penelitian ini adalah berupa sampel *core* batuan alami yang diperoleh di lapangan bekas eksplorasi minyak bumi. Medium yang digunakan dalam penelitian ini diasumsikan sebagai medium yang memiliki sifat homogen isotropis, dimana besaran fisis tidak bergantung pada posisi di dalam medium, yang berarti konstanta-konstanta elastik di setiap posisi dalam medium dianggap sama besar. Medium juga dianggap bersifat elastik sehingga medium dapat kembali pada keadaan sebelumnya jika tidak ada lagi stress atau tekanan yang bekerja padanya.

Frekuensi gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 MHz jauh lebih tinggi dari frekuensi gelombang yang digunakan dalam eksplorasi sekitar 10 Hz-100 Hz. Dengan frekuensi yang tinggi, panjang gelombang seismik yang digunakan menjadi cukup kecil untuk mendeteksi kecepatan perambatan gelombang yang ada pada sampel. Penerapan hasil penelitian ini perlu mempertimbangkan daerah frekuensi tersebut.

Dalam penelitian ini, faktor temperatur diasumsikan tidak mempengaruhi perilaku kecepatan gelombang seismik. Temperatur yang dipakai pada observasi di dalam laboratorium dipertahankan pada kondisi temperatur kamar berkisar 28°C hingga 30°C. Pada kondisi riil, temperatur bervariasi menurut kedalaman lapisan bumi dan merupakan variabel yang mengubah densitas fluida, yang akibatnya berpengaruh pada perubahan kecepatan rambat gelombang akustik dalam fluida. Dengan demikian kemungkinan penerapan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini harus mempertimbangkan faktor perubahan temperatur tersebut.

Analisis teoritis, matematis dan fisis meliputi dasar-dasar teori gelombang dan elastisitas seperti Hukum Hooke, Persamaan Gassmann, dan persamaan-persamaan empiris lainnya. Dan preparasi sampel dengan *XRD* juga mengamati puncak intensitas maksimum sampel yang mengandung mineral *calcite* dan *dolomite*.

## 2 Teori Dasar

### 2.1 Persamaan Gassmann: Substitusi Fluida

Substitusi fluida adalah bagian yang penting dari studi atribut seismik yang berperan untuk memodelkan dan menghitung berbagai macam skenario fluida yang dapat memberi petunjuk pada pengamatan respon AVO (*Amplitude Variation with Offset*). Teknik yang paling umum dipakai untuk melakukan hal ini melibatkan aplikasi persamaan Gassmann [1].

Hasil persamaan Gassmann adalah bahwa modulus geser untuk suatu bahan isotropis tidak bergantung pada fluida pori, dan karena itu tidak berubah selama proses substitusi fluida. Praktisnya, fluida pori dalam suatu batuan harus “dikuras” terlebih dahulu, dan kemudian modulus (*bulk* dan geser) serta densitas *bulk* dari batuan berpori (*porous rock frame*) dihitung. Ketika sifat-sifat batuan berpori tersebut sudah diketahui, batuan diisi dengan fluida pori yang baru dan densitas serta modulus *bulk* efektif yang baru dapat dihitung.

### 2.2 Asumsi Dasar dari Persamaan Gassmann

Persamaan Gassmann memerlukan enam asumsi pokok [2]:

1. Batuan (matriks dan frame) secara makroskopik homogen isotropis, dan elastis.
2. Semua pori-pori dalam batuan saling berhubungan, dan berkomunikasi.
3. Pori-pori diisi dengan suatu fluida yang bebas dari gesekan.
4. Sistem batuan-fluida tertutup.
5. Fluida di dalam pori tidak berinteraksi dengan bagian solidnya. Fluida tidak membuat rapuh atau kuat suatu padatan.

Persamaan Gassmann adalah pendekatan pada frekuensi rendah untuk perambatan gelombang elastik dalam medium berpori. Pada frekuensi tinggi, beberapa asumsi yang dipakai menjadi tidak berlaku [2]:

$$K_s = K_d + \frac{(1 - \frac{K_d}{K_m})^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}} \quad (1)$$

dimana  $K_s$  modulus *bulk* batuan tersaturasi,  $K_f$  modulus *bulk* fluida,  $K_d$  modulus *bulk frame* (batuan *sry*),  $K_m$  modulus *bulk* matriks (butir), dan  $\phi$  porositas.

Variasi amplitudo refleksi seismik terhadap *offset* bergantung pada parameter intrinsik batuan seperti kecepatan gelombang kompresi ( $V_p$ ), kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ), densitas, *anisotropy*, dan atenuasi. Parameter seismik batuan, dipengaruhi oleh banyak faktor seperti: tekanan, temperatur, saturasi, jenis fluida, dll. Pemahaman hubungan antara parameter-parameter ini ( $V_p$ ,  $V_s$ , densitas, dll) dan sifat batuan seperti litologi, porositas, dan kandungan fluida pori diperlukan untuk mengekstrak secara kuantitatif informasi sifat batuan.

### 3 Preparasi Sampel

#### 3.1 Difraksi Sinar-X (X-Ray Diffraction / XRD)

Difraksi sinar-x adalah suatu metode yang diperlukan untuk menganalisis mineralogi suatu sampel batuan, sebab melalui metode ini kita dapat mengidentifikasi jenis dan sifat mineral tertentu dengan melihat pola difraksi mineral yang dihasilkan.

