

# PEMODELAN INVERSI UNTUK ESTIMASI POROSITAS DAN SATURASI AIR DATA TAHANAN JENIS DENGAN MENGGUNAKAN PERSAMAAN ARCHIE

Hadi , Frinsyah Virgo

**Abstrak:** Penelitian yang telah dilakukan ini didasari oleh adanya persamaan Archie yang menggambarkan hubungan empirik antara besaran tahanan jenis batuan dengan besaran porositas batuan dan saturasi air pengisi pori batuan tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah mengestimasi besaran porositas dan saturasi air berdasarkan dari data tahanan jenis dan parameter litologi batuan. Metode yang digunakan adalah metoda inversi dengan menggunakan persamaan Archie. Parameter litologi yang digunakan sebagai input adalah koefisien tortuositas ( $a$ ), faktor sementasi ( $m$ ) dan eksponen saturasi ( $n$ ). Pengujian model menggunakan data dan hasil yang berasal dari penelitian Harsono<sup>4</sup>. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nilai porositas ( $\phi$ ) dan saturasi air formasi ( $S_w$ ) yang didapat, cukup signifikan dan mendekati dengan hasil yang didapat oleh Harsono.

**Kata kunci :** Pemodelan inversi, metoda tahanan jenis, porositas batuan, saturasi air

**Abstract:** This research is based on Archie equation that shows the empiric relationship between rocks resistivity and rocks porosity and the water saturation within rocks pore. The problem of this research is if we only have the data of resistivity and rocks lithology parameter, could we determine the rocks porosity and water saturation of formation? So that, the objective of this research is to estimate the porosity and water saturation based on the data of resistivity and rocks lithology parameter. The method is inversion method by using Archie equation. The lithology parameter which is used as an input such: tortousity ( $a$ ), cementation factor ( $m$ ), and saturation exponent. Test of the model using the data and result of Harsono research. The result shown that the porosity and water saturation formation ( $S_w$ ) come from this research is significant and not too different compare to the result of Harsono research.

**Key word:** Inversion modeling, resistivity method, rocks porosity, water saturation.

## PENDAHULUAN

Data dalam geofisika merupakan tanggapan atau respon dari kondisi geologi yang ada di bawah permukaan bumi. Respon tersebut timbul akibat adanya variasi parameter (besaran) fisika seperti: rapat massa, suseptibilitas magnet, tahanan jenis, kecepatan gelombang, dan sebagainya yang

ada di bawah permukaan bumi. Untuk kasus khusus, adakalanya diperlukan data (informasi) besaran fisika yang lain berdasarkan pada besaran fisika tertentu yang terukur, dimana data tersebut tidak dapat diturunkan langsung dari besaran yang terukur<sup>1</sup>.

Pada metode tahanan jenis besaran yang terukur adalah distribusi tahanan jenis ( $\rho$ ) yang ada di bawah permukaan bumi. Pada penyelidikan hidrogeologi, besaran atau informasi yang diperlukan adalah porositas ( $\phi$ ) dan saturasi air ( $S_w$ ) dari formasi yang diselidiki. Berdasarkan pengukuran metode tahanan jenis, maka besaran yang diperoleh hanya tahanan jenis, sedangkan kedua besaran yang diperlukan di atas tidak dapat diturunkan langsung dari besaran tahanan jenis ini. Untuk itu diperlukan suatu metoda yang dapat mengestimasi besaran porositas dan saturasi air hanya berdasarkan data tahanan jenis. Metode yang lazim digunakan untuk pemecahan permasalahan-permasalahan seperti ini adalah dengan menggunakan metoda inversi.

Persamaan yang menggambarkan secara empiris hubungan antara tahanan jenis efektif dari formasi batuan sebagai fungsi dari porositas ( $\phi$ ), fraksi saturasi air ( $S_w$ ) dari pori yang terisi fluida dan tahanan jenis fluida pengisi pori ( $\rho_w$ ) adalah persamaan Archie<sup>2</sup>.

Dari uraian di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut : jika diketahui nilai (atau sebaran nilai) tahanan jenis dari suatu formasi batuan, maka akan dapat diperkirakan besarnya porositas dan saturasi air yang mengisi pori-pori batuan tersebut.

