

**METODE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SOUNDING (NMRS)
MERUPAKAN TEKNIK BARU DALAM EKSPLORASI AIR TANAH**

M. Nurdin, Slamet Sudarto

Pusat Pengembangan Geologi Nuklir – BATAN
Kawasan PPTN Pasar Jum'at, Jakarta Selatan

ABSTRAK

METODE NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SOUNDING (NMRS) MERUPAKAN TEKNIK BARU DALAM EKSPLORASI AIR TANAH. Metode NMRS telah digunakan dalam 10 tahun terakhir dengan keberhasilan yang luar biasa dalam berbagai konteks geologi dan eksplorasi airtanah. Metode ini memang mempunyai kemampuan secara langsung untuk mendeteksi keberadaan air melalui eksitasi dari proton hidrogen pada molekul air. Frekuensi dimana proton H terganggu tergantung pada besarnya medan magnet bumi, sementara intensitas eksitasi menentukan kedalaman penyelidikan. Amplitudo medan magnet yang telah dibangkitkan akan dikembalikan lagi oleh lapisan air sebanding dengan porositas lapisan tersebut dan kurva waktu-relaksasi yang konstan berkaitan dengan ukuran pori rata-rata material, artinya erat kaitannya dengan permeabilitas hidrolik. Sebuah kasus lapangan sebagai ilustrasi aplikasi NMRS yaitu diambil dari pengukuran di Mauritania. Hasil pengukuran NMRS di daerah kering menunjukkan amplitudo waktu-relaksasi yang rendah (10 A-ms) dan kandungan air 1%. Sedangkan hasil pengukuran NMRS di daerah akuifer menunjukkan amplitudo waktu-relaksasi yang cukup besar (270 A-ms) dan kandungan air 12 – 30 %.

Kata kunci: NMRS, proton hydrogen, medan magnet, air tanah.

ABSTRACT

NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SOUNDING (NMRS) METHOD IS NEW TECHNIQUE IN GROUNDWATER EXPLORATION. NMRS method has been used in the past 10 years with success in various geological context and groundwater exploration. This method has indeed the ability of directly detecting the presence of water through the excitation of the hydrogen protons of water molecules. The frequency to which the H protons react depends on the magnitude of the Earth magnetic field, while the intensity of the excitation determines the depth of investigation. The amplitude of the magnetic field generated in return by the water of a layer is proportional to the porosity of this layer, and the time constant of the relaxation curve is linked to the mean pore size of the material, that is to say tightly related to its hydraulic permeability. A field cases such as illustrate NMRS application that is taken from measurement at Mauritania. NMRS measurement results in dry areas indicate the time-relaxation amplitude is low (10 A-ms) and water content is 1%. While the results of the aquifer region NMRS measurements showed -relaxation-time amplitude is quite large (270 A-ms) and water content is 12-30%.

Key words: NMRS, proton hydrogen, magnetic field, relaxation-time, groundwater.

PENDAHULUAN

Selama 10 tahun terakhir, teknik geofisika yang diterapkan telah membuat kemajuan yang signifikan dalam kuantifikasi, eksplorasi, dan pengelolaan air tanah melalui aplikasi yang lebih luas dari teknik klasik dan terintegrasi. Teknik ini meliputi pendugaan resistivitas vertical dan Resistivitas 2 dimensi (2D), Polarisasi Terimbas (IP), Potensial diri (SP), *Time Domain Electromagnetic* (TDEM), *Frequency Domain Electromagnetic* (FDEM), *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Very Low Frequency* (VLF) dan lain-lain. Kesemua metode geofisika tersebut diatas telah dilakukan untuk eksplorasi airtanah secara tidak langsung. Akan tetapi, saat ini ada metode terbaru untuk eksplorasi airtanah secara langsung yaitu : metode Nuclear Magnetic Resonance Sounding (NMRS) atau Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) atau Nuclear Magnetic Resonance (NMR).

