

Hubungan antara Porositas dengan Kedalaman untuk Reservoir-Reservoir Batupasir di Indonesia Barat

Oleh:

Bambang Widarsono

S A R I

Porositas batuan sebagai data penting bagi kegiatan produksi minyak dan gas (migas) memiliki hubungan yang unik, meskipun bervariasi, dengan kedalaman. Secara umum porositas mengecil dengan bertambahnya kedalaman, dan pengetahuan ini menjadi suatu aset yang sedikit banyak dapat digunakan untuk berbagai aplikasi di industri migas antara lain untuk mengontrol keakuratan porositas hasil evaluasi log sumuran. Pertanyaan yang selalu hadir adalah apakah hubungan antara porositas dan kedalaman yang ada di literatur cukup valid untuk kasus-kasus di Indonesia. Tulisan ini menyajikan usaha untuk mencari validitas bagi hubungan porositas – kedalaman yang ada di literatur. Sebagai data pengujian diambil porositas 157 percontohan batuan dari 15 lapangan minyak yang berasal dari 6 cekungan di Indonesia bagian Barat. Hasil utama dari studi ini adalah tidak validnya hubungan porositas – kedalaman yang ada dan bukti bahwa tingginya tingkat sementasi dan heterogenitas dari batuan-batuan reservoir di Indonesia. Hasil penting lainnya adalah sebuah hubungan matematis porositas – kedalaman yang sedikit banyak dapat dianggap mewakili untuk reservoir-reservoir di Indonesia Barat.

Kata kunci: porositas, kedalaman, kompaksi, sementasi, hubungan empiris, validitas

ABSTRACT

Rock porosity as one of the most important rock properties has a unique, despite varied, relationship with burial depth. In general, porosity decreases with depth, and this knowledge is virtually usable for many applications in oil and gas industry including as a source of control for log-derived porosity estimation. Questions that always rise is usually around the validity of any published relationships to Indonesian cases. This paper presents results of study, which was basically devoted to testing such published relationships using data from Indonesian reservoirs. The testing data to be used involved 157 plug samples taken from 15 oil fields situated in 6 producing sedimentary basins in western Indonesia. Main conclusions that have been drawn from the study is the invalidity of the relationships to Indonesian reservoirs and the fact of high cementation levels of sandstones in Indonesian reservoirs. Another important result of the study is the establishment of an empirical porosity – depth relationship that is considered valid at least for sandstone reservoirs in western Indonesia.

Key words: porosity, depth, compaction, cementation, empirical relationship, validity.

I. PENDAHULUAN

Dalam kegiatan karakterisasi reservoir dan evaluasi formasi, penentuan sifat fisik batuan adalah menjadi bagian yang sangat penting. Salah satu sifat fisik batuan yang terpenting adalah porositas, dan

analisis atas data log sumuran dapat dikatakan sebagai satu-satunya cara untuk menentukannya. Permasalahan yang umum dihadapi oleh penganalisis log sumuran adalah ketidakpastian dari hasil analisis log yang mereka hasilkan.

Cara yang paling umum dilakukan untuk mengurangi ketidakpastian hasil porositas dari log sumuran adalah dengan mengkalibrasi hasil perhitungan dengan porositas percontoh batuan hasil pengukuran di laboratorium. Cara ini dianggap cukup baik tetapi umumnya akan sangat berkurang efektivitasnya dengan sedikitnya data dan tingginya tingkat heterogenitas batuan reservoir. Pada tingkat heterogenitas lateral yang tinggi maka kalibrasi yang dilakukan pada sumur-sumur tertentu menjadi tidak valid untuk diterapkan pada sumur-sumur lainnya.

Cara lain yang dapat dipakai untuk mengontrol tingkat kepercayaan atas porositas hasil keluaran analisis log sumuran adalah dengan membandingkan dengan kecenderungan secara umum variasi porositas dengan kedalaman. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan pengetahuan/pengalaman lokal (*local knowledge*) atau dengan menggunakan hubungan-hubungan umum antara porositas dan kedalaman yang dapat diperoleh dari literatur. Secara umum memang telah disepakati bahwa porositas mengecil secara bervariasi dengan kedalaman. Hal ini menyebabkan dimungkinkannya untuk membandingkan porositas hasil analisis log (tentunya pada kedalaman tertentu) dengan porositas “yang seharusnya pada kedalaman tersebut” yang diberikan oleh hubungan-hubungan umum. Perbandingan ini dapat dipakai sebagai indikator apakah memang re-analisis log diperlukan, atau jika memang hasil analisis log telah diyakini tingkat akurasinya, tetapi tetap berbeda secara menyolok dengan yang dihasilkan dari hubungan umum, maka perbandingan ini dapat dipakai untuk membantu dalam menentukan faktor-faktor apa yang menyebabkan “anomali” tersebut. Relevansi langsung dari diketahuinya penyebab “anomali” tersebut adalah disesuaikannya metode-metode perhitungan dan pengembangan pada tahap-tahap selanjutnya setelah tahap evaluasi formasi.