Alat yang digunakan dalam pengukuran ini adalah difraktometer jenis Pw1710 Based di laboratorium Teknik Pertambangan. Anoda atau target yang dipakai adalah tembaga Cu. Tegangan yang digunakan 40 kV dengan kuat arus 30 mA. Difraksi dimulai pada sudut  $2\theta = 10^\circ$  sampai sudut  $2\theta = 90^\circ$ , dengan perbedaan sudut per langkah  $2\theta = 0,05^\circ$ . Dan waktu pencatatan per langkah 1 detik. Keluaran difraktometer akan terekam dalam CPU yang telah diset bersamaan dengan dimulainya proses pengambilan data. Data yang terekam berupa sudut difraksi ( $2\theta$ ), besarnya intensitas (I), dan waktu pencatatan per langkah (t).

Hasil pengukuran sampel core dengan XRD (**Sampel A**):

**Tabel 1** Tabel hasil XRD sampel A.

Sudut ( $2\theta$ )	Intensitas	% Intensitas relatif	Sudut ( $2\theta$ )	Intensitas	% Intensitas relatif
10,720	1325	24,5	61,400	79	1,5
23,065	571	10,5	63,080	61	1,1
26,635	67	1,2	64,665	196	3,6
29,420	5417	100,0	65,630	88	1,6
31,445	130	2,4	69,215	30	0,6
35,990	708	13,1	70,260	46	0,9
39,435	930	17,2	72,890	62	1,2
43,195	961	17,7	73,675	22	0,4
47,120	253	4,7	76,270	23	0,4
47,540	756	14,0	77,160	58	1,1
48,535	756	14,0	81,530	45	0,8
56,575	125	2,3	83,780	86	1,6
57,400	289	5,3	84,065	48	0,9
58,135	22	0,4	84,825	42	0,8
60,690	174	3,2			

Dalam mengidentifikasi sampel dilakukan dengan cara membandingkan pola difraksi hasil pengukuran sampel *core* di atas dengan data literatur berupa sampel mineral murni (Tabel 9) [3]. Hal ini diperlukan untuk memastikan persentase kandungan mineral *calcite* dalam sampel *core* dan juga dalam perhitungan modulus *bulk* mineral  $K_m$  dalam persamaan Gassmann. Yang diperbandingkan adalah intensitas maksimum dengan sudut theta yang memiliki nilai yang sama:

**Tabel 2** Hasil perbandingan mineral *Calcite* murni dengan mineral karbonat.

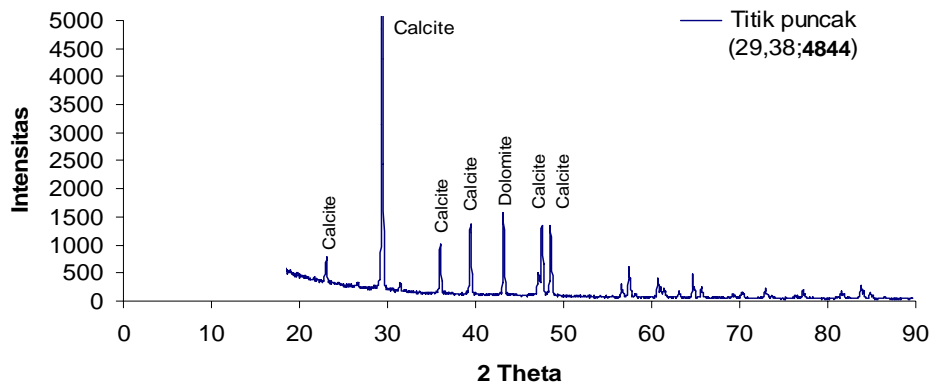
No	2 Theta	Intensitas Maksimum ( <i>calcite</i> murni)	2 Theta	Intensitas Maksimum (karbonat)	Relatif intensitas [%]
1	<b>29,4</b>	2328	10,720	1325	24,5
2	<b>47,5</b>	160	<b>23,065</b>	571	10,5
3	<b>43,1</b>	152	<b>29,42</b>	5417	100
4	<b>48,5</b>	148	<b>35,99</b>	708	13,1
5	<b>39,4</b>	123	<b>39,435</b>	930	17,2
6	<b>23</b>	108	<b>43,195</b>	961	17,7
7	<b>35,9</b>	99	<b>47,54</b>	756	14,0
8	60,9	76	<b>48,535</b>	756	14,0
9	31,4	74			
10	61,1	67			
11	65,6	48			
12	57,5	38			

Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa enam puncak dari tujuh puncak tertinggi batuan karbonat mengandung *calcite*.

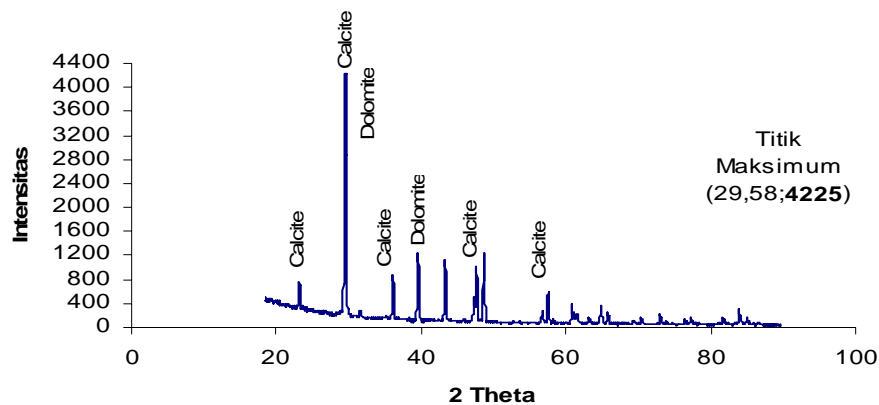
**Tabel 3** Hitungan persentase mineral *Calcite* dalam sampel A.