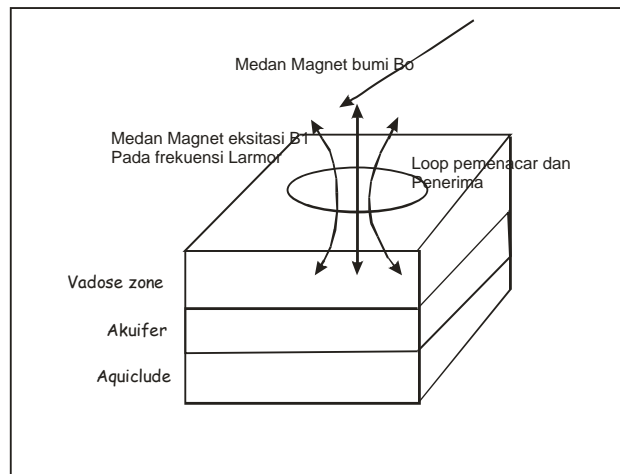
Secara fungsional, NMRS tepatnya berada diantara dua teknik yang telah ada yaitu : *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) and *Time Domain Electromagnetics* (TDEM). AAS digunakan di laboratorium dengan sampel yang dipersiapkan secara hati-hati dan tidak memiliki penetrasi kedalaman in-situ, tetapi AAS sangat baik dalam memisahkan unsur dan menentukan konsentrasi. TDEM memiliki kedalaman penetrasi yang baik (misalnya, dapat mengukur konduktivitas tanah in-situ sebagai fungsi dari kedalaman sampai beberapa ratus meter) tetapi tidak dapat membedakan diantara unsur-unsur^[1]. NMRS memberikan beberapa karakteristik ini : NMRS memiliki selektivitas unsur yang sangat baik tetapi hanya untuk satu unsur yaitu hidrogen, yang merupakan komponen utama dari molekul air. NMRS memiliki kedalaman penetrasi yang cukup, khususnya di daerah yang basah (penetrasi bisa mencapai 150 meter), serta dapat mengukur kandungan air dan ukuran pori sebagai fungsi kedalaman^[2].

HUBUNGAN NMRS DENGAN HIDROGEOLOGI

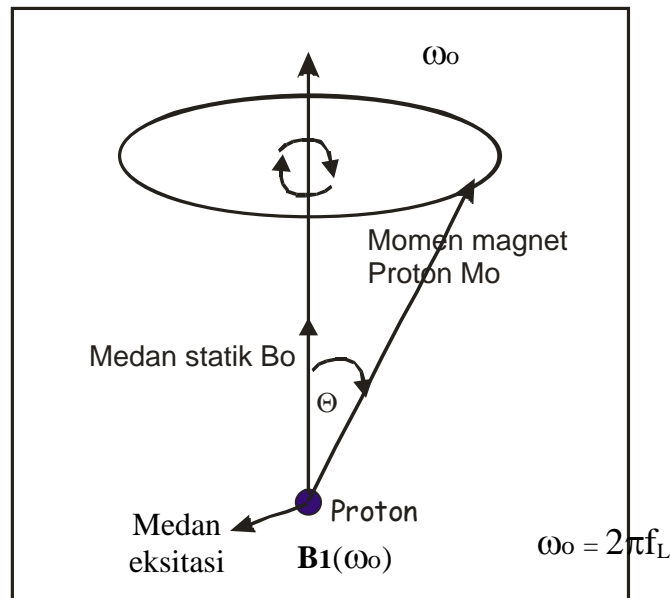
Parameter akuifer dapat diperoleh melalui teknik geofisika darat secara tidak langsung untuk menyelidiki kandungan air. Aplikasi teknik geofisika tersebut dalam pendugaan sumberdaya airtanah sebagai peran pendukung untuk penentuan titik pemboran. Teknik geofisika permukaan konvensional tidak dapat mengidentifikasi airtanah secara langsung. Dalam hal ini, teknik NMRS merupakan teknik geofisika darat yang menjanjikan karena teknik ini dapat mengestimasi airtanah regional, sebagai fungsi dari kedalaman, yaitu: (1) batas-batas akuifer (kedalaman, ketebalan dan lebar spasi), (2) kandungan air bebas dan (3) sifat-sifat aliran utama formasi *water-bearing* dalam volume yang diselidiki^[3]. NMRS juga meminimalkan problem efek skala^[4] yang diamati ketika penyelidikan dibuat diatas area yang kecil, misalnya *pumping tests*, karena NMRS memberikan peluang untuk melakukan investigasi pada volume yang relatif besar (sampai 10^6 m³). Sebatas pengembangan teknologi, NMRS ini juga dimungkinkan untuk mengubah-ubah dimensi *loop* sesuai dengan kedalaman airtanah yang diselidiki.