Untuk itu, penelitian ini bertujuan membuat suatu program pemodelan inversi untuk mengestimasi besaran porositas dan saturasi air formasi berdasarkan data tahanan

jenis dengan menggunakan persamaan Archie.

Pada tahun 1942, Archie memformulasikan secara empiris hubungan antara tahanan jenis efektif batuan sebagai fungsi dari porositas ( $\phi$ ), fraksi dari pori yang terisi fluida ( $S_w$ ), dan tahanan jenis fluida pengisi pori ( $\rho_w$ )<sup>2</sup> :

$$\rho = a\phi^{-m} s^{-n} \rho_w \quad (1)$$

dengan  $\rho$  dan  $\rho_w$  masing-masing adalah tahanan jenis batuan efektif batuan dan tahanan jenis fluida dalam pori.  $a$ ,  $m$ , dan  $n$  merupakan parameter-parameter litologi masing-masing tortuositas, faktor sementasi, dan eksponen saturasi. Tortuositas adalah koefisien yang bergantung litologi, berkisar antara 0.6 sampai 2. Faktor sementasi adalah derajat yang menggambarkan daya ikat antara matriks batuan dan pori. Sedang eksponen saturasi adalah derajat saturasi air dalam formasi. Untuk detailnya dapat dilihat pada Lampiran 3.

Jika perbandingan antara tahanan jenis efektif batuan ( $\rho$ ) dan tahanan jenis fluida dalam pori ( $\rho_w$ ) adalah merupakan faktor formasi ( $F$ ), maka selanjutnya persamaan (1) dapat dituliskan kembali sebagai :

$$F = a\phi^{-m} s^{-n} \quad (2)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan non-linier. Persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan metode estimasi nonlinier Lavenberg-Marquardt<sup>3</sup>. Prinsipnya adalah dengan menguraikan persamaan rapat massa ke dalam deret

Taylor dengan mengabaikan orde kedua dan seterusnya, sehingga diperoleh :

$$F_{\alpha} = F_i^{\theta} + \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial F_{\alpha}}{\partial b_j} \right) (d b_j) \tag{3}$$

dengan,

- b = parameter yang dicari
- b<sub>o</sub> = parameter model awal
- d = b - b<sub>o</sub>
- F<sub>θ</sub> = faktor formasi hasil observasi
- F<sup>θ</sup> = faktor formasi model awal
- j = jumlah parameter yang dicari

$\left( \frac{\partial F_{\alpha}}{\partial b_j} \right) = J$  : diferensial fungsi F<sub>θ</sub> terhadap parameter model.

Persamaan di atas menunjukkan bahwa perlu melakukan diferensial parsial terhadap F<sub>θ</sub> berbagai parameter model yang akan dicari.

Dari persamaan (2) dilakukan penurunan (diferensial) parsial sebagai berikut :

(1) Turunan (diferensial) parsial F<sub>θ</sub> terhadap porositas (φ)

$$\frac{\partial F_{\theta}}{\partial \phi} = -ma\phi^{-(m+1)}s^{-n} \tag{4}$$

(2) Turunan (diferensial) parsial F<sub>θ</sub> terhadap saturasi (s)

$$\frac{\partial F_{\theta}}{\partial s} = -na\phi^{-m}s^{-(n+1)} \tag{5}$$

Selanjutnya kedua persamaan diferensial diatas diselesaikan dalam bentuk matriks, sehingga diperoleh :

$$\begin{pmatrix} F_{\theta 11} \\ F_{\theta 21} \\ F_{\theta 31} \\ F_{\theta 41} \\ F_{\theta 51} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} F_{\theta 11}^0 \\ F_{\theta 21}^0 \\ F_{\theta 31}^0 \\ F_{\theta 41}^0 \\ F_{\theta 51}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11}^1 & J_{12}^{21} \\ J_{21}^1 & J_{22}^2 \\ J_{31}^1 & J_{32}^2 \\ J_{41}^1 & J_{42}^2 \\ J_{51}^1 & J_{52}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{21} \end{pmatrix} \tag{6}$$