kandungan	% relatif intensitas	kandungan	% relatif intensitas
<i>dolomite</i>	24,5		0,6
<i>calcite</i>	10,5		0,9
<i>calcite</i>	100		1,2
<i>calcite</i>	2,4		0,4
<i>calcite</i>	13,1		0,4
<i>calcite</i>	17,2		1,1
<i>calcite</i>	17,7		0,8
<i>calcite</i>	14		1,6
<i>calcite</i>	14		0,9
<i>calcite</i>	5,3		0,8
<i>calcite</i>	3,2	total	<b>225</b>
<i>calcite</i>	1,5		
<i>calcite</i>	1,6		

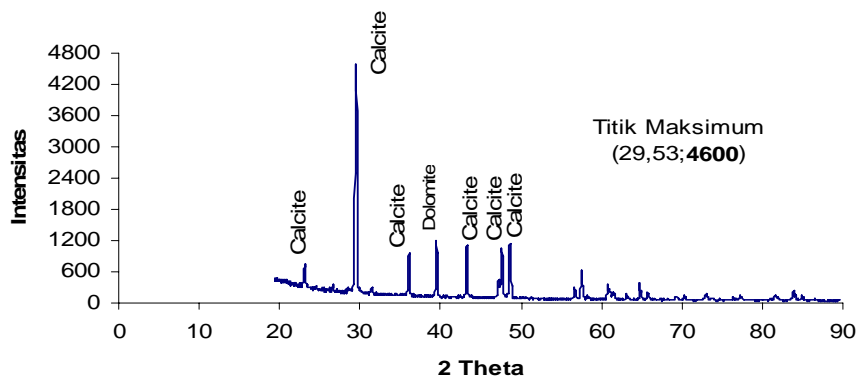
Gambar di bawah mengilustrasikan tujuh puncak tertinggi intensitas yang didominasi oleh *calcite*.



(a)



(b)

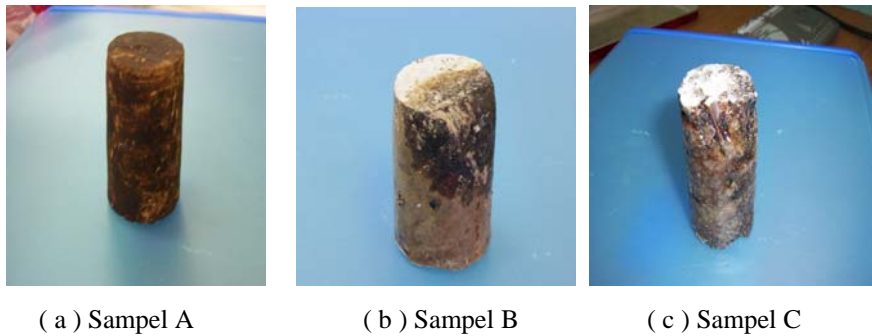


(c)

**Gambar 1** Grafik XRD pada beberapa sampel dengan koordinat (sudut 2 theta, intensitas maksimum): (a) sampel A ( $29,38^{\circ}$ , 4844) (b) sampel B ( $29,58^{\circ}$ , 4225) (c) Sampel C ( $29,53^{\circ}$ , 4600).

#### 4 Studi Eksperimen Pengaruh Substitusi Fluida Pada Batuan Karbonat

*Proses pengcore-an sampel* dilakukan terhadap bongkahan batuan dengan mesin core sehingga didapatkan tiga buah sampel dengan ukuran yang berbeda-beda. Kemudian diukur tinggi, diameter, dan massa sampel dari tiga kondisi yaitu sry (kering), Wet (Water Saturated atau tersaturasi air 100%), dan SWIRR (Saturated Water Irreducible atau tersaturasi air 0%). Kecepatan gelombang P dan S dari tiap sampel diukur dengan variasi tekanan overburden dan tekanan pori dalam ketiga kondisi di atas.



Gambar 2 Tiga buah sampel yaitu sampel A, B, dan C.

## 5 Hasil Eksperimen

### 5.1 Hasil Pengukuran Efek Konstanta Elastisitas Terhadap Tekanan

Tabel 4 Data Konstanta elastis.

Sampel A							
Tekanan (psi)	Vs	Vp	Poisson Rasio	modulus geser (10 <sup>9</sup> )	modulus bulk (10 <sup>9</sup> )	modulus young (10 <sup>9</sup> )	konstanta lame (10 <sup>9</sup> )
Sry	1176,47	2717,39	0,384662	2,69	10,75956201	7,445899302	8,9670914
	1189,06	2747,25	0,384743	2,75	10,99941866	7,606560579	9,1683783
	1466,28	2793,30	0,309823	4,18	9,588398826	10,94095038	6,8040660
	1453,49	2857,14	0,325421	4,10	10,38591636	10,87897829	7,6499357
	1477,10	2816,90	0,310377	4,24	9,763098216	11,10785112	6,9374860
	1506,02	3105,59	0,346263	4,41	12,86100424	11,86328213	9,9236675
Wet	235,29	2816,90	0,496487	0,11	15,27092491	0,321889052	15,19922608
	168,35	2932,55	0,498347	0,06	16,63258807	0,164987326	16,59588377
	189,75	2985,07	0,497971	0,07	17,21651876	0,209552784	17,16988842
	182,48	3067,48	0,498224	0,06	18,19247715	0,193832612	18,14935219
	200,80	3144,65	0,497953	0,08	19,10554119	0,23466624	19,05332187
	204,92	3225,81	0,497974	0,08	20,10549322	0,244385715	20,05111183
Sampel B							
Tekanan (psi)	Vs	Vp	Poisson Rasio	modulus geser (10 <sup>9</sup> )	modulus bulk (10 <sup>9</sup> )	modulus young (10 <sup>9</sup> )	konstanta lame (10 <sup>9</sup> )
Sry	1594,90	2105,26	-0,17349	5,54	2,267122471	9,16132464	-1,4276664
	1724,14	2053,39	-0,69503	6,48	0,550945233	3,950392416	-3,7669164
	1949,32	2145,92	-1,85972	8,28	-1,00544417	-14,2354271	-6,5248201
	1996,01	2252,25	-1,32991	8,68	-0,52165451	-5,72747890	-6,3085982
	2083,33	2207,51	-3,57306	9,46	-1,99132185	-48,6646619	-8,2956997