PRINSIP DASAR SNMR

Proton atom hidrogen dalam molekul air mempunyai momen magnetik μ . Atom-atom ini dapat dijelaskan dalam term partikel bermuatan yang berputar (spin). Umumnya μ adalah sejajar dengan medan magnet bumi lokal B_0 . Ketika medan magnet lainnya B_1 diberikan, maka sumbu perputaran proton akan dibelokkan, karena diberikan tenaga puntiran (torsi), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



(a)



(b)

Gambar 1, (a) Elemen-elemen pengukuran SNMR^[3]
(b) perilaku relaksasi proton^[3].

Dengan demikian hanya komponen B_1 yang tegak lurus dengan medan statik B_0 yang bertindak sebagai gaya torsi. Ketika B_1 dihilangkan, proton menghasilkan medan magnet relaksasi karena menjadi teratur kembali disepanjang B_0 sesaat proton berputar mengelilingi B_0 dengan frekuensi Larmor^[5] :

$$f_L = \omega_L / 2\pi \text{ dengan } \omega_L = \gamma B_0 \text{ dan}$$

$$\gamma = 0.267518 \text{ Hz/nT} \dots\dots\dots (1)$$

dimana γ adalah rasio giromagnetik proton hidrogen. Pengukuran tersebut dilakukan dengan menggunakan loop biasanya dengan bentuk lingkaran atau persegi empat. Arus bolak-balik (AC),

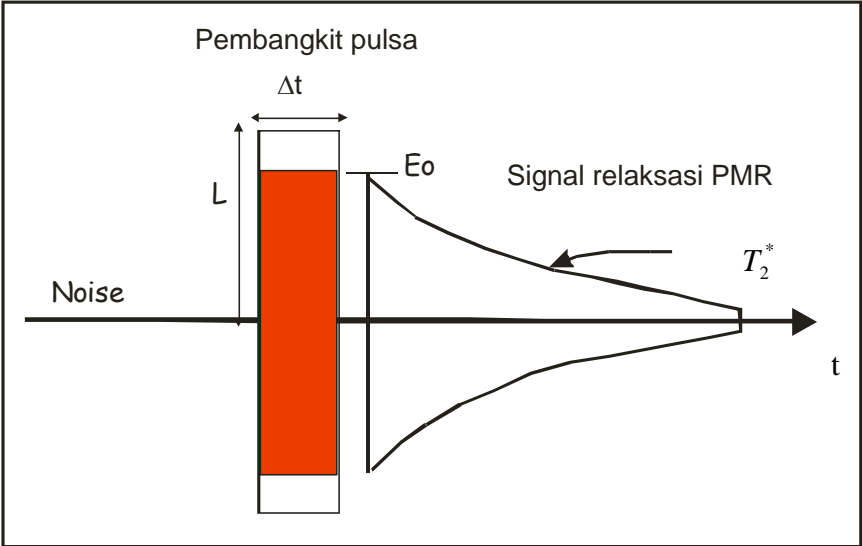
$$i(t) = i_0 \cos(\omega_L t) \dots\dots\dots (2)$$

dengan frekuensi Larmor ω_L dan kuat arus i_0 lewat melalui loop untuk waktu terbatas τ kemudian untuk mencapai intensitas eksitasi (momen pulsa) $q = i_0 \tau$. Setelah arus dalam loop diputus, maka tegangan $e(t)$ dengan frekuensi ω_L dan peluruhan amplitudo mengakibatkan terjadinya induksi pada loop dengan relaksasi dari proton :

$$e(t) = \omega_L M_0 \int f(r) e^{-\nu T(r)} \cos(\omega_L t + \varphi(r)) B_{\perp}(r) \sin(0.5 \gamma B_{\perp}(r) q) dV \dots\dots\dots (3)$$

$M_0 = 3.29 \times 10^{-3} B_0 J/(Tm^3)$, magnetisasi nuklir untuk air pada temperatur 293°K. Dalam satuan volume dV pada lokasi $r(x,y,z)$ fraksi volume air dinyatakan dengan $f(r)$ dan peluruhan waktu proton dinyatakan dengan $T(r)$. $B_{\perp}(r)$ adalah komponen medan eksitasi (Gambar 1A) tegak lurus dengan medan magnet bumi statik B_0 . Dalam suatu medium yang konduktif $B_{\perp}(r)$ terbentuk medan magnet primer dan medan magnet induksi. Medan magnet induksi menyebabkan pergeseran fase sebesar $\varphi(r)$ yang berkaitan dengan medan eksitasi. Penjelasan fungsi sinus, $\Theta = 0.5 \gamma B_{\perp}(r) q$, adalah sudut defleksi (pembelokkan) momen magnet proton dari medan magnet bumi. Signal $e(t)$ biasanya didekatkan dengan ^[6]Gambar 2) :

$$e(t) = E_0 e^{-t/T} \cos(\omega_L t + \varphi) \dots\dots\dots (4)$$



Gambar 2, Signal input dan output dalam pengukuran NMR^[6].