Bila F = F<sub>θ</sub> - F<sup>θ</sup>, maka persamaan matriks diatas dapat ditulis menjadi :

$$F = J m \tag{7}$$

dimana m adalah parameter model yang dicari. Persamaan di atas diselesaikan metoda kuadrat terkecil, menjadi :

$$F = (J^T J + \varepsilon^2 I) m \tag{8}$$

dengan ε<sup>2</sup> adalah faktor redaman dan I adalah matriks identitas. Mengingat m adalah parameter yang akan dicari, maka persamaan di atas diinversi menjadi :

$$m = (J^T J + \varepsilon^2 I)^{-1} J^T F \tag{9}$$

Proses iterasi telah mencapai konvergensi, bila selisih antara F<sub>θ</sub> - F<sup>θ</sup> mencapai minimum. Penyelesaian akhir dari proses inversi ini adalah :

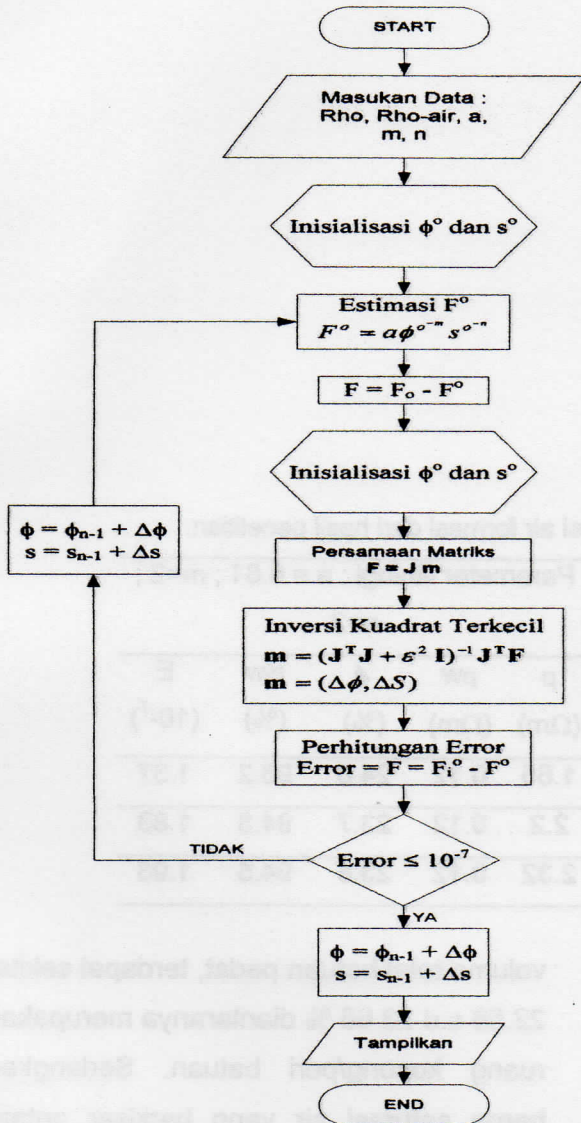
$$\phi_n = \phi_{n-1} + m_{11}^n \tag{11}$$

$$s_n = s_{n-1} + m_{21}^n \tag{12}$$

### METODE PENELITIAN

Pembuatan program inverse menggunakan perangkat lunak Matlab ver 6.0. Parameter input adalah data tahanan jenis dan outputnya berupa nilai porositas dan saturasi air formasi. Model awal yang digunakan nilai porositas adalah 30% dan saturasi air formasi adalah 100%. Pengujian program inversi dilakukan

dengan menggunakan data dan hasil yang berasal dari penelitian Harsono<sup>4</sup>. Adapun alur pemrogramannya adalah sebagai berikut:



**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Proses kerja program yaitu melakukan perhitungan faktor formasi dengan menggunakan porositas dan saturasi air model awal. Kemudian setelah itu dilakukan perbandingan nilai faktor formasi model awal ini terhadap faktor formasi lapangan ( $F = \rho/\rho_w$ ) yang didapat dari data tahanan jenis dari Harsono<sup>4</sup>, lihat Tabel 1. Setelah itu

dengan menggunakan metode inversi maka akan didapatkan nilai  $\Delta\phi$  dan  $\Delta S$ . Perhitungan faktor formasi kembali dilakukan dengan nilai porositas  $\phi_n = \phi_{n-1} + \Delta\phi$  dan nilai saturasi air  $S_n = S_{n-1} + \Delta S$ . Selanjutnya dilakukan perhitungan besarnya error yang dihasilkan, dengan mencari selisih faktor formasi sekarang dengan faktor formasi sebelumnya. Apabila nilai error ini masih belum kurang dari  $10^{-7}$ , maka semua proses di atas akan diulang kembali dengan nilai porositas dan saturasi sekarang menjadi nilai porositas dan saturasi air model awal kembali. Proses di atas akan terus berulang sampai nilai error yang didapatkan kurang dari  $10^{-7}$ . Apabila nilai tersebut sudah didapatkan, maka nilai porositas dan saturasi air terakhir ini menjadi nilai porositas dan saturasi air yang cari.

**Tabel 1.** Data tahanan jenis dan parameter litologi yang digunakan dalam penelitian<sup>4</sup>.

Parameter litologi :		Parameter litologi :	
a = 1 ; m=2 ; n=2		a = 0.81 ; m=2 ; n=2	
Tahanan Jenis Batuan ( $\rho$ ) dlm $\Omega m$	Tahanan Jenis Air ( $\rho_w$ ) dlm $\Omega m$	Tahanan Jenis Batuan ( $\rho$ ) dlm $\Omega m$	Tahanan Jenis Air ( $\rho_w$ ) dlm $\Omega m$
1.7	0.11	1.65	0.12
2	0.11	2.2	0.12
2.9	0.11	2.32	0.12

Tabel 1 memperlihatkan data-data tahanan jenis dan parameter litologi yang

digunakan. Sedangkan hasil perhitungan nilai porositas dan saturasi air formasinya dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

**Tabel 2.** Nilai porositas dan saturasi air formasi<sup>4</sup>.

Parameter litologi				Parameter litologi :			
: a = 1 ; m=2				a = 0.81 ; m=2 ; n=2			
; n=2							
$\rho$	$\rho_w$	$\phi$	$S_w$	$\rho$	$\rho_w$	$\phi$	$S_w$
( $\Omega m$ )	( $\Omega m$ )	(%)	(%)	( $\Omega m$ )	( $\Omega m$ )	(%)	(%)
1.7	0.11	26.9	100	1.65	0.12	28.5	98
2	0.11	25.4	93	2.2	0.12	26.8	94
2.9	0.11	24.7	100	2.32	0.12	26.3	100

Dari hasil penelitian, nilai porositas dan saturasi air formasi hasil *running* program inversi yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

**Tabel 3.** Nilai porositas dan saturasi air formasi dari hasil penelitian.

Parameter litologi :					Parameter litologi : a = 0.81 ; m=2 ;				
a = 1 ; m=2 ; n=2					n=2				
$\rho$	$\rho_w$	$\phi$	$S_w$	E	$\rho$	$\rho_w$	$\phi$	$S_w$	E
( $\Omega m$ )	( $\Omega m$ )	(%)	(%)	( $10^{-7}$ )	( $\Omega m$ )	( $\Omega m$ )	(%)	(%)	( $10^{-7}$ )
1.7	0.11	23.6	94.6	1.55	1.65	0.12	24.0	96.2	1.37
2	0.11	23.4	93.5	1.82	2.2	0.12	23.7	94.8	1.83
2.9	0.11	22.5	90.2	2.64	2.32	0.12	23.6	94.5	1.93

