



Kajian Singkat atas Syarat Kenonkonduktifan Matriks Batuan dalam Model Saturasi Air Archie

Oleh:

Heru Atmoko, Bambang Widarsono, dan Rosidelly

SARI

Seerti diketahui secara umum model estimasi saturasi air Archie dibangun dengan anggapan dasar bahwa model tersebut hanya valid pada batupasir yang bebas dari mineral konduktif apa pun. Ketidakpastian dalam pemilihan model saturasi air yang tepat menjadikan bahwa anggapan tersebut harus dikaji kembali dengan pengujian langsung di laboratorium.

Tulisan ini menyajikan hasil dari pengukuran sifat kelistrikan dari dua buah percontoh batupasir sintetik berkeandungan lempung kaolinit 10% dan 25% dari volume matriks. Penerapan model Archie dan Waxman & Smits memperlihatkan adanya korelasi yang baik antara saturasi air terestimasi dan data saturasi air yang teramati langsung. Bukti ini memperlihatkan bahwa syarat kenonkonduktifan matriks bagi model Archie tidak perlu diterapkan secara ketat.

Dengan demikian telah dibuktikan bahwa model Archie dapat diterapkan untuk batupasir berkeandungan mineral konduktif/semi-konduktif sampai pada tingkat yang dapat diterima.

ABSTRACT

As commonly acknowledged, the Archie water saturation model is considered valid for rocks with totally non-conductive frame or matrix, free from any conductive mineral(s). The common absence of this ideal condition has led to the modifications of Archie model into numerous models, which in turn have raised uncertainties in their choosing and applying. These uncertainties have drawn our attention back to Archie model through a reinvestigation over the model's assumption of matrix non-conductivity. This paper presents electrical properties measurement results for two synthetic sandstone plugs with kaolinite contents of 10% and 25%. Applications of Archie clean-sand model and Waxman & Smits shaly-sand model have shown good agreements between estimated and observed-water saturation values. This proof suggests that the Archie's non-conductivity assumption should not be held strictly, and the Archie model can be used, to some extent, for rocks with conductive/semi-conductive mineral contents.

I. PENDAHULUAN

Saturasi air merupakan salah satu parameter petrofisik penting dalam estimasi cadangan hidrokarbon. Dalam analisis log sumuran, model Archie umum digunakan untuk memperkirakan saturasi air pada kasus batuan sedimen yang bebas dari kandungan mineral yang bersifat konduktif listrik seperti mineral lempung. Hal tersebut sesuai dengan asumsi yang dipakai bagi validitas model tersebut yaitu konduktivitas suatu batuan ditentukan oleh cairan elektrolit (air formasi) yang selalu terkandung di dalam pori-porinya.

Dengan hadirnya mineral konduktif atau semi-konduktif pada matriks batuan maka model Archie dapat dianggap tidak valid dan akan menghasilkan perkiraan saturasi air yang terlalu tinggi. Untuk mengantisipasi hal itulah sampai saat ini, untuk kasus kehadiran lempung saja, telah dibangun lebih dari 40 model saturasi air (Dresser Atlas, 1982) yang umumnya tetap belum dapat dianggap sebagai berlaku secara umum.

Anggapan mengenai keterbatasan model Archie ini mendorong untuk diadakannya suatu telaahan mengenai sejauh mana validitasnya dapat

dipertahankan. Untuk mendukung hal tersebut maka dilakukan kegiatan pengukuran resistivitas di laboratorium atas batuan pasir sintetik berkeandungan mineral lempung kaolinit dengan berbagai harga saturasi air. Lempung kaolinit ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) dipilih karena tidak memiliki konduktivitas yang tinggi (dibandingkan dengan lempung monmorilonit $((\text{Ca},\text{Na})_7(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_4(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_n)$), misalnya, sehingga jika mempengaruhi resistivitas total maka pengaruhnya tidak akan terlalu besar. Hal ini sesuai dengan tujuan utama dari studi ini yaitu



untuk menguji asumsi dasar model Archie yang menyatakan bahwa matriks batuan harus bersifat non-konduktif total.

Hasil pengukuran kemudian akan dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan model-model Archie dan Waxman & Smits untuk mengetahui bisa tidaknya model saturasi air Archie dipakai untuk kasus dimana asumsi non-konduktivitas matriks batuan tidak terpenuhi.