- Keterangan :
- E_0 : Amplitudo awal signal (nV). Sebanding dengan kandungan air (%).
 - T_2^* : Waktu peluruhan signal konstan (ms).

Berkaitan dengan ukuran pori rata-rata (permeabilitas).

L.Δt : Momen pulsa eksitasi (A.ms).

Berkaitan dengan kedalaman penyelidikan (m).

Peluruhan tegangan ini secara langsung berkaitan dengan kandungan air dan peluruhan waktu setiap elemen volume di bawah tanah berkontribusi sinyal : Untuk media non-konduktif, misalnya fase dibedakan, amplitudo awal E_o pada $t = 0$ adalah hanya berkaitan dengan kandungan air :

$$E_o = \omega_o M_o \int f(r) B_{\perp}(r) \sin(0.5 \gamma B_{\perp}(r) q) dV \quad (5)$$

Penggunaan persamaan amplitudo awal ini untuk menghitung berbagai intensitas eksitasi dan lapisan air pada kedalaman dan ketebalan berbeda . Hal ini terjadi bahwa untuk lapisan air dengan E_o yang lebih maksimal terjadi pada nilai q yang lebih tinggi dan kekuatan E_o secara langsung berkaitan dengan ketebalan lapisan dan jumlah air.

Peluruhan waktu T yang direkam merupakan waktu-relaksasi konstan (spin-spin atau waktu relaksasi transversal) yang biasanya dinyatakan dengan T_2^* . Dalam terminologi NMR notasi tersebut sudah biasa digunakan. Oleh karena itu, besaran-besaran (E_o dan T_2^*) berkaitan dengan ukuran pori rata-rata dan ukuran butir serta konduktivitas hidrolik material. Lempung, termasuk juga *sandy clays*, biasanya mempunyai waktu peluruhan kurang dari 30 millidetik, dimana pasir mempunyai waktu peluruhan 60 – 300 millidetik, gravel 300 – 600 millidetik dan air murni 600 – 1000 millidetik.^[8]

PERALATAN NMRS

Peralatan yang digunakan untuk survey NMRS adalah sebagai berikut :

- Transmitter untuk pembangkit pulsa : 1 unit
- Receiver untuk pengukuran signal : 4 unit
- PC computer untuk control system, pemrosesan & Interpretasi data : 1 buah
- Converter : 2 unit
- ACCU/battery 12 V : 2 buah
- Tuning untuk mengoptimalkan energi eksitasi : 2 unit
- Kawat kumparan loop transmitter & receiver : 1 gulung