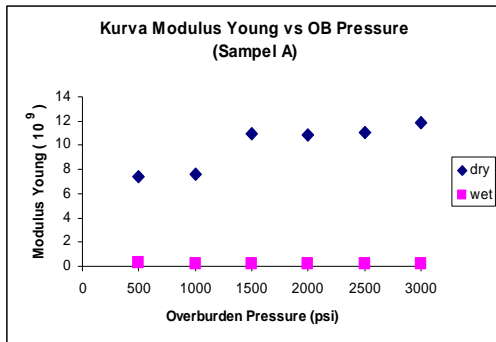
	2531,65	2283,11	3,177964	13,96	-7,26207069	116,6853924	-16,571659
	1420,45	2364,07	0,217499	4,40	6,315349488	10,70456793	3,38459530
	1277,14	2732,24	0,36021	3,55	11,52659584	9,667816699	9,15739876
<b>Wet</b>	1233,05	2557,54	0,348585	3,31	9,834708123	8,934751679	7,62628134
	1267,43	2793,30	0,370373	3,50	12,33343767	9,592476929	10,000137
	1331,56	2985,07	0,375796	3,86	14,26370483	10,62967671	11,68830396
	1524,39	3703,70	0,398024	5,06	23,13674878	14,15639991	19,76141261

**Sampel C**

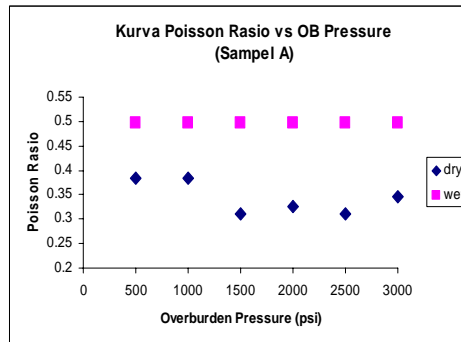
Tekanan (psi)	Vs	Vp	Poisson Rasio	modulus geser (10 <sup>9</sup> )	modulus bulk (10 <sup>9</sup> )	modulus young (10 <sup>9</sup> )	konstanta lame (10 <sup>9</sup> )
	898,47	2079,00	0,38517	1,53	6,164802186	4,247419512	5,142684799
	919,96	2298,85	0,404658	1,61	7,89380168	4,51568596	6,822203378
<b>Sry</b>	853,24	2433,09	0,429889	1,38	9,399830892	3,954206697	8,478032638
	980,39	2873,56	0,434132	1,83	13,24880879	5,236018888	12,03180828
	972,76	2392,34	0,400957	1,80	8,473741264	5,035596111	7,27560869
	991,08	2403,85	0,397603	1,87	8,487416253	5,21451427	7,243735904
	500,00	1388,89	0,425551	0,47	3,03059496	1,353740028	2,714053127
	492,61	1369,86	0,425739	0,46	2,949481269	1,314196127	2,64222622
<b>Wet</b>	500,00	1351,35	0,420693	0,47	2,835234449	1,349126159	2,518692615
	502,51	1515,15	0,438204	0,48	3,720618046	1,379515864	3,400886894
	507,61	1666,67	0,448877	0,49	4,623185004	1,418114631	4,296928895
	769,23	1408,45	0,287461	1,12	2,269184738	2,893741529	1,519973298

Jika data di atas diplot ke dalam bentuk grafik sebagai berikut:

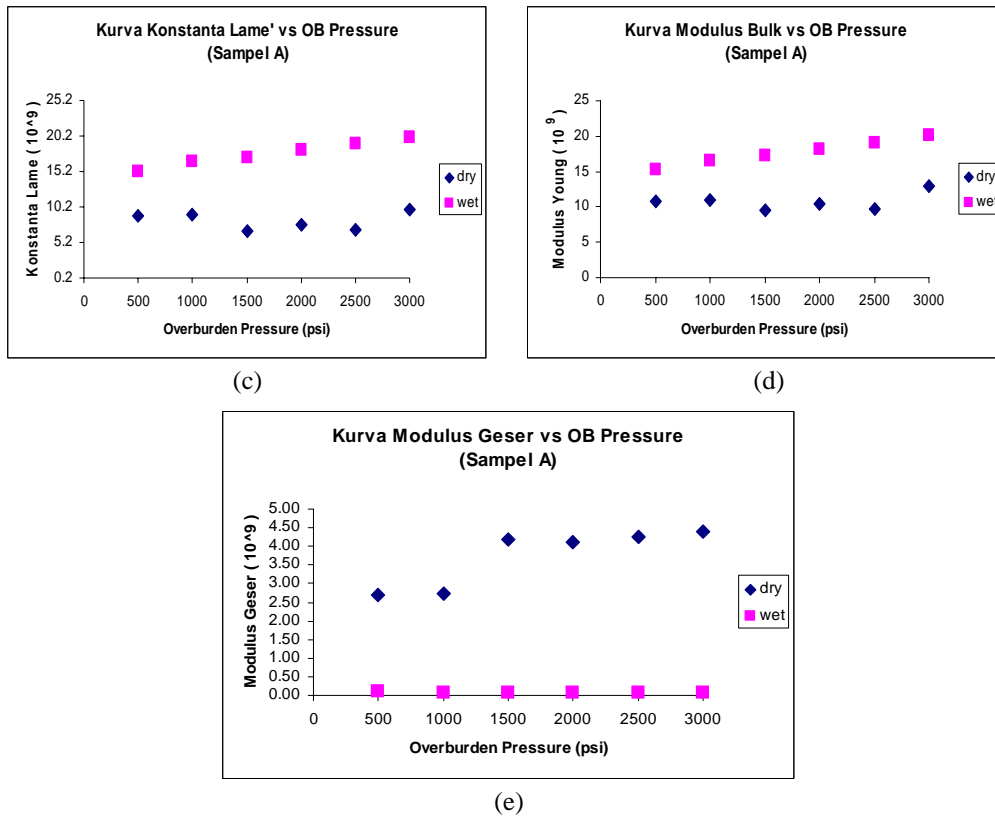
**Sampel A:**



(a)



(b)



**Gambar 3** Grafik Konstanta Elastisitas terhadap overburden pressure (sampel A): (a). Modulus Young (b). Poisson Ratio (c). Konstanta Lamé (d) Modulus Bulk (e) Modulus Geser.

Dari kurva konstanta elastis terhadap overburden pressure (Gambar 3) di atas terlihat bahwa pada saat kondisi tersaturasi air terjadi peningkatan nilai konstanta elatis untuk modulus *bulk* dan konstanta lame dan sebaliknya pada saat kondisi kering terjadi penurunan nilai semua konstanta elastis kecuali untuk modulus geser dan modulus Young (Lihat tabel di bawah):

**Tabel 5** Hasil perhitungan persentase nilai konstanta elastis.

Kondisi	Modulus Geser	Modulus Bulk	Konstanta Lamé	Poisson Ratio	Modulus Young
Kering	Naik 7-38%	Turun 14-52%	Turun 21-83%	Turun 11-73%	Naik 6-28%
Tersaturasi air	Turun 24-49%	Naik 9-32%	Naik 9-32%	Konstan	Turun 24-49%

Dari tabel di atas terlihat bahwa efek substitusi fluida berpengaruh pada modulus *bulk* dan modulus geser, sehingga prediksi Gassmann yang menyatakan bahwa efek kehadiran fluida tidak mempengaruhi modulus geser tidak berlaku.

## 5.2 Hasil Analisis Difraksi Sinar-X terhadap Sampel Core

Hasil analisis difraksi sinar-X dapat ditentukan persentase kandungan *calcite* dalam sampel A, B dan C, sehingga didapatkan:

**Tabel 6** Hasil perhitungan persentase tiga buah sampel.

% <i>Calcite</i>	Sampel A	Sampel B	Sampel C
	81,17	59,6	82,5

Dari tabel di atas ternyata kandungan mineral *calcite* mendominasi di dalam batuan karbonat sampel A dan C sekitar 81,17% dan 82,5% serta sampel B sekitar 59,6%.

## 6 Perhitungan Gassmann terhadap Substitusi Fluida dari Data Core

Data input yang dibutuhkan dalam persamaan Gassmann adalah modulus *bulk sry* sampel ( $K_{sry}$ ), modulus *bulk* matriks ( $K_m$ ), modulus *bulk* fluida ( $K_f$ ), dan porositas  $\phi$ . Dan selanjutnya menghitung modulus *bulk* tersaturasi air ( $K_{sat}$ ).

Dari persamaan Gassmann di bawah ini [2]:

$$K_s = K_d + \frac{(1 - \frac{K_d}{K_m})^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{1 - \phi}{K_m} - \frac{K_d}{K_m^2}}$$

Data input yang dibutuhkan dalam persamaan Gassmann di atas:

1. Modulus *bulk sry* ( $K_{sry}$ ) dalam kondisi irreducible
2. Modulus *bulk* matriks ( $K_m$ )
3. Modulus *bulk* fluida ( $K_f$ )
4. Porositas  $\phi$

Data output adalah menghitung modulus *bulk* tersaturasi air ( $K_{sat}$ ).

Prosedur perhitungan Gassmann terhadap substitusi fluida:

- Mengukur massa masing-masing sampel (gr):

**Tabel 7** Hasil pengukuran massa sampel.

Sampel	Awal	Setelah di oven	Setelah disaturasi	Setelah di sentrifugal (massa sry)
A	125,6	124,6	125,9	125,7
B	116,5	115,9	124,1	121,8
C	115,6	115,3	117,5	116,1

- Modulus *bulk sry* ( $K_{sry}$ ) dalam kondisi irreducible (kondisi P = 1000 psi) [2]:

$$K_d = \rho_d \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

**Tabel 8** Hasil perhitungan modulus *bulk sry*.

SAM PEL	Por. (%)	Massa swirr (gr)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Volume total (cm3)	Rho sry (kg/m3)	Vp sry (m/s)	Vs sry (m/s)	K sry (Gpa)
A	8	125,7	3,78	5,769	64,707376	1942,591	2673,8	1618,12	<b>13,88379</b>
B	12	121,8	3,78	4,984	55,902507	2178,793	2577,3	1321	<b>14,46910</b>
C	10	116,1	3,78	5,45	61,129347	1899,251	1567,4	1168,22	<b>4,663013</b>

- Modulus *bulk matriks* ( $K_m$ ) [2]:

$$M_V = \sum_{i=1}^n c_i M_i \quad \frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{M_i} \quad M = \frac{1}{2} (M_V + M_R) = K_m$$