II. KAJIAN SINGKAT TEORITIS

A. Resistivitas komponen batuan

Resistivitas listrik batuan adalah fungsi dari beberapa variabel termasuk, resistivitas saturasi fluida, resistivitas fluida pori, komponen mineral batuan, struktur pori, dan porositas. Dua variabel yang terakhir sering disajikan dalam bentuk faktor formasi (F). Untuk batuan bebas mineral konduktif, resistivitas komponen batuan umumnya dianggap tak terhingga (tinggi) sehingga resistivitas listrik adalah fungsi dari resistivitas fluida pori, saturasi fluida dan faktor formasi. Sedangkan pada kasus batuan yang mengandung mineral konduktif maka komponen resistivitas batuanya menjadi tidak dapat dianggap tak terhingga, seperti halnya pada batuan ber kandungan lempung yang jelas memiliki konduktivitas (mis. Winsauer & Cardell, 1953)

Komponen batuan reservoir migas dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok dalam kaitannya terhadap resistivitas listrik. Kelompok yang pertama adalah komponen non-konduktif. Contoh dari kelompok ini adalah komponen pembentuk utama dari batuan reservoir yang seringkali adalah terdiri dari kuarsa, feldspar, dan karbonat. Menurut Olhoeft (1981) dan Dortman (1976), yang dikutip dari Schon (1996), resistivitas listrik spesifik dari kuarsa dan feldspar masing-masing adalah 2×10^{14} ohm-m dan $10^{11} - 10^{12}$ ohm-m. Kelompok

yang kedua adalah semua komponen yang mempunyai kemampuan menghantarkan listrik merupakan salah satu mineral konduktif yang sering terdapat pada batupasir. Mineral-mineral lempung basah adalah contohnya.

B. Sifat kelistrikan mineral lempung

Mineral lempung merupakan partikel-partikel kristal sedimen yang sangat kecil dengan ukuran butiran lebih kecil dari $1/256$ mm. Mineral aluminium silikat ini, dengan struktur kristalnya yang *platy*, juga dapat terasosiasi dengan magnesium atau besi yang untuk jenis tertentu (misalnya monmorilonit) dapat mendominasi mineral tersebut.

Meskipun mengandung elemen-elemen logam, konduktivitas listrik mineral lempung basah umumnya dianggap sebagai ditimbulkan oleh adanya air ikat (*bound water*) dan adanya kapasitas pertukaran kation (*cation exchange capacity* - CEC) dari permukaan kristal lempung. Pada saat pembentukan mineral lempung melalui proses pelapukan, muatan positif (kation) terserap oleh permukaan lempung. Kation-kation tersebut (misalnya Ca, Mg, H, K, Na) terikat secara longgar kepada permukaan kristal sehingga dapat mengalami pertukaran secara leluasa dengan kation-kation lain jika lempung tersebut mengalami kontak dengan air. Disebabkan oleh hal tersebutlah maka kation-kation tersebut disebut kation yang dapat dipertukarkan, dan properti CEC sendiri adalah suatu ukuran yang menunjukkan jumlah ion yang dibutuhkan untuk menetralkan muatan suatu partikel lempung secara keseluruhan (Waxman dan Smits, 1968). Secara praktis, hal tersebut diwujudkan dengan berat dari ion-ion dalam satuan miliekuivalen yang terserap untuk setiap 100 gram lempung. Masing-masing jenis lempung cenderung memiliki CEC yang

berbeda satu sama lain. Lihat Schon (1996) untuk harga-harga CEC bagi mineral-mineral lempung yang umum ditemui di reservoir migas.

Dalam praktek pengkorekasian pengaruh konduktivitas lempung, secara umum ada dua pendekatan yang dapat dipakai untuk memperkirakan resistivitas listrik dari mineral lempung di dalam batu pasir. Pertama melalui perhitungan volume lempung dari percontohan atau data log dan yang kedua dari evaluasi aktivitas listrik mineral lempung yang berkaitan dengan pengukuran CEC di laboratorium.

