
TEKNOLOGI ISOTOP ALAM UNTUK MANAJEMEN EKSPLORASI DAN EKSPLOITASI AIR TANAH

Zainal Abidin, Hudi Hastowo dan Aang Hanafiah

Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

TEKNOLOGI ISOTOP ALAM UNTUK MANAJEMEN EKSPLORASI DAN EKSPLOITASI AIR TANAH. Indonesia secara iklim dan kondisi hidrogeologi mempunyai banyak kantong akifer yang merupakan sumber air tanah. Pada berbagai daerah banyak muncul mata air mulai debit skala kecil hingga besar yang menandai adanya potensi air tanah. Air tanah merupakan cadangan air yang potensial untuk digunakan semaksimal mungkin bagi berbagai keperluan seperti air minum, industri dan pariwisata. Kota besar seperti Jakarta, Bandung dan lainnya sebagian besar mengandalkan air tanah untuk keperluan industri dan hotel. Eksploitasi pemanfaatan air tanah untuk hal tersebut perlu dikontrol dan dilakukan sistem manajemen monitoring. Penelitian eksplorasi secara geofisik dan hidrogeologi yang menunjukkan besarnya cadangan air tanah belum cukup untuk dapat digunakan sebagai justifikasi untuk eksploitasi, masih perlu parameter lain yaitu tentang asal-usul dan umur air tanah. Kedua faktor tersebut merupakan bagian pertimbangan dari sistem konservasi dan kesetimbangan air. Teknologi alternatif yang sangat cepat untuk menentukan kedua parameter tersebut adalah teknik isotop alam ^{18}O , ^2H dan ^{14}C yang telah dikembangkan lebih dari tiga dekade dan digunakan di banyak negara diberbagai belahan dunia. Teknik isotop ^{18}O dan ^2H digunakan sebagai sidik jari untuk menentukan asal usul air (origin) sedangkan isotop ^{14}C digunakan untuk menentukan umur air tanah. Isotop ^{18}O dan ^2H merupakan isotop stabil dalam bentuk senyawa air dan ikut dalam siklus hidrologi. Konsentrasinya yang sangat spesifik dalam air hujan pada berbagai elevasi digunakan sebagai sidik jari untuk menentukan daerah imbuh air tanah dan asal usulnya. Isotop ^{14}C merupakan isotop alam bersifat radioaktif dengan waktu paruh 5730 tahun ikut dalam siklus hidrologi dan masuk ke dalam sistem air tanah melalui senyawa gas CO_2 terlarut. Isotop ^{14}C dapat menentukan umur air tanah dan mengindikasikan potensi/jumlah air tanah. Studi eksplorasi dan monitoring eksploitasi air tanah terpadu secara geohidrologi, geofisik dan isotop merupakan solusi untuk manajemen pengelolaan air tanah yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan. Berbagai contoh studi terpadu tersebut telah dilakukan pada berbagai sumber air tanah seperti Jakarta, Bontang dll dan memberikan sumbangan yang berarti untuk sistem manajemen pengelolaan terpadu sistem akifer.

ABSTRACT

NATURAL ISOTOP TECHNIQUE FOR THE EXPLORATION AND EXPLOITATION OF GROUND WATER. In line with the condition of climate and hydrology, Indonesia has a fast amount of aquifers which are sources of ground water. In several areas large number of springs occurred with small to large debits which is a sign of ground water potential. Ground water is a potential reservoir to be use at maximum for several purposes such as drinking water, industry and tourism. Large cities such as Jakarta, Bandung and others depend on ground water for their industries and hotels. The exploitation of ground water use has to be controlled and monitoring of a management system have to be done. Research carried out only on the exploitation of geophysics and hydrology showed that the amount of ground water reservoirs is not enough to be used when it comes to justification to exploitate it. Other parameters are still be needed which are the origins and dating of the ground water, these last two factors mentioned have to be taken into consideration in the system of conversion and balance of water. An alternative technology to determine the two factors mentioned in a short time is the natural isotope technique of ^{18}O , ^2H and ^{14}C . This

technique is used to determine the origin of water, and isotope ^{14}C is carried out to determine the age of ground water. Isotopes ^{18}H and ^2H are stable isotopes in the form of water and is integrated in the hydrological cycle. Their specific concentrations in rain water at several elevations are used as fingerprints to locate the area of ground water supplement and its origin. Isotope ^{14}C is a natural radioactive isotope with a half-life of 5.730 years and is found in the hydrology cycle and enters the ground water system through CO_2 gas which is dissolved in water. ^{14}C isotope could determine the age of ground water and is also able to indicate the potential/amount of ground water. Studies of exploration and exploitation monitoring of ground water should be an integrated study by geohydrology, geophysics and isotope and could be a solution of the management of sustainable environmental ground water use. Integrated studies as mentioned above have been done for ground water in Jakarta, Bandung and other areas and has significantly contributed to the management of a aquifer system.