**Tabel 9** Hasil perhitungan modulus *bulk matriks*.

SAMPL	Calcite		dolomite	
	% content	Km (Gpa)	% content	Km (Gpa)
A	26	71	4	94,8
B	27	71	5	94,8
C	32	71	5	94,8

SAMPL	Mv (Gpa)	1/MR (Gpa)	MR(Gpa)	Km (Gpa)
A	22,252	0,004	244,863	<b>133,558</b>
B	23,910	0,004	230,934	<b>127,422</b>
C	27,460	0,005	198,631	<b>113,045</b>

- Modulus *bulk* fluida ( $K_f$ )

Tekanan  $P = 1000 \text{ psi} = 6,895 \text{ MPa} = 6,895 \times 10^{-3} \text{ GPa}$

Suhu  $T = 28^\circ\text{C}$

Fluida yang diidentifikasi yaitu *oil* dan *brine*:

Modulus *bulk oil* ( $K_{oil}$ ):

$$\text{American Petroleum Institute Oil Gravity (API) [2]: } API = \frac{141,5}{\rho_0} - 131,5$$

$$\text{Densitas dalam kondisi ruang [2]: } \rho_0 = \frac{141,5}{API + 131,5}$$

Kecepatan dalam API (m/s) [2]:

$$V_P = 15450(77,1 + API)^{-0,5} - 3,7T + 4,64P + 0,0115(0,36API^{0,5} - 1)TP$$

$$\text{Modulus Bulk oil [2]: } K_{oil} = \rho_0 V_P^2$$

Densitas tekanan [2]:

$$\rho_p = \rho_0 + \left(0,00277P - 1,71 \cdot 10^{-7} P^3\right) \cdot (\rho_0 - 1,15)^2 + 3,49 \cdot 10^{-4} P$$

$$\text{Densitas in-situ [2]: } \rho = \rho_p \left(0,972 + 3,81 \cdot 10^{-4} [T + 17,78]^{1,175}\right)$$

**Tabel 10** Hasil perhitungan modulus *bulk oil* in-situ.

Densitas kondisi ruang (gr/cm <sup>3</sup> )	API	Kecepatan (km/s)	$K_{oil}$ (GPa)	Densitas tekanan (gr/cm <sup>3</sup> )	Densitas in-situ (gr/cm <sup>3</sup> )	$K_{oil}$ in-situ (GPa)
0,810	43	1,341	1,459	0,815	0,810	<b>1,458</b>

$$\text{Modulus Bulk oil in-situ [2]: } K_{oil} = \rho \cdot V_P^2$$

- Modulus *bulk brine* ( $K_{brine}$ )

Kecepatan *brine* [2]:

$$V_b = V_w + S(1170 - 9.6T + 0.055T^2 - 8.5 \times 10^{-5}T^3 + 2.6P - 0.0029TP - 0.047P^2) + S^{1.5}(780 - 10P + 0.16P^2) - 820S^2$$

Kecepatan air [2]:  $V_w = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 w_{ij} T^i P^j$

Nilai Koefisien air atau *brine*  $w_{ij}$ :

**Tabel 11** Nilai Koefisien air.

w00	=	1402,85	w02	=	3,44E-03
w10	=	4,871	w12	=	1,74E-04
w20	=	-0,04783	w22	=	-2,14E-06
w30	=	1,49E-04	w32	=	-1,46E-08
w40	=	-2,20E-07	w42	=	5,23E-11
w01	=	1,524	w03	=	-1,20E-05
w11	=	-0,0111	w13	=	-1,63E-06
w21	=	2,75E-04	w23	=	1,24E-08
w31	=	-6,50E-07	w33	=	1,33E-10
w41	=	7,99E-10	w43	=	-4,61E-13

S adalah salinitas :

**Tabel 12** Nilai Salinitas.

	<b>berat fraksi (ppm/1000000)</b>
S	0,001
S <sup>1.5</sup>	3,16E-05
S <sup>2</sup>	0,000001

Kecepatan air:

Vw1=	1,41E+03
Vw2=	1,34E+02
Vw3=	-3,61E+01
Vw4=	3,15E+00
Vw5=	-1,30E-01

Kecepatan air = Vw1+Vw2+Vw3+Vw4+Vw5=1514,91 m/s

Kecepatan *brine* = 1515,89 m/s

Densitas dan kecepatan akustik *bulk* pada air dan *brine* menggunakan persamaan Batzle dan Wang [2]:

$$\rho_w = 1 + 1 \times 10^{-6} \left( \begin{array}{l} -80T - 3.3T^2 - 0.00175T^3 + 489P - 2TP \\ + 0.016T^2P - 1.3 \times 10^{-5}T^3P - 0.333P^2 - 0.002TP^2 \end{array} \right)$$

$$= 0,998186 \text{ kg/m}^3$$

dan

$$\rho_b = \rho_w + S \left[ 0.668 + 0.44S + 1 \times 10^{-6} \left( 300P - 2400PS + T \{ 80 + 3 - 3300S - 13P + 47PS \} \right) \right]$$

$$= 0,998858 \text{ kg/m}^3$$

$$K_{brine} \text{ in-situ [5]: } K_{brine} = \rho_{brine} V_{brine}^2 = 2,295298 \text{ GPa}$$