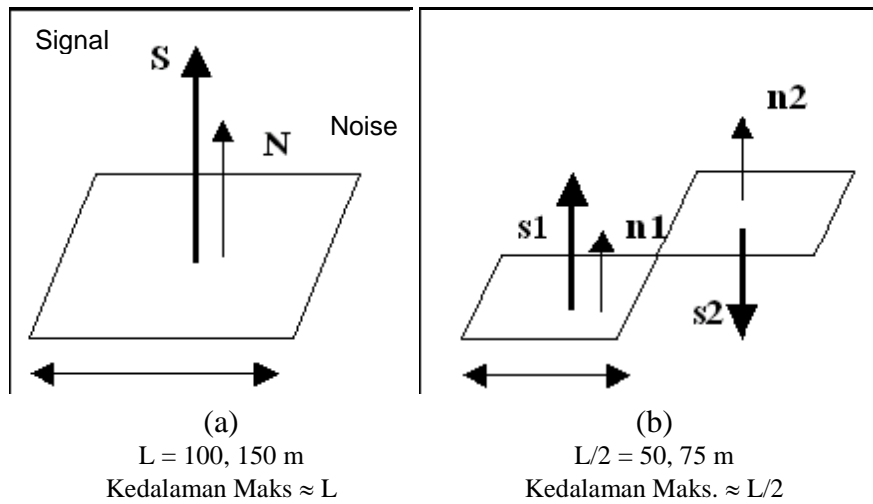
PELAKSANAAN PENGUKURAN NMRS DI LAPANGAN

Pelaksanaan pengukuran NMRS di lapangan sama seperti kita melakukan pengukuran resistivitas sounding, yaitu dengan membuat patok untuk titik duga. Kemudian kita bentangkan kawat (*loop*) sesuai dengan konfigurasi yang kita inginkan. Misalnya untuk mencapai kedalaman investigasi 100 – 150 meter, digunakan konfigurasi empat persegi (Gambar 4 a). Untuk kedalaman investigasi 100 meter menggunakan *transmitter loop* (T_x) 100 x 100 m, dengan jumlah Converter satu dan jumlah penerima empat, seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Untuk kedalaman investigasi 150 meter menggunakan *transmitter loop* (T_x) 150 x 150 m, dengan jumlah Converter dua dan jumlah penerima empat. Sedangkan untuk kedalaman investigasi 50 – 75 meter, digunakan konfigurasi yang berbentuk delapan/S (Gambar 4 b). Kedua bentuk konfigurasi tersebut mempunyai kelebihan dan kekurangan. Untuk konfigurasi empat persegi kelebihan dapat mencapai kedalaman investigasi 100 – 150 meter. Kelemahannya masih ada sedikit noise,

walaupun dalam pemrosesan data dapat direduksi. Konfigurasi delapan/S kelebihanannya noise tidak ada. Kelemahannya kedalaman investigasi dangkal.

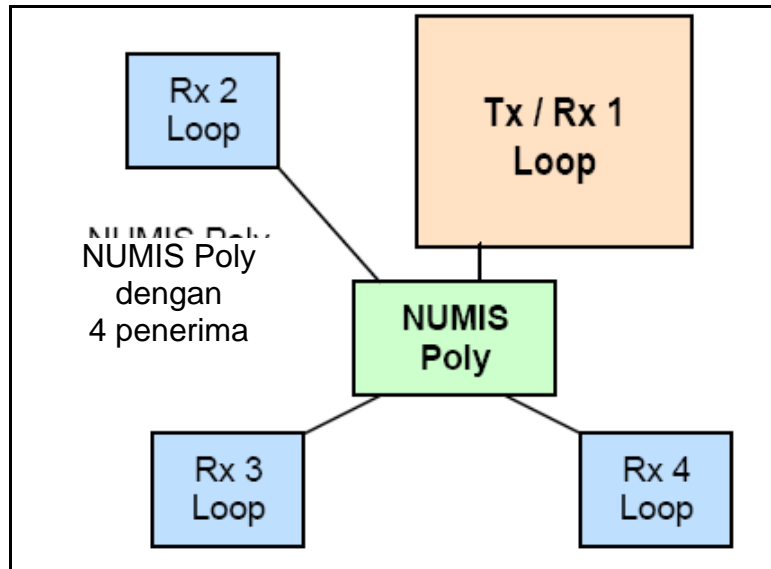


Gambar 3, Peralatan NMRS (NUMIS^{POLY}, IRIS Instrument)



Gambar 4. Konfigurasi loop untuk NMRS^[9]

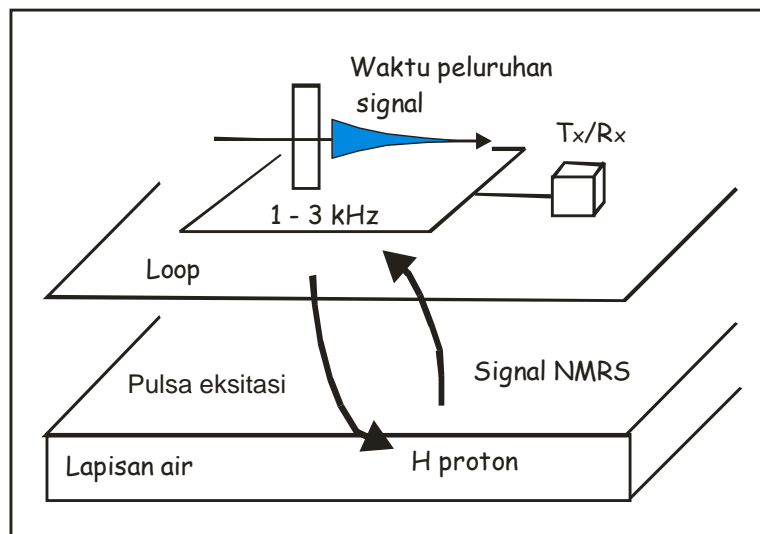
- (a). Bentuk empat persegi (standard)
- (b). Bentuk delapan/S (mereduksi noise)



Gambar 5, Jumlah penerima pada alat NUMIS^{POLY}[9].