C. Faktor formasi dan kehadiran lempung

Faktor formasi (F) pertama kali dikemukakan oleh Archie (1942) dan didefinisikan sebagai perbandingan antara konduktivitas air formasi terhadap konduktivitas batuan yang tersaturasi penuh

$$F = \frac{C_w}{C_o} = \frac{R_o}{R_w} \quad (1)$$

di mana C_w adalah konduktivitas air formasi dan C_o adalah konduktivitas batuan yang tersaturasi penuh, sedangkan R_w dan R_o adalah hal yang sama dalam bentuk resistivitas.

Untuk batu pasir bebas lempung F adalah suatu variabel yang ditentukan oleh porositas dan geometri pori, dan dapat dituliskan sebagai:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (2)$$

di mana a adalah faktor tortuositas, m adalah faktor sementasi dan ϕ adalah porositas total. Pada batupasir mengandung lempung F tidak konstan dan cenderung menurun dengan naiknya kandungan lempung.

D. Saturasi air (S_w) dan kehadiran lempung

Untuk batupasir bersih, konduktivitas dari batuan yang tersaturasi penuh menurut persamaan Archie

adalah :

$$C_o = \frac{C_w}{F} \quad (3)$$

Dengan hadirnya mineral lempung dalam batupasir di atas, maka model Archie menjadi tidak valid karena hadirnya konduktivitas yang berlebihan (X).

$$C_o = \frac{C_w}{F} + X \quad (4)$$

Waxman & Smits (1968) mengusulkan persamaan untuk konduktivitas batuan pasir yang mengandung lempung berdasarkan CEC (*dispersed clay model*):

$$C_t = \frac{C_w}{F^*} S_w^n + \frac{BQ_v}{F^*} S_w^{n-1} \quad (5)$$

di mana Q_v adalah konsentrasi pergantian kation (CEC) per unit volume pori batuan yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q_v = \frac{CEC * (1 - \phi_t) \rho_{ma}}{\phi_t} \quad (6)$$

di mana F^* adalah faktor formasi untuk batu pasir mengandung lempung dan B adalah konduktan dari pertukaran kation lempung sebagai fungsi dari C_w dan temperatur, dan dituliskan sebagai:

$$B = \frac{-1.28 + 0.225t - 0.0004059t^2}{1 + R_w(0.045t - 0.27)} \quad (7)$$

III. ANALISIS LABORATORIUM

Untuk membuktikan efek kehadiran lempung kaolinit kepada pemakaian model Archie, maka dilakukan pengukuran terhadap dua buah percontoh batupasir sintetik (kuarsa mendekati murni) berdiameter 1 (satu) inci yang mempunyai porositas 24.3% dan 22.5% dengan kandungan kaolinit 10% dan 25% volume matrik, yang disebut sebagai percontoh batuan kotor. Resistivitas kaolinit dan monmorilonit dalam keadaan kering

terukur masing-masing sebagai 5.170 Ohm-m dan 2.737 Ohm-m @ 25°C. (menurut Olhoeft kaolinit memiliki spesifik resistivitas listrik sebesar 3.2×10^7 Ohm-m, tidak disebutkan hal-hal yang berkaitan dengan latar belakang atau kondisi pengukurannya.

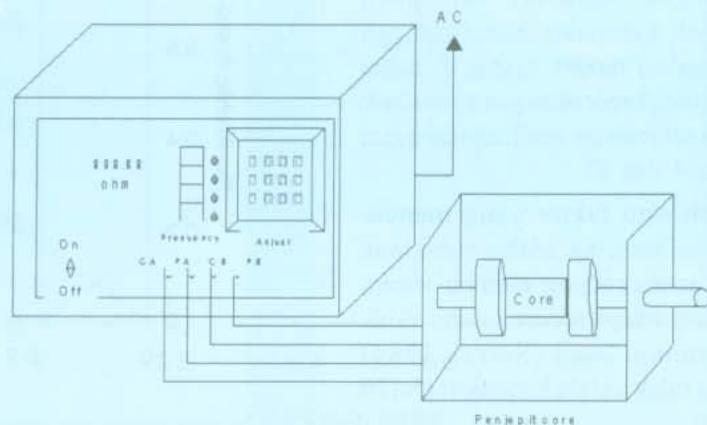
Alat pengukur tahanan listrik batuan yang digunakan dalam pengukuran (Gambar 1) adalah dari jenis yang memiliki 4 koneksi akhir (menuju percontoh) yang berfungsi untuk pengoreksian secara menerus atas *losses* yang terjadi selama pengukuran. Hal ini diperlukan untuk mempertahankan resolusi dan akurasi yang tinggi (5 angka). Alat tersebut menggunakan sebuah tabung *cathode-ray* untuk menampilkan hasil pengukuran, baik dalam bentuk angka maupun grafik, dan informasi lainnya dengan tajam dan bersih. Desain dari alat tersebut juga memberi fasilitas pemantauan dengan cepat harga-harga yang berubah-ubah, selang pengukuran yang dapat diperluas, dan berbagai frekuensi operasi sesuai kebutuhan. Untuk keperluan pensimulasian kondisi reservoir, peralatan dilengkapi dengan *core holder* yang dapat dihubungkan ke tabung gas nitrogen untuk keperluan tekanan