Modulus *bulk* campuran fluida  $K_f$  menggunakan persamaan Wood [2]:

$$\frac{1}{K_f} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o}$$

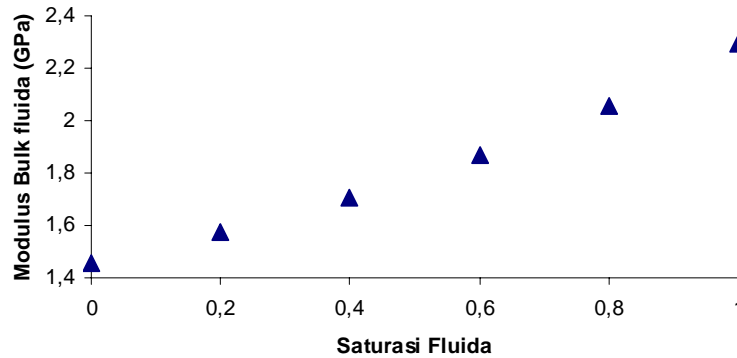
$$\text{Densitas } bulk \text{ campuran fluida } \rho_f \text{ [2]: } \rho_f = S_w \rho_w + S_o \rho_o$$

Di bawah ini adalah modulus fluida pada saturasi air yang bervariasi:

**Tabel 13** Hasil perhitungan modulus *bulk* fluida.

Saturasi <i>brine</i>	1/ $K_{fluida}$	$K_{fluida}$ (Gpa)	$Rho_{fluida}$
<b>0</b>	0,685871056	<b>1,458</b>	0,81
0,2	0,6358315	1,572743722	0,8477716
0,4	0,585791944	1,707090734	0,8855432
0,6	0,535752388	1,86653391	0,9233148
0,8	0,485712832	2,05882969	0,9610864
<b>1</b>	0,435673276	<b>2,295298</b>	0,998858

$K_{brine}$	=	2,295298	GPa
$K_{oil}$	=	1,458	GPa
$Rho_{brine}$	=	0,998858	kg/m <sup>3</sup>
$Rho_{oil}$	=	0,81	kg/m <sup>3</sup>



**Gambar 4** Kurva Modulus *Bulk* Fluida terhadap variasi saturasi.

Pada gambar di atas terlihat kurva antara modulus *Bulk* fluida dengan saturasi fluida berbentuk kurva linier karena penambahan saturasi fluida akan menyebabkan bertambah pula nilai modulus *Bulk*.

- Porositas  $\phi$ :

**Tabel 14** Nilai porositas sampel.

SAMPEL	Porositas (%)
A	8
B	12
C	10

Jadi data-data input di atas dapat dikelompokkan seperti tabel di bawah:

**Tabel 15** Data input buat persamaan Gassmann.

SAMPEL	$K_{sry}$ (Gpa)	$K_m$ (Gpa)	$K_{fluida}$ (Gpa) tersaturasi 0%	$K_{fluida}$ (Gpa) tersaturasi 100%	Porositas (%)
A	13,88379648	133,558	1,458	2,295298	8
B	14,46910137	127,422			12
C	4,663013864	113,045			10

- Densitas *Bulk* (rho *Bulk*) [2]:  $\rho_B = \rho_g(1-\phi) + \rho_f\phi$



Sampel	Rho g (gr/cm <sup>3</sup> )	Porositas	1- Porositas	Rho fluida (0%)	Rho fluida (100%)	Rho Bulk (0%)	Rho Bulk (100%)
A	2,7	0,08	0,92			2,5488	2,563909
B	2,7	0,12	0,88	0,81	0,998858	2,4732	2,495863
C	2,7	0,1	0,9			2,511	2,529886

(a)

SA MP EL	Ksr y/K m	1- (Ksry/ Km)	Por.	Por./Kf (0%)	Por./Kf (100%)	1- Por.	(1- Por)/K m	Kd/K m <sup>2</sup>	K sat (Gpa) (0%)	K sat (Gpa) (100%)
A	0,10	0,89604	0,08	0,05486	0,03485	0,92	0,00688	0,0007	<b>27,050459</b>	<b>33,48396</b>
B	0,11	0,88644	0,12	0,08230	0,05228	0,88	0,00690	0,0008	<b>23,366212</b>	<b>27,94843</b>
C	0,04	0,95875	0,1	0,06858	0,04356	0,9	0,00796	0,0003	<b>16,728636</b>	<b>22,62887</b>

(b)

**Tabel 16** Tabel 16. Data input buat persamaan Gassmann: (a) Nilai densitas bulk (b) nilai  $K_{sat}$  0% dan 100% (c) Nilai konstanta elastis.

Sam pel	Tersat urasi	Rho bulk	Vp (km/s)	Vs (km/s)	$\mu_{sat} = \mu_{dry}$ (Gpa)	$K_s$ (Gpa)	Km	Kbrine	K oil	Kf
A	0%	2,549	2,674	1,618	6,674	9,324	133,558			1,458
	100%	2,564	2,933	0,168	0,073	21,952				2,295
B	0%	2,473	2,577	1,321	4,316	10,674	127,422	2,295	1,458	1,458
	100%	2,496	2,732	1,277	4,071	13,204				2,295
C	0%	2,511	1,567	1,168	3,427	1,600	113,045			1,458
	100%	2,530	13,699	0,493	0,614	473,921				2,295

Sam pel	1- Kf/K m	(1- (Ks/K m))^2	Ks/K m	Kf/K m	Ksry	Vs/Vp	Poisson Ratio	Lambda	Shear Modulus	Young Modulus	Bulk Modulus
A	0,989	0,865	0,070	0,011	-8,967	0,605	0,211	11,548	6,674	16,164	9,324
	0,983	0,698	0,164	0,017	-2,988	0,057	0,498	21,977	0,073	0,218	21,952
B	0,989	0,839	0,084	0,011	-0,637	0,513	0,322	12,113	4,316	11,410	10,674
	0,983	0,803	0,104	0,018	-4,914	0,467	0,360	14,561	4,071	11,075	13,204
C	0,989	0,972	0,014	0,013	-14,840	0,745	-0,12	2,742	3,427	5,998	1,600
	0,983	10,191	4,192	0,020	330,505	0,036	0,499	474,125	0,614	1,841	473,921