Pertanyaan yang sering muncul adalah, apakah sudah cukupkah pengetahuan lokal yang ada? Terutama pada tahap *discovery*, *delineasi*, dan *appraisal*. Pertanyaan lain adalah apakah hubungan-hubungan umum yang ada dapat dipakai sesuai kebutuhan? Atau apakah hubungan umum yang diturunkan dengan menggunakan data-data dari region lain dapat digunakan untuk keperluan kita? Tulisan ini diharapkan paling sedikit dapat menjawab sebagian pertanyaan-pertanyaan di atas.

II. HUBUNGAN POROSITAS VS. KEDALAMAN

Pasir yang baru saja diendapkan umumnya akan bersifat sangat berpori (porous) dengan porositas umumnya di atas 40%. Pasir dan batupasir yang telah terkubur umumnya memiliki porositas yang lebih rendah. Pada dasarnya porositas direduksi oleh dua faktor independen yaitu kompaksi dan sementasi. Kompaksi ditandai dengan berkurangnya baik volume pori maupun volume bulk sedangkan sementasi ditandai dengan berkurangnya volume pori tepi dengan volume bulk tetap. Dengan beberapa pengecualian kompaksi menjadi faktor yang dominan pada tahap-tahap awal proses sedimentasi dan penimbunan (*burrial*) sedangkan sementasi akan menjadi faktor yang semakin dominan dengan bertambahnya dalamnya dan lamanya penimbunan.

Dominasi relatif terhadap satu sama lain dari kedua faktor ini bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Misalnya, tingkat sementasi dari batuan bisa bervariasi secara menyolok meskipun berada di formasi, tingkat kedalaman, dan wilayah geografis yang sama. Sebagai contoh adalah apa yang ditunjukkan oleh Ramm dkk (1997) pada Central Graben di laut Utara di mana batupasir (Jura Atas) pada kedalaman yang kurang lebih sama (± 4000 m) memperlihatkan variasi tingkat sementasi yang kompleks sehingga menghasilkan variasi porositas yang tinggi secara lateral.

Variasi dalam dominasi di antara kedua faktor ini dapat juga dilihat dari potensinya dalam membuat acak (*scatter*) pada hubungan porositas vs. Kedalaman. Untuk suatu wilayah geografis dan kelompok batuan tertentu maka dapat dikatakan bahwa faktor kompaksi yang terutama melakukan reduksi (reduksi primer) dan faktor sementasi yang mereduksi porositas lebih jauh (reduksi sekunder). Dengan demikian dapat dikatakan bahwa untuk suatu tingkat kedalaman tertentu maka percontoh batuan dengan porositas tertinggi mengindikasikan dominasi faktor kompaksi dan tingkat sementasi yang minimum. Sebaliknya percontoh yang memiliki porositas terendah mengindikasikan tingginya pengaruh sementasi. Dengan asumsi seperti demikian maka dapat dikatakan bahwa tingginya tingkat acak pada hubungan porositas vs. kedalaman menunjukkan variasi dan intensitas sementasi.

Usaha untuk mendapatkan hubungan porositas vs. kedalaman sudah dilakukan sejak dahulu. Seperti

yang dikemukakan oleh Gluyas dan Cade (1997), ada dua pendekatan yang dilakukan yaitu 1) melalui percobaan di laboratorium dan 2) menggunakan data lapangan. Vesic dan Clough (1968) mempublikasikan hasil percobaan mereka di laboratorium yang merupakan uji kompresi atas beberapa percontoh batupasir berbutir sedang. Percobaan yang memakai tekanan hingga 30 MPa (setara dengan 1400 m kedalaman) dan dengan tekanan pori dijaga tidak melebihi tekanan hidrostatis ini menghasilkan kesimpulan bahwa hubungan antara porositas dan stres adalah linier sifatnya. Kesimpulan ini diperkuat oleh Atkinson dan Bransby (1978) yang menunjukkan bahwa hal itu memang terjadi selama tidak terjadi atau adanya interval-interval *overpressure*.