Keterangan :

Loop T_x : loop pemancar, *Loop R_{x1}* : loop penerima 1, *Loop R_{x2}* : loop penerima 2, *Loop R_{x3}* : loop penerima 3, *Loop R_{x4}* : loop penerima 4.



(a)



(b)

Gambar 6, (a). Skema proses pengukuran NMRS^[9]
(b). Proses pengukuran NMRS di lapangan

Setelah konfigurasi yang diinginkan telah dibentangkan diatas tanah dan peralatan telah disusun maka pengukuran siap dimulai, yaitu dengan mengirimkan arus kedalam kawat *loop*, seperti diperlihatkan pada Gambar 6a, b. Arus ini membangkitkan pulsa dari energi listrik yang diubah-ubah melalui kawat *transmitter* yang menimbulkan medan elektromagnetik eksternal di bawah permukaan. Intensitas pulsa ("momen pulsa," yang mana sama dengan intensitas arus dikalikan durasi arus) untuk mengontrol kedalaman penyelidikan. Medan elektromagnetik yang dikirimkan kedalam tanah akan mengeksitasi proton hidrogen pada molekul air dengan frekuensi Larmor. Ketika medan yang telah dibangkitkan dimatikan, maka proton hidrogen pada molekul air akan beresonansi untuk kembali ke keadaan statis dan memancarkan sinyal pada frekuensi yang sama dengan frekuensi Larmor. Sinyal ini kemudian direkam di permukaan oleh penerima setelah sinyal dimatikan^{[10][11]}. Selama arus dimatikan, tiga parameter sinyal NMRS diukur^[11]: amplitudo (E_0), waktu relaksasi T_2^* , dan fase (ϕ). Amplitudo medan magnet yang dihasilkan selama pengukuran akan sebanding dengan kandungan air, sedangkan parameter fase dipengaruhi oleh konduktivitas kelistrikan lapisan hidrostratigrapi dan juga mempengaruhi atenuasi dari sinyal NMRS. Waktu relaksasi secara langsung berhubungan dengan ukuran pori rata-rata (dan karena itu konduktivitas hidrolis) dalam formasi (tabel 1) dan memberikan estimasi umum air bebas atau *bound water*^[12].

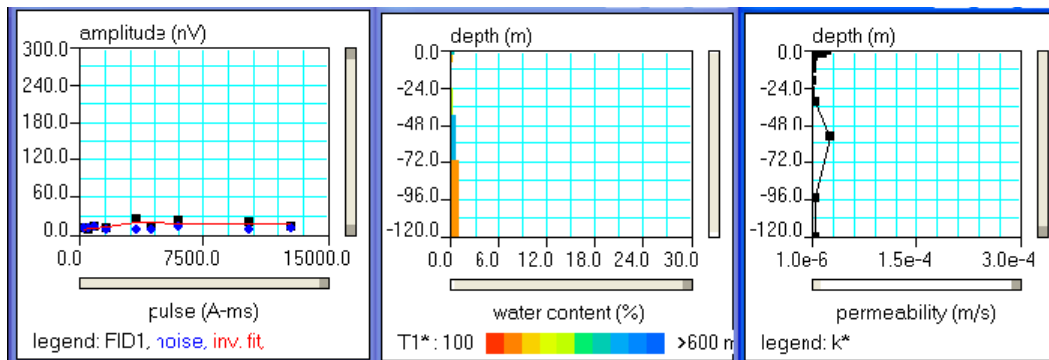
Air bebas biasanya memiliki T_2^* lebih lama daripada lempung (*bound water*). Biasanya, lempung (*bound water*) mempunyai T_2^* semakin pendek^{[13][14]}. Biasanya T_2^* yang khas untuk lempung bervariasi kurang dari 30 milidetik (ms) sedangkan T_2^* untuk gravel sekitar 400 sampai 600 ms.

Tabel 1. Perkiraan hubungan antara waktu relaksasi T_2^* ukuran pori rata-rata, dan konduktivitas hidrolis relatif (dimodifikasi dari Iris Instrumen, 2006).