Ket : E= Error

Berdasarkan pengalaman lapangan asumsi yang digunakan adalah bahwa dalam suatu formasi batuan yang di dalamnya terdapat fluida (air, minyak atau gas) besarnya porositas total batuan yang terisi fluida rata-rata tidak pernah di atas 30 % dari volume total batuan. Dengan menggunakan asumsi di atas maka pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa untuk parameter litologi a =1, m=2 dan n=2, ternyata setelah dilakukan estimasi menggunakan program Matlab dengan nilai error dalam orde  $10^{-7}$  didapatkan nilai porositas berkisar antara 22.56 s.d 23.66 %. Ini menunjukkan bahwa dalam 100 %

volume total batuan padat, terdapat sekitar 22.56 s.d 23.66 % diantaranya merupakan ruang kosong/pori batuan. Sedangkan harga saturasi air yang berkisar antara 90.22 s.d 94.64 % menunjukkan bahwa dalam 100 % volume total rongga kosong tersebut, ada sekitar 90.22 s.d 94.64 % diantaranya diisi oleh air. Dari sini dapat digarisbawahi bahwa di dalam formasi terdapat porositas absolut berkisar antara 7.44 s.d 6.34 % (dari 30 % porositas total batuan) yang berisi udara, ini ditunjukkan oleh besarnya persentase saturasi air yang ada.

Demikian juga untuk parameter litologi  $a = 0.81$ ,  $m=2$  dan  $n=2$ . Nilai porositas didapat berkisar antara 23.64 s.d 24.06 %, ini berarti bahwa dalam 100 % volume total batuan padat, terdapat sekitar 23.64 s.d 24.06 % diantaranya merupakan ruang kosong/pori. Sedangkan harga saturasi air yang berkisar antara 94.56 s.d 96.23 % menunjukkan bahwa dari 100 % volume total rongga kosong tersebut, ada sekitar 94.56 s.d 96.23

% diantaranya diisi oleh air. Dari besarnya persentase saturasi air formasi dapat diketahui bahwa besarnya porositas absolute yang berisi udara berkisar antara 6.36 s.d 5.94 % dari porositas total batuan.

Perbandingan antara nilai porositas dan saturasi air formasi hasil penelitian dengan hasil Harsono (1997) dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Perbandingan nilai porositas dan saturasi air formasi hasil Harsono<sup>4</sup> dengan hasil penelitian yang dilakukan.

Parameter litologi : $a = 1$ ; $m=2$ ; $n=2$				Parameter litologi : $a = 0.81$ ; $m=2$ ; $n=2$			
Harsono		Penelitian		Harsono		Penelitian	
$\phi$ (%)	Sw (%)	$\phi$ (%)	Sw (%)	$\phi$ (%)	Sw (%)	$\phi$ (%)	Sw (%)
26.9	100	23.66	94.64	28.5	98	24.06	96.23
25.4	93	23.40	93.59	26.8	94	23.72	94.86
24.7	100	22.56	90.22	26.3	100	23.64	94.56

Dari Tabel di atas dapat dilihat, secara umum jika kedua hasil tersebut dibandingkan, maka dapat diketahui bahwa hasil yang diperoleh dari penelitian memberikan nilai-nilai yang cukup signifikan dan mendekati nilai-nilai seperti yang diperoleh oleh Harsono<sup>4</sup>. Perbedaan nilai yang terjadi ini lebih disebabkan oleh data tahanan jenis yang berasal dari Harsono<sup>4</sup> masih dipengaruhi oleh pengaruh hidrokarbon, sedangkan nilai tahanan jenis yang digunakan dalam persamaan Archie haruslah dalam kondisi bersih terbebas dari pengaruh hidrokarbon.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa berdasarkan data tahanan jenis batuan dan tahanan jenis air formasi, dengan menggunakan teknik inversi dari persamaan Archie, maka dapat ditentukan dua besaran fisis sekaligus, yaitu porositas dan saturasi air formasi. Validasi hasil ditunjukkan oleh kisaran nilai yang diperoleh dari penelitian mendekati nilai yang diperoleh dari penelitian Harsono (1997).

## ACKNOWLEDGEMENTS

Secara khusus penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Sriwijaya melalui Dana DIK-Suplemen Unsri Th. 2003 selaku penyandang dana yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Dannowski, G., U. Yaramanci, 1999. Estimation of Water Content and Porositas Using Combined Radar and Geoelectrical Measurement, European Journal of environmental and Engineering Geophysics, Germany.
- Harsono, A., 1997, Evaluasi Formasi dan Aplikasi Log, Schlumberger Oilfield Service, Jakarta.
- Menke, W., 1989, Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory, Academic Press. Inc., New York.
- Reynold, J. M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysisc, Jhon Wiley & Sons