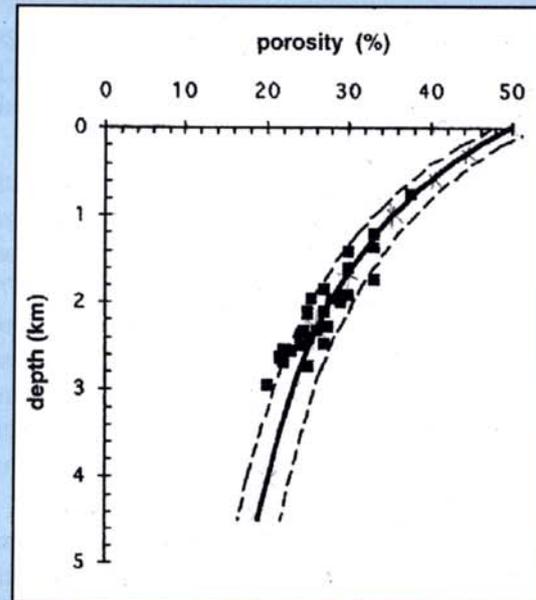
Pendapat lain diajukan, bahkan lebih awal, oleh Fuchtbauer (1967) yang pada dasarnya adalah selain kompaksi ada juga mekanisme yang disebut *pressure dissolution*. Mekanisme yang terjadi pada titik-titik kontak antar butiran ini dan pada stres tinggi (ekivalen dengan kedalaman di atas 1000 m) pada dasarnya adalah "pelunakan" yang terjadi karena lingkungan bertekanan tinggi. "Pelunakan" ini merupakan kombinasi antara proses mekanis dan kimiawi. Peneliti lain, Kurkjy (1988), Gluyas dan Cade (1997) Seperti dikutip dalam menunjukkan bahwa batupasir yang mengandung banyak material duktil (mis: lempung, batulempung, dan butiran glaukonit) akan mengalami reduksi porositas yang lebih besar karena sifat plastis material tersebut di bawah stres sehingga dengan mudah akan mengisi rongga pori.

Dengan menggunakan data-data yang dihasilkan oleh Vesic dan Clough (1968) dan Atkinson dan Bransby (1978), Gluyas dan Cade (1997) menarik suatu hubungan matematis antara porositas (ϕ) dan kedalaman (D):

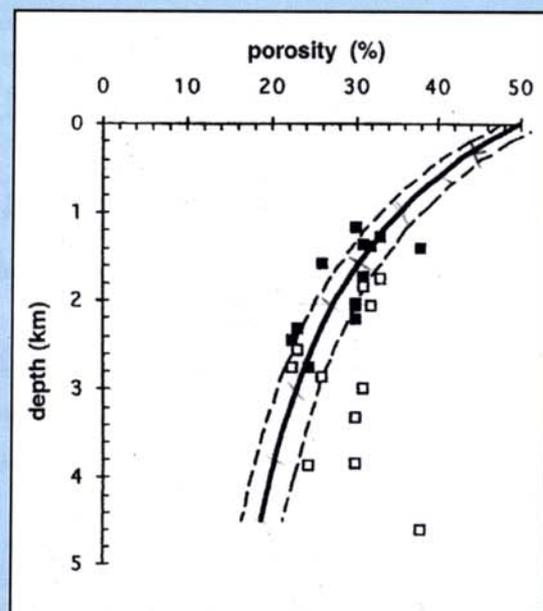
$$\phi = 50 \exp\left(\frac{-10^{-3} D}{2,4 + 5 \times 10^{-4} D}\right) \quad (1)$$

dengan porositas dalam persen dan kedalaman dalam meter.