(c)

## 7 Analisis Parameter Seismik

Dalam pengukuran kecepatan terhadap saturasi fluida, terlihat bahwa ketiga buah sampel memiliki nilai kecepatan gelombang-P jauh lebih besar dari kecepatan gelombang-S (sesuai dengan fakta bahwa travel time gelombang-P

lebih dulu datang daripada gelombang-S). Kecepatan gelombang-P untuk batuan yang tersaturasi fluida 100% lebih besar dari kondisi kering (*sry*) dan tersaturasi fluida 0% (*swirr*) dan sebaliknya kecepatan gelombang-S untuk batuan tersaturasi fluida 100% lebih kecil dari kondisi kering (*sry*) dan tersaturasi fluida 0% (*swirr*).

Efek porositas juga ikut mempengaruhi kecepatan gelombang-P dan S. Terlihat bahwa makin besar nilai porositas, makin besar pula nilai kecepatan gelombang-S.

Dalam analisis difraksi sinar-X terlihat bahwa kandungan mineral *calcite* di dalam sampel batuan karbonat A dan C sangat mendominasi sekitar 81,17% dan 82,5% serta sampel B hanya 59,6%.

Berbeda dengan XRD (dimana batuan tersusun atas mineral *calcite* dan *dolomite* saja), dalam analisis sayatan tipis menggunakan bantuan mikroskop terlihat bahwa batuan *reef* tersusun oleh butiran foraminifera kecil dan besar, *brachiopoda*, *molusca*, *echinoderma* (sebagai butiran rangka), matriksnya mikrit, semen berupa *sparry calcite*, *dolomite* dan oksida besi serta memiliki porositas. Dimana persentase *calcite* paling dominan dibandingkan dengan mineral *dolomite* tetapi masih di bawah persentase dari *mikrit*.

Dari perhitungan Gassmann, nilai modulus *bulk* tersaturasi:

**Tabel 17** Hasil perhitungan: (a) nilai Ksat 0% dan 100% (b) nilai konstanta elastis.

SAMPEL	K sat (Gpa) (0%)	K sat (Gpa) (100%)
A	27,050459	33,48396
B	23,366212	27,94843
C	16,728636	22,62887

(a)

Sampel	Tersaturasi	Poisson Ratio	Lambda	Shear Modulus	Young Modulus	Bulk Modulus
A	0%	0,211	11,548	6,674	16,164	9,324
	100%	0,498	21,977	0,073	0,218	21,952
B	0%	0,322	12,113	4,316	11,410	10,674
	100%	0,360	14,561	4,071	11,075	13,204
C	0%	-0,125	2,742	3,427	5,998	1,600
	100%	0,499	474,125	0,614	1,841	473,921

(b)

## 8 Kesimpulan

1. Pada medium alami (berongga dan pori terisi fluida), terlihat penurunan nilai  $V_s$  untuk kondisi wet dibandingkan dengan kondisi *sry*. Artinya ada pengaruh substitusi fluida terhadap kecepatan gelombang-S. Ini tidak sesuai dengan asumsi Gassmann.
2. Efek kehadiran fluida di dalam medium alami secara umum akan menambah cepat rambat gelombang-P. Ini sesuai dengan persamaan Gassmann untuk kecepatan gelombang-P. Persentase kenaikan mencapai 11,5 % pada sampel A, dan 35 % untuk sampel B. Kecuali untuk sampel C turun sebesar 30 %.
3. Asumsi Gassmann yang menyatakan bahwa kehadiran fluida dalam medium pori tidak mempengaruhi kecepatan gelombang-S, *tidak berlaku untuk batuan karbonat* karena cepat rambat gelombang-S cenderung berubah di dalam medium alami tersaturasi fluida. Persentase penurunan mencapai 83,3 % pada sampel A, 15 % untuk sampel B dan 39 % untuk sampel C.
4. Dari kurva konstanta elastis terhadap overburden pressure (Gambar 3) terlihat pada saat kondisi tersaturasi air terjadi peningkatan nilai konstanta elastis yang sangat signifikan untuk modulus *bulk* dan konstanta lame dan sebaliknya pada saat kondisi kering terjadi penurunan nilai semua konstanta elastis kecuali untuk modulus geser dan modulus Young. Jadi efek substitusi fluida berpengaruh pada modulus *bulk* dan modulus geser, sehingga prediksi Gassmann yang menyatakan bahwa efek kehadiran fluida tidak mempengaruhi modulus geser *tidak berlaku pada batuan karbonat*.

## 9 Referensi

- [1] Smith, Tad M., Sondergeld, Carl H., & Rai, Chandra S., *Gassmann fluid substitution: a tutorial*, Journal of Geophysics, **68**(2), 430-440, 2003.
- [2] Wang, Z., *Fundamentals of Seismic Rock Physics*, Journal of Geophysics, **66**(2), 398-412, 2001.
- [3] Widyaningrum, *Analisa Kuantitatif Campuran Mineral Calcite dan Quartz menggunakan XRD*, Skripsi S1, Departemen Fisika ITB, 1999.
- [4] Berryman, J. G., *Origin of Gassmann's Equation*, Article, 187-191, 1999.
- [5] Mavko, G., Mukerji, T., & Dvorkin, J., *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*, Cambridge University, pp. 168-235, 1999.
- [6] Murphy, *Modulus Decomposition of Compressional and Shear Velocities in Sand Bodies*, Geophysics, **58**, 227-239, 1993.