T_2^* (millidetik)	Ukuran pori rata-rata	Konduktivitas hidrolis relatif
1,000	Danau, sungai (air bebas)	Tinggi
500	Gravel	Tinggi
200	Sedimen berukuran-kasar	Medium
100	Sedimen berukuran medium	Medium
50	Sedimen berukuran halus	Rendah
20	Lempung (bound water)	Rendah

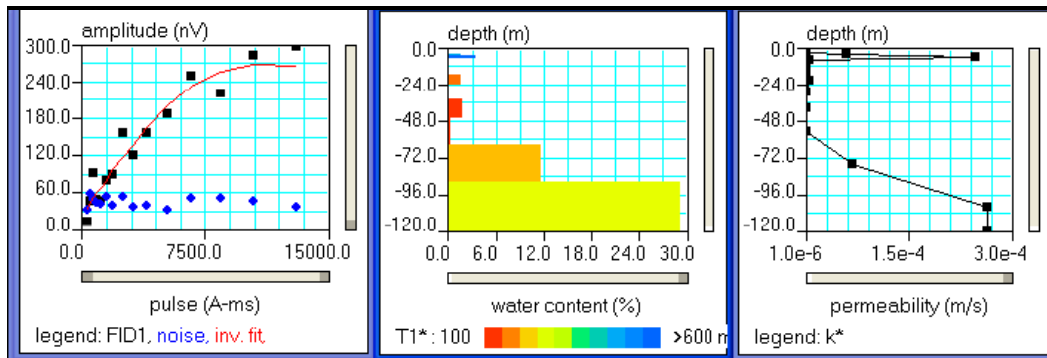
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai hasil dari pengukuran NMRS diambil dari pengukuran NMRS di Mauritania, seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Pengukuran di daerah kering setelah dilakukan inversi data memperlihatkan pulsa waktu-relaksasi sangat rendah yaitu kira-kira 20 A-ms. Hasil ini jika dikaitkan dengan tabel 1, ini berada pada nilai lempung. Kemudian hasil inversi untuk kandungan airnya ternyata sangat kecil sekali yaitu kira-kira hanya 1% dan nilai permeabilitasnya $1.1e^{-6}$ m/s.

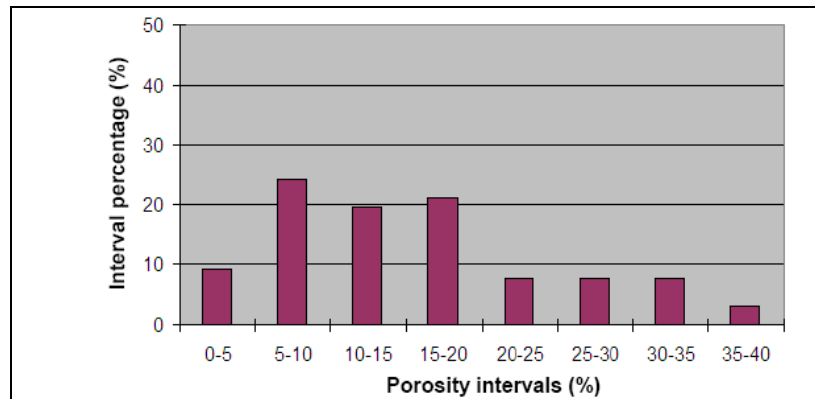


Gambar 7, Data dan Interpretasi NMRS didaerah kering^[15]

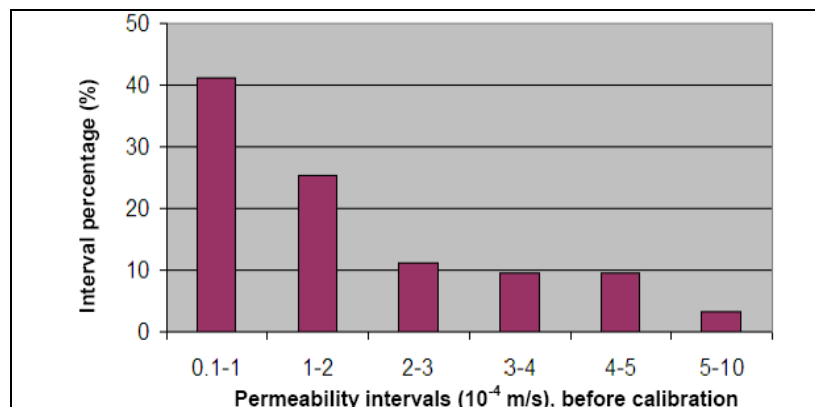
Hasil pengukuran NMRS didaerah akuifer seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Disini tampak bahwa waktu-relaksasi hasil inversi menunjukkan nilai yang tinggi yaitu kira-kira 270 A-ms. Jika dikaitkan dengan tabel 1, diperkirakan air pada batupasir kasar. Hasil inversi kandungan air ternyata sangat signifikan yaitu 12 – 30 % dan permeabilitasnya $3e^{-4}$ m/s.