Secara grafis Gambar 1 menunjukkan kurva yang dihasilkan dari Persamaan (1) dengan data-data porositas dari berbagai lokasi (sebagian besar dari reservoir-reservoir di laut Utara) sebagai penguji validitas hubungan. Dengan sengaja memilih percontoh-percontoh dengan tingkat sementasi terbatas dapat dilihat kecocokan antara model dan data sebenarnya. Seperti yang disimpulkan oleh Vesic



Gambar 1
Hubungan porositas – kedalaman usulan Gluyas dan Cade (1997). Data pengamatan yang dipakai umumnya berasal dari laut Utara



Gambar 2
Hubungan porositas – kedalaman usulan Gluyas dan Cade (1997) setelah dilakukan konversi dari kedalaman menjadi kedalaman efektif akibat adanya *overpressure*

dan Clough (1968) data-data tersebut menunjukkan hubungan linier antara porositas dan kedalaman, tetapi juga perlu ditekankan bahwa data-data tersebut juga cocok dengan hubungan non-linier Persamaan (1). Hal ini sesuai dengan kelakuan pasir tidak kompak yang mengalami kompaksi.

Di samping dengan menggunakan data eksperimen di laboratorium, pencarian hubungan porositas – kedalaman dapat juga diperoleh dengan menggunakan data lapangan. Gluyas dan Cade (1997) menyatakan bahwa untuk batupasir yang terkubur dengan mengandung *overpressure* maka porositas yang tinggi masih akan dapat ditemui. Hal ini disebabkan sebagian dari stres yang ditanggung oleh butiran batuan dinetralkan oleh tekanan pori yang tinggi.

Batupasir yang mengalami *overpressure* akan memiliki stres efektif yang sama dengan batupasir lain yang hanya mengalami tekanan hidrostatis saja, tetapi pada kedalaman yang lebih dangkal. Besar perbedaan kedalaman tersebut proporsional dengan besar dari *overpressure*. Konsep efektif stres dan kedalaman penimbunan efektif ini dapat dipakai untuk mengkoreksi hubungan porositas – kedalaman manapun yang diturunkan berdasarkan keadaan normal hidrostatis, termasuk Persamaan (1). Menurut Gluyas dan Cade (1997) kedalaman penimbunan efektif bagi sebuah batupasir yang mengalami *overpressure* dapat diperkirakan dengan menggunakan

$$D = D - \left(\frac{u}{(\rho_r - \rho_w)g(1 - \phi)} \right) \quad (2)$$

dengan D' = kedalaman efektif, ρ_r = densitas kolom batuan (kg/m^3 , bisa digunakan 2650 – 2700), ρ_w = densitas air formasi (kg/m^3 , bisa digunakan 1050), g = gaya gravitasi (m/s^2 , 9,8), ϕ = porositas (dalam fraksi, bisa digunakan 0,2), dan u = *overpressure* (dalam MPa).

Menurut Gluyas dan Cade (1997), dengan menggunakan harga-harga di atas Persamaan (2) bekerja baik sekali untuk kedalaman antara 2000 sampai 4000 m untuk rasio batupasir – lempung 15 : 85 sampai 25 : 75. Untuk kedalaman dangkal dan rasio batupasir – lempung yang tidak lazim maka porositas rata-rata harus dihitung agar sesuai, Persamaan (2) dapat disederhanakan dengan

mengkonversikan setiap 1 MPa *overpressure* menjadi diferensial (delta) kedalaman efektif. Dengan menggunakan harga-harga di atas maka 1 MPa ekuivalen dengan kedalaman yang berkurang sebanyak 80 m. Jadi Persamaan (2) dapat menjadi

$$D = D - 80w \quad (3)$$

dan dapat dipakai secara mudah sekali untuk menggantikan D pada Persamaan (1) – misalnya – dengan D' . Gambar 2 menyajikan hasil konversi ke kedalaman efektif lengkap dengan percontoh-percontoh yang berasal dari reservoir-reservoir yang *overpressure*.

III. PENGUJIAN DENGAN DATA INDONESIA

Untuk menguji apakah hubungan yang diusulkan oleh Gluyas dan Cade (1997) dapat dipakai untuk kasus Indonesia dipakai 157 buah percontoh batuan reservoir yang berasal dari berbagai lapangan migas di Indonesia. Percontoh-percontoh tersebut berasal dari 15 lapangan yang berasal dari 6 cekungan di Indonesia Barat dan Tengah (Natuna, Sumatera Utara, Sumatera Tengah, Sumatera Selatan, Jawa Barat Laut, dan Tarakan). Secara spesifik tidak dilakukan penelitian apakah reservoir-reservoir asal dari percontoh-percontoh yang dipakai mengalami *overpressure* atau tidak. Tetapi berdasarkan pengalaman jarang sekali reservoir-reservoir di Indonesia mengalami *overpressure* kecuali reservoir-reservoir gas yang percontohnya tidak dipakai di sini.