overburden efektif dan ke pemanas bagi keperluan temperatur reservoir.

Langkah pertama yang dilakukan adalah pensaturasian kedua buah percontoh batuan tersebut dengan mempergunakan *brine* (air formasi buatan) dengan konsentrasi garam sebesar 10.000 ppm NaCl yang setara dengan $R_w = 0,585$ Ohm-m @ 25°C. Pengukuran resistivitas dilakukan setelah percontoh telah tersaturasi 100%.

Langkah kedua adalah penurunan saturasi dengan menggunakan alat *porous plate*. Penurunan harga saturasi air pada percontoh, yang pada dasarnya adalah penginjeksiar secara perlahan, secara gradual dan bertahap sampai didapat harga saturasi *irreducible* (S_{witr}). Pengukuran resistivitas dilakukan pada setiap harga hasil penurunan saturasi air tersebut.

Langkah ketiga adalah dilakukan perhitungan saturasi air dengan menggunakan persamaan model batupasir kotor dari Waxman & Smits. Untuk perhitungan dipakai data $a=0,62$, $m=2$, $n=2$, dan $CEC = 4,79$ meq/100g. Harga CEC yang dipakai merupakan hasil modifikasi minor dari data terukur yang dimiliki.



Gambar 1
Alat resistivity meter



Saturasi air hasil perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan saturasi air hasil pengukuran laboratorium (Gambar 2 dan 3).

Langkah keempat atau terakhir adalah perhitungan dengan menggunakan model batupasir bersih Archie dengan memakai data dan pendekatan yang sama dengan pada penggunaan model Waxman & Smits. Hasil perbandingan saturasi air disajikan pada Gambar 4 dan 5.