Gambar 8, Data dan interpretasi NMRS didaerah akuifer^[15]



(a)



(b)

Gambar 9, Analisis statistik untuk interpretasi data NMRS^[15]

- (a). untuk interpretasi porositas
- (b). untuk interpretasi permeabilitas

Analisis statistik (Gambar 9) menunjukkan bahwa median nilai porositas ditafsirkan kira-kira 20%, yang muncul agak tinggi dapat diinterpretasikan kemungkinan batupasir terfrakturkan. Kemudian median nilai permeabilitas ditafsirkan kira-kira $2 - 3 \times 10^{-4}$ m/s, sesuai dengan hasil NMRS n° 31.

Dari hasil diatas terlihat bahwa metode NMRS sangat cocok untuk eksplorasi airtanah. Karena NMRS merupakan satu-satunya metode yang dapat mendeteksi airtanah secara langsung.

SIMPULAN

Dari hasil bahasan diatas dapat disimpulkan bahwa metode NMRS sangat baik digunakan dalam eksplorasi airtanah karena dapat mendeteksi secara langsung kandungan air di lapangan. Metode ini telah digunakan di beberapa negara di dunia dan hasilnya sangat memuaskan. Saat ini kemampuan penetrasi alat ini baru mencapai 150 meter.

DAFTAR PUSTAKA

1. ROY, J., MRS : A new geophysical technique for groundwater work, Hydrogeophysics, 2009.
2. SHUSHAKOV, O.A., NMR Hydroscope for water prospecting : Proc. Of a Seminar on Geotomography : Indian Geophysic Union, 66 – 67, 1996.
3. YARAMANCI, U., New Technologies in Groundwater Exploration Surface Nuclear Magnetic Resonance, Geologica acta : an international earth science journal, ano/vol. 2, numero 002, Universidad de Barcelona, Barcelona, Espana, pp. 109 – 120, 2004.
4. ROY, J., LUBEZYNSKI, M., The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigation, Hydrogeological Journal, pp. 455 – 465, 2003.
5. EDWARDS, J.C., Principles of NMR, Process NMR Associates LLC, 87 A Sand Pit Rd, Danbury CT 06810, 2004.
6. KENYON, W.E., Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurement, International Journal of Radiation, Applications Instrumentation, Part E, Nuclear Geophysics, 6, 153 – 171, 1992.
7. MICHELIS, T.V., Principes et methode de la Prospection a Resonance Magnetique (MRS), IGEOTEST, 1997.
8. SCHIROV, M., LEGCHENKO, A.V., GREET, G., A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia, Exploration Geophysics 22, 333 – 338, 1991.
9. IRIS INSTRUMENT, NUMIS Poly, 1 avenue Buffon, BP 6007, 45060 ORLEANS Cedex 2, FRANCE, 2009.
10. WALBRECKER, J.O., HERTRICH, M., GREEN, A.G., Accounting for relaxation processes during the pulse in surface NMR data, Geophysics, Vol. 74, No. 6, 2009.
11. ROY, J., LUBCZYNSKI, M.M., The MRS technique for groundwater resources evaluation – test result from selected sites in Southern African, Capetown, IAH-2000 Proceeding, 2000.
12. IRIS INSTRUMENT, NUMIS Plus, 1 avenue Buffon, BP 6007, 45060 ORLEANS Cedex 2, FRANCE, 2006.
13. LEGCHENKO, A.V., SHUSHAKOV, O.A., Inversion of surface NMR data, Geophysics, 63, 75 – 84, 1995.
14. BERNARD, J., LEGCHENKO, A.V., Groundwater exploration with the magnetic resonance sounding method, ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition, Adelaide, 2003.

15. BERNARD, J., LEMINE, MOHAMED, Combination of electrical resistivity and magnetic resonance sounding data for mapping an aquifer layer in Mauritania, SEG Meeting, Denver, Colorado, 2004.