Hasil dari plot data percontoh (Gambar 3) menunjukkan bahwa secara umum tidak ada kecocokan yang baik antara Persamaan (2) dan data porositas dari percontoh. Data dari percontoh cenderung untuk lebih kecil dari yang dihasilkan oleh Persamaan (2) kecuali untuk kedalaman dangkal. Beberapa hal yang dapat dipelajari dari plot tersebut, antara lain

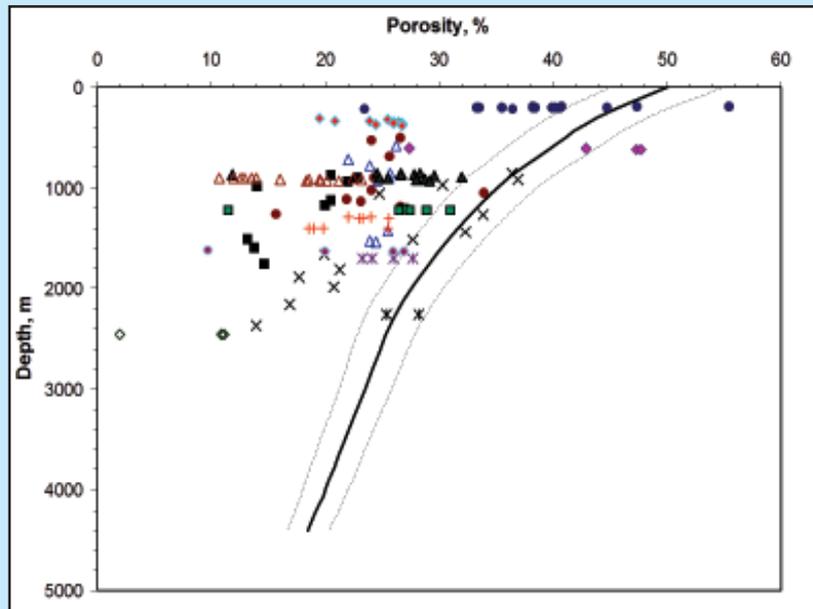
1. Pada kedalaman dangkal (< 600 m) data porositas dari percontoh menunjukkan kecocokan yang relatif baik. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kedalaman tersebut faktor yang dominan dalam mereduksi porositas adalah kompaksi. Memang ada acak data, tapi hal itu diperkirakan karena ketidakkonsistenan pengukuran yang lazim terjadi pada batuan tidak kompak.
2. Untuk kedalaman di atas 600 m plot memperlihatkan kecenderungan porositas dari

percontoh lebih kecil dari kurva porositas vs. kedalaman. Hal ini diperkirakan sebagai indikator mulai berperannya sementasi sebagai faktor yang mereduksi porositas. Semakin dalam semakin jauh perbedaannya.

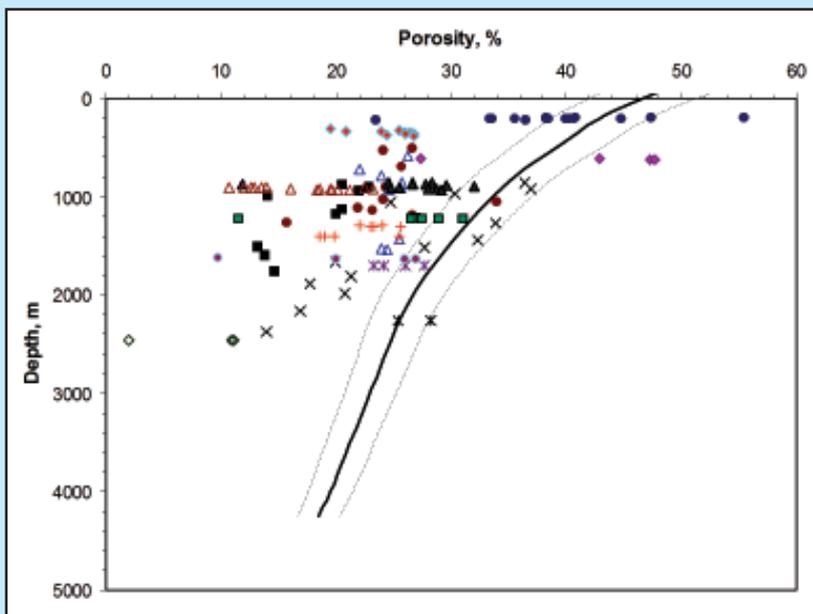
3. Keacakan data menunjukkan bervariasinya tingkat sementasi secara umum dari percontoh-percontoh yang dipakai pada studi ini. Hal ini mengindikasikan juga tingginya tingkat heterogenitas batuan-batuan reservoir di Indonesia.