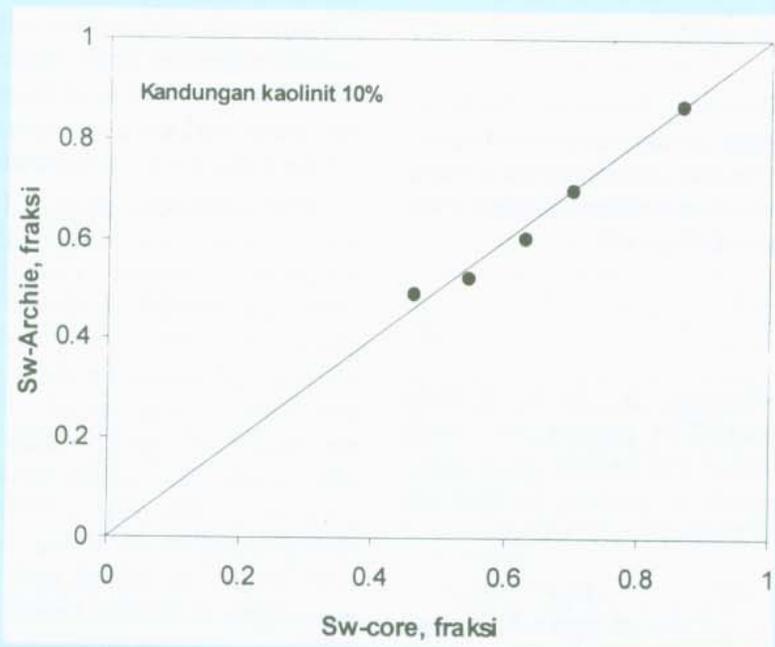
IV. PEMBAHASAN

Perbandingan antara saturasi air hasil perhitungan dengan model Waxman & Smits dan saturasi air hasil pengamatan di laboratorium, seperti terlihat pada Gambar 2 dan 3 untuk kandungan kaolinit masing-masing 10% dan 25%, memperlihatkan kecocokan yang baik. Dengan sedikit modifikasi atas harga CEC yang dimiliki maka model Waxman & Smits dapat bekerja dengan baik pada batuan yang terkotori oleh mineral lempung. Hal ini sesuai dengan peruntukan model tersebut yang memang dimaksudkan untuk distribusi lempung yang menyebar (*dispersed*), keadaan yang sesuai berkaitan dengan penyebaran kaolinit pada kedua perconton.

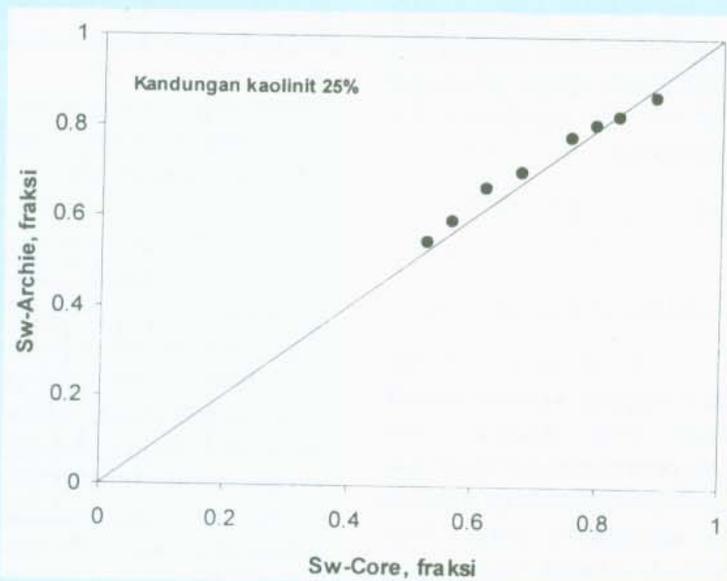
Hal yang menarik adalah pada hasil perhitungan saturasi air pada perconton batupasir kotor dengan menggunakan model Archie di mana didapat suatu kecocokan yang juga baik terhadap saturasi air hasil laboratorium (Gambar 4 dan 5).

Salah satu faktor yang menyebabkan hal tersebut adalah meskipun kaolinit mengandung elemen logam aluminium tetapi secara umum tidak mengandung besi (Serra, 1984) sehingga tidak terlalu konduktif (5.170 ohm-m).

Faktor lain adalah berkaitan dengan properti CEC lempung kaolinit. Dalam keadaan basah seperti yang terjadi saat pengukuran laboratorium faktor CEC akan membuat resistivitas kaolinit