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan cadangan air yang sangat penting untuk memenuhi hajat hidup masyarakat dan keperluan industri. Indonesia yang beriklim tropik mempunyai musim hujan dengan curah hujan tinggi antara 2000 hingga 4000 mm per tahun sebagai sumber yang melimpah bagi masukan air tanah. Berdasarkan penelitian geohidrologi berbagai daerah di Indonesia mempunyai banyak kantong akifer yang mengandung air dengan kualitas baik dan layak sebagai sumber air bersih serta cadangan air tanah melimpah yang keluar sebagai mata air.

Pemanfaatan air tanah secara optimal memerlukan sistem manajemen pengelolaan yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan. Sistem eksplorasi dan eksploitasi air tanah dengan menggunakan metode penelitian teknik geohidrologi dan geofisika saja belum cukup. Kedua teknik tersebut perlu di integrasikan dengan metode isotop alam agar diperoleh informasi lengkap tentang potensi air tanah secara komprehensif, agar dapat dieksploitasi dengan sistem pengelolaan air yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan.

Teknik isotop alam yang meliputi ^{18}O , ^2H dan ^{14}C telah dikembang lebih dari tiga dekade yang lalu dan kini menjadi metode yang banyak digunakan di berbagai belahan dunia untuk tujuan eksplorasi dan eksploitasi air tanah. Teknik isotop alam dengan cepat dapat menentukan beberapa parameter yang secara konvensional sangat sulit dilakukan yaitu tentang asal-usul air tanah, daerah imbuhan dan umur air tanah. Ketiga parameter tersebut berhubungan erat dengan potensi terbukti akifer. Penelitian terpadu antara geohidrologi, geofisik dan isotop alam merupakan metode yang sangat ampuh yang diperlukan baik oleh regulator maupun pengelola air tanah terutama untuk mendapatkan informasi penting dalam menetapkan strategi pengeloannya, khususnya untuk mengontrol beberapa hal seperti cadangan, daerah imbuhan dan pencampuran/kontaminasi air tanah ¹⁾.

Beberapa hasil penelitian Batan bekerjasama dengan institusi pemerintah dan swasta di Indonesia yang memadukan teknik geohidrologi, geofisik dan isotop alam memberikan hasil yang memuaskan bagi pengelola air tanah dan regulator. Informasi yang diperoleh dari penelitian yang memadukan ketiga teknik tersebut di Bontang, Jakarta, Klaten dan Sukabumi dapat digunakan sebagai contoh dalam eksplorasi dan eksploitasi air tanah.

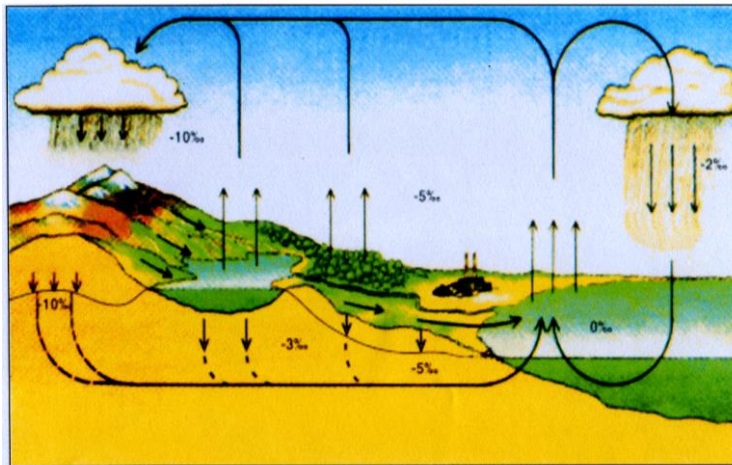
TEKNIK ISOTOP ALAM

Penelitian eksplorasi air tanah secara geohidrologi dan geofisik untuk mengetahui potensi dan keberadaan akifer air tanah dan pemantauannya secara penentuan piezometrik untuk efek eksploitasi telah umum dilakukan di dalam pengelolaan air tanah. Akan tetapi untuk tujuan eksploitasi yang berkelanjutan (*sustainability/renewable resources*) dan konservasi air tanah parameter yang diperlukan belum tercakup dalam kedua teknik tersebut. Teknik isotop alam ^{18}O , ^2H dan ^{14}C memberikan masukan dalam bentuk informasi nyata tentang asal-usul, daerah imbuh dan umur air tanah di mana teknik konvensional tidak dapat menentukannya. Penentuan asal usul dan daerah imbuh air tanah berhubungan erat dengan konservasi dan *renewable resources* air tanah sedangkan penentuan umur air tanah berhubungan terhadap potensi atau jumlah deposit air tanah. Dalam monitoring air tanah terhadap efek eksploitasi dapat dilakukan dengan cara memonitor umur air tanah berdasarkan kandungan isotop ^{18}O , ^2H pada selang waktu tertentu. Penurunan umur air tanah pada periode monitoring memberikan informasi bahwa terjadi pencampuran air tanah dengan air imbuh modern (*modern recharge*).