Ketidakcocokan ini mengharuskan untuk mencoba digunakannya Persamaan (2) (dan juga (3)) demi untuk mendapatkan kecocokan yang lebih baik. Dengan menggunakan *overpressure* 2 MPa dan 5 MPa diperoleh kurva hubungan yang tergeser ke arah kiri. Gambar 4 dan 5 masing-masing menyajikan hasil untuk kedua *overpressure* itu. Hasil dari kedua plot menunjukkan bahwa hubungan porositas – kedalaman yang diusulkan oleh Gluyas dan Cade (1997) tidak dapat diterapkan untuk kasus di Indonesia.

Hal lain yang juga cukup penting dari studi ini adalah data-data percontoh yang digunakan menunjukkan kecenderungan (trend) yang cukup jelas meskipun keacakannya cukup tinggi tingkatannya. Kecenderungan yang diperlihatkan pada prinsipnya sama dengan yang diusulkan oleh Persamaan (2)



Gambar 3
Pengujian atas hubungan porositas – kedalaman usulan Gluyas dan Cade (1997). Data pengamatan yang dipakai berasal dari 15 lapangan/reservoir batupasir di Indonesia



Gambar 4
Pengujian atas hubungan porositas – kedalaman usulan Gluyas dan Cade (1997) dengan memasukkan efek *overpressure* (2 MPa *overpressure*)

dan (3), yaitu porositas mengecil dengan kedalaman dan hubungannya tidak linier, tetapi berbeda sekali dari segi besarnya. Jika ditarik suatu kurva yang dapat mewakili data-data tersebut maka akan terlihat dengan jelas ketidaklinierannya (Gambar 6).

Dari plot pada Gambar (6) diperoleh suatu kurva yang dianggap mewakili populasi data yaitu

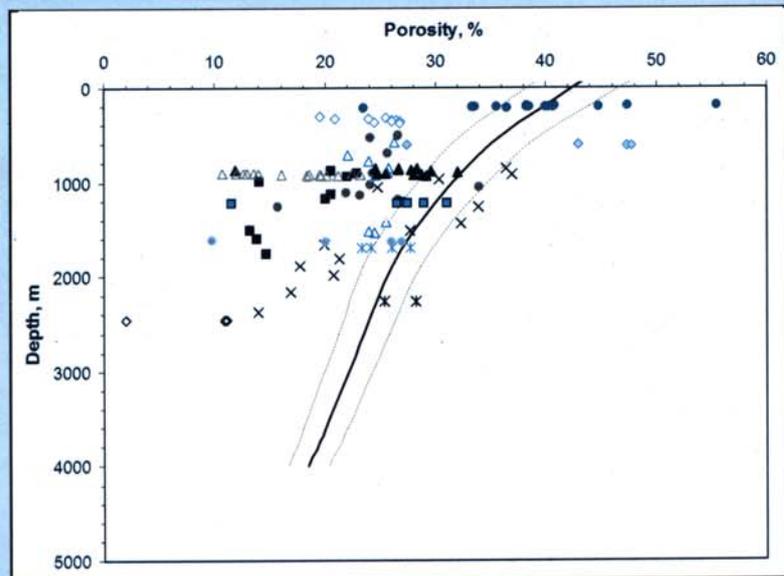
$$D = -1539,8 \ln(\phi) + 5925,3 \quad (4)$$

Dengan diperolehnya suatu hubungan matematis antara porositas dan kedalaman ini maka dapat dianggap bahwa telah diperoleh suatu hubungan yang dapat dipakai untuk kasus-kasus di Indonesia, paling tidak di Indonesia bagian Barat. Tentu saja hubungan ini masih perlu untuk lebih lanjut diuji dan diperbaiki dengan ditambahkan data-data baru dari lapangan-lapangan lain. Pengujian juga perlu diperluas sehingga mencakup batuan reservoir karbonat yang jumlahnya cukup besar di Indonesia.