Gambar 2
 Perbandingan saturasi air core (teramati)
 dengan saturasi air Archie

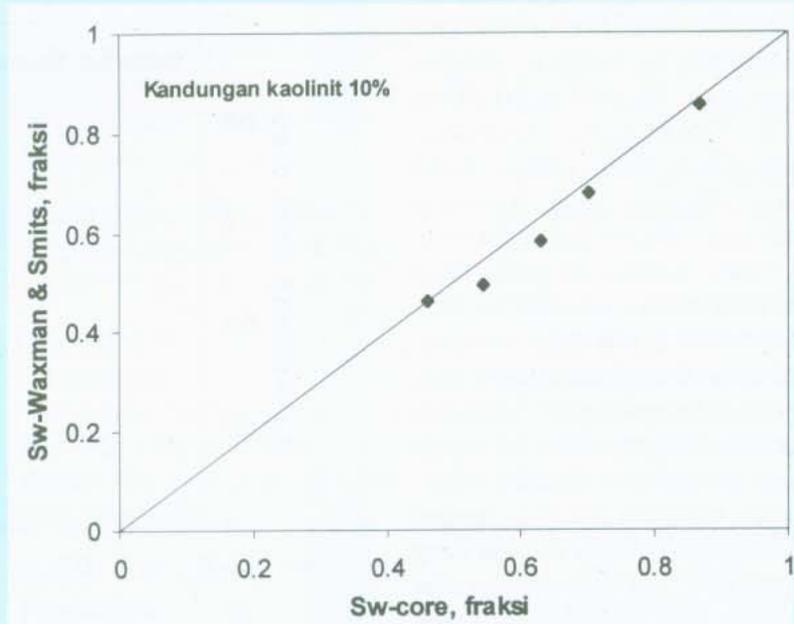


Gambar 3
 Perbandingan saturasi air core (teramati)
 dengan saturasi air Archie

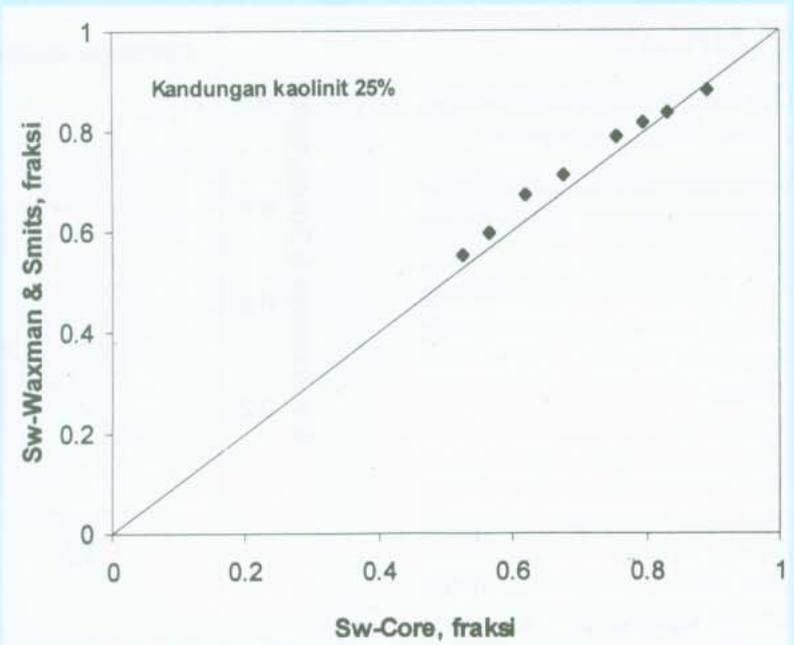


menjadi lebih rendah lagi. Pada keadaan ini resistivitas kaolinit, terukur sebagai 0,676 Ohm-m @ 25°C, menjadi jauh lebih rendah daripada resistivitas kuarsa yang 2×10^{14} Ohm-m (Olhoeft, 1981). Harga resistivitas kaolinit tersebut juga jauh lebih rendah daripada harga terukur dari beberapa percontoh batupasir sintetik, yang juga dipakai dalam studi ini, yaitu pada kisaran $0,7 - 1,7 \times 10^4$ Ohm-m @ 25°C. Sekedar pembandingan adalah sebuah studi terdahulu dengan menggunakan bubuk besi (maximum 10% volume matriks) yang pernah dilakukan oleh Widarsono dkk (2000). Dengan mengasumsikan resistivitas bubuk besi sebagai resistivitas pirit yang antara 10^{-4} dan 10^{-1} Ohm-m (Olhoeft, 1981) terbukti bahwa resistivitas percontoh yang terukur menjadi begitu rendahnya sehingga model Archie menjadi benar-benar tidak valid. Dalam keadaan ini langkah-langkah koreksi harus dilakukan dengan sesuai (mis: Widarsono, 1999). Meskipun resistivitas kaolinit dalam keadaan basah memang tidak akan serendah resistivitas metalik bubuk besi tetapi kandungan 25% volume matriks (pada perconto #2) selayaknya memiliki pengaruh yang berarti terhadap resistivitas batuan.