a. Dasar Teknik Isotop ^{18}O dan ^2H

Teknik isotop alam didasarkan atas keikut-sertaan isotop dalam siklus hidrologi, isotop ^{18}O dan ^2H dalam senyawa air H_2^{18}O dan HDO . Keberadaan kedua isotop tersebut dalam jumlah kecil dalam air dapat di analisis menggunakan alat spectrometer massa. Siklus hidrologi di mulai dari penguapan air laut, kondensasi air hujan dan imbuh kedalam air tanah. Kedua isotop tersebut terlibat dalam kedua peristiwa fisika ini yaitu penguapan dan kondensasi, dimana isotop pada kedua peristiwa tersebut mengalami proses fraksinasi sehingga terjadi perubahan konsentrasi pada setiap fase perubahan. Air laut yang mengalami proses penguapan secara *steady state* mengalami pengkayaan maksimum dan mempunyai konsentrasi isotop ^{18}O dan ^2H dengan kelimpahan tertinggi (*enriched*) sedangkan air hujan yang merupakan produk penguapan air laut mempunyai konsentrasi isotop berat ^{18}O dan ^2H pengenceran kelimpahan (*depleted*). Variasi

konsentrasi isotop berat pada air hujan sangat tergantung pada suhu kondensasi dan mempunyai hubungan linier terhadap elevasi. Air hujan yang turun pada elevasi yang rendah mempunyai konsentrasi lebih *enriched* sedangkan air hujan yang turun pada elevasi tinggi mempunyai konsentrasi yang lebih *depleted*. Konsentrasi tersebut sangat spesifik dan apabila air hujan pada elevasi tertentu imbuhan ke dalam tanah maka konsentrasi ^{18}O dan ^2H mirip dengan konsentrasi air hujannya²⁾. Gambar siklus hidrologi dan perubahan konsentrasi isotop pada berbagai sumber air dapat dilihat pada gambar di bawah ini³⁾.



Gambar 1. Berbagai konsentrasi isotop ^{18}O dalam sistem siklus hidrologi

b. Dasar Teknik Isotop ^{14}C

Isotop ^{14}C merupakan isotop alam yang dihasilkan dari reaksi sinar kosmis dengan gas N_2 atmosfer. Carbon-14 bersifat radioaktif dengan waktu paruh 5730 tahun. Alam secara terus menerus menghasilkan isotop ^{14}C dengan konsentrasi sekitar 14 disintegrasi permenit (dpm) per gram. Konsentrasi ini dianggap sebagai konsentrasi awal yang dinyatakan dalam 100 persen modern carbon (pmc). Isotop karbon di atmosfer bereaksi dengan gas O_2 menghasilkan senyawa gas CO_2 kemudian larut dalam air hujan dan imbuhan ke dalam tanah serta ikut dalam pergerakan

air tanah sebagai gas terlarut. Penanggalan atau perhitungan umur air tanah dimulai pada saat air hujan imbuah kedalam akifer dan bergerak di dalamnya hingga keluar dari akifer karena dieksploitasi. Berdasarkan sifat disintegrasi, konsentrasi isotop C-14 dalam akifer akan berkurang karena meluruh. Umur air tanah yang ditentukan dengan formula waktu paruh isotop C-14 dapat mencapai hingga umur 30.000 tahun ⁴⁾.

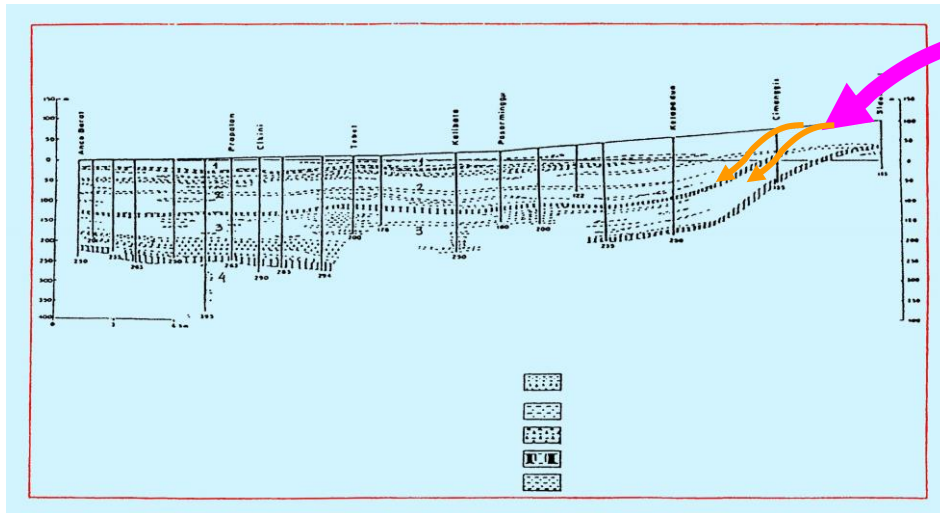
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dan pengembangan teknik isotop air