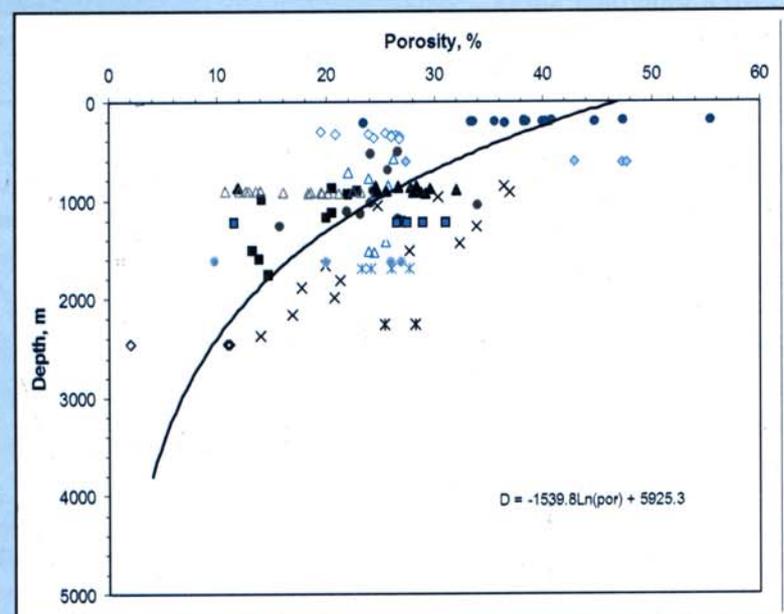
IV. KESIMPULAN

Dari situasi ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

1. Hubungan yang diperoleh dari data yang berasal dari tempat lain tidak dapat digunakan untuk kasus-kasus di Indonesia.
2. Pada kedalaman dangkal (< 600 m) mekanisme dominan dalam mereduksi porositas adalah kompaksi. Hal ini juga berlaku untuk batuan-batuan di Indonesia.
3. Pada kedalaman dalam (> 1000 m) mekanisme semestasi makin menunjukkan



Gambar 5
Pengujian atas hubungan porositas – kedalaman usulan Gluyas dan Cade (1997) dengan memasukkan efek *overpressure* (5 MPa *overpressure*)



Gambar 6
Hubungan porositas – kedalaman untuk percontoh-percontoh dari 15 reservoir batupasir di kawasan Indonesia Barat

pengaruhnya. Hal ini terlihat dari tingginya tingkat acak yang diperlihatkan.

4. Batupasir di Indonesia bersifat sangat heterogen. Hal ini sesuai dengan kenyataan bahwa keadaan geologi di Indonesia sangat kompleks.
5. Sebuah hubungan porositas – kedalaman yang dapat dianggap mewakili batupasir di Indonesia, paling tidak Indonesia bagian Barat, telah diperoleh dan ditawarkan untuk dipakai.

KEPUSTAKAAN

1. Atkinson, J.H. dan Bransby, P.L. (1978), *The Mechanics of Soil: An Introduction To Critical Soil Mechanics*. London, McGraw Hill, 375p.
2. Gluyas, J. dan Cade, C.A. (1997), *Prediction of Porosity In Compacted Sands*. In “Reservoir Quality Prediction in Sandstones and Carbonates” (eds: Kupez, J.A., Gluyas, J.G., dan Bloch, S.), AAPG Memoir 69, AAPG Publisher, Tulsa – Oklahoma, USA 74101.
3. Ramm, M., Forsberg, A.W., dan Jahren, J. (1997), *Porosity Depth Trends in Deeply Burried Upper Jurassic Reservoirs in The Norwegian Central Graben: An Example of Porosity Preservation Beneath The Normal Economic Basement By Grain-coating Micro-quartz*. In “Reservoir Quality Prediction in Sandstones and Carbonates” (eds: Kupez, J.A., Gluyas, J.G., dan Bloch, S.), AAPG Memoir 69, AAPG Publisher, Tulsa – Oklahoma, USA 74101.
4. Vesic, A.S. dan Clough, G.W. (1968), *Behaviour of Granular Material Under High Stresses*. Journal of Soil Mechanics Foundation Division, v. 94, p. 661 – 688.
5. Kurkcy, K.A. (1988), *Experimental Compaction Studies of Lithic Sands*; M.S. Thesis, Rosenteil School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, 101p.
6. Fuchtbaver, H. (1967), *Influence of Different Types of Diagenesis on Sandstone Porosity*, in W.Ruhl, ed., *Proceedings of the 7th World Petroleum Congress, Mexico City, Vol. 2, P : 353-367*.