Dengan bukti korelasi yang baik antara model saturasi air Waxman & Smits dan model saturasi air Archie, seperti yang tersaji pada Gambar 6 dan 7, maka dapat kembali disarankan dengan adanya tambahan bukti, bahwa model Archie tetap dapat digunakan pada kasus kehadiran kaolinit sebagai satu-satunya lempung yang hadir pada batuan reservoir. Telah terbukti bahwa dengan menggunakan persamaan Archie yang tidak rumit maka saturasi air dari batupasir yang mengandung kaolinit dapat diperkirakan dengan cukup baik. Dengan demikian, dapat dianggap bahwa persyaratan matriks batuan yang total non-konduktif bagi validitas model Archie tidak sepenuhnya



Gambar 4
Perbandingan saturasi air core (teramati)
dengan saturasi air Waxman & Smits



Gambar 5
Perbandingan saturasi air core (teramati)
dengan saturasi air Waxman & Smits



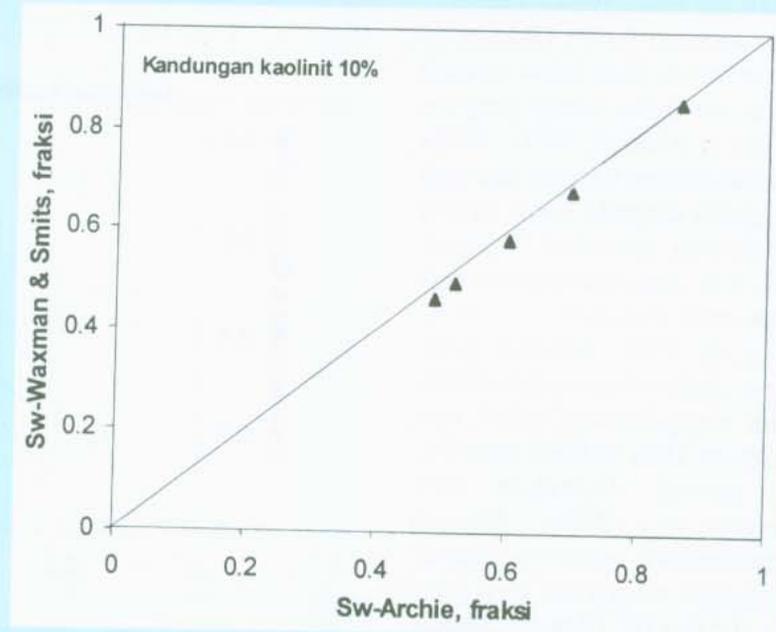
diperlukan.

Sesuatu yang mungkin merupakan konsekuensi logis dari adanya kesimpulan berkenaan dengan persyaratan kenonkonduktifitas matriks batuan adalah berkenaan dengan batasan dalam aplikasi model Archie. Batasan yang dimaksud adalah suatu tingkat kekonduktifan dari suatu matriks di mana hasil estimasi saturasi saturasi air dari model Archie masih dapat diterima. Untuk itu perlu dilakukan sebuah studi yang cukup komprehensif. Salah satu pendekatan yang dapat diambil adalah dengan pengukuran dengan menggunakan beragam mineral dengan harga resistivitas listrik spesifik yang beragam pula. Hal ini mengingat sifat kelistrikan yang berbeda-beda untuk masing-masing mineral, baik yang bersifat lempung maupun metalik. Dengan adanya daftar batasan berkenaan kuantitas yang masih dapat ditolerir untuk masing-masing mineral konduktif maka ketidakpastian yang selalu dialami oleh para penganalisis log dalam memilih model saturasi air akan dapat dikurangi.

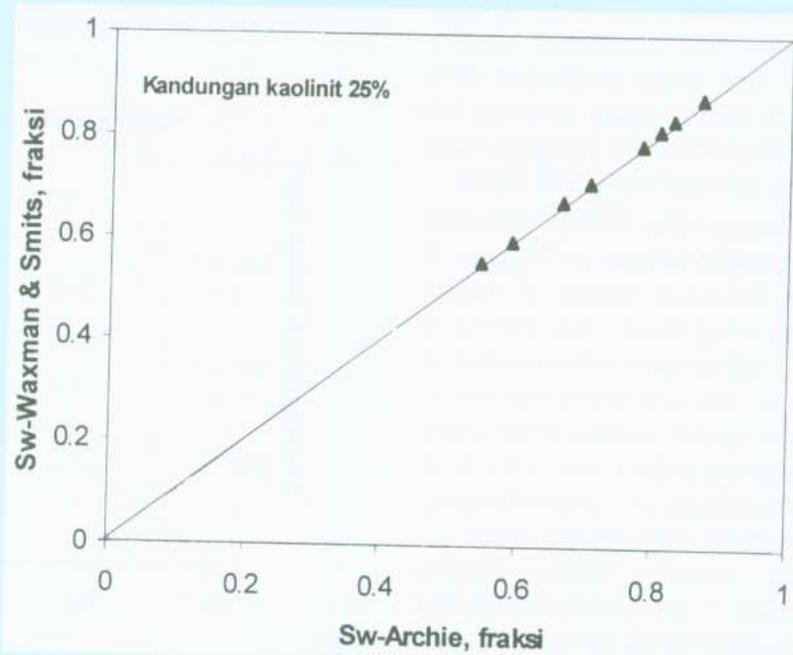
V. KESIMPULAN

Dari analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan :

1. Persyaratan validitas model Archie mengenai matriks batuan yang harus non-konduktif total tidak perlu diterapkan dengan ketat bagi batuan-batuan sedimen yang berpotensi mengandung mineral konduktif.
2. Persamaan batupasir bersih Archie dapat dipergunakan pada batupasir kotor berkaandungan lempung kaolinit dengan catatan bahwa harga spesifik resistivitas listrik mineral tersebut dan kuantitas kehadirannya .
3. Dalam analisis log sumur, pemilihan model saturasi air untuk batupasir lempungan yang cenderung meningkatkan faktor



Gambar 6
Perbandingan saturasi air Archie dengan
dengan saturasi air Waxman & Smits



Gambar 7
Perbandingan saturasi air Archie dengan
dengan saturasi air Waxman & Smits



ketidakpastian dapat dihindarkan untuk kasus-kasus kehadiran mineral konduktif sampai tingkat tertentu.

4. Perlunya diketahui mengenai batasan harga spesifik resistivitas listrik dan kuantitas yang dapat ditolerir bagi penerapan model Archie agar memudahkan dalam estimasi saturasi air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada sdr. Harry Hardiman, sdr. Fakhriyadi Saptono dan sdr. Tunggal dari Kelompok Evaluasi Formasi, PPPTMGB "LEMIGAS" untuk segala bantuannya yang berguna bagi kelancaran studi ini.

KEPUSTAKAAN

1. Archie, G.E. (1942). "The Electrical resistivity logs as an aid in determining some reservoir characteristics," *Transaction of AIME*, 146, hlm. 54-62.
2. Dewan, J. T., (1983) "Essential of Modern Open-Hole Log Interpretation," Penn Well Publishing Company, hal 231.
3. Dortman, N.B. (1976) "Fiziceskie spoitsva gornich porod I polesnich iskopamyh" Izdat, Nedra-, Moskva.
4. Dresser Atlas, (1982). "Well Logging and Interpretation Techniques" Dresser Industries Inc.
5. Olhoeft, G.R. , (1981). "Electrical properties of rocks" in: Y.S. Touloukain, W.R. Judd, and R.F. Roy (eds.) *Physical Properties of Rocks and Minerals*, McGraw Hill, New York.
6. Schon, J.H. (1996). "Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Handbook of Geophysical Exploration Seismic Exploration, vol. 18 eds: Helbig, K. and Trietel, S., Elsevier Science Ltd., Oxford OX5 1GB-UK, hlm. 387-390
7. Serra, O. (1984). *Fundamentals of Well-log Interpretation, Part 2: The Interpretation of Logging Data.* Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, hlm. 683.
8. Waxman, M.H., and Smits, L.J.M, (1968). "Evaluation of water saturation in shaly formations," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol.18, hlm. 107-122.
9. Widarsono, B. (1999) "Metoda Koreksi atas Kehadiran Mineral Konduktif pada Analisis Log Sumur" Dit. Jend. HAKI, No. Pendaftaran: P-990466 (20 Mei 1999).
10. Widarsono, B., Atmoko, H, & Hardiman, H.(2000). "Koreksi untuk Mengurangi Pengaruh Mineral Berat Konduktif pada Batuan Sedimen: Suatu Kontribusi bagi Analisis Log Sumur." *Lembaran Publikasi Lemigas*, hlm. 3-13.
11. Winsauer, W.O, and McCardell, W.M., (1953). "Ionic double-layer conductivity in reservoir rock," *Transaction of AIME*, 198, hlm. 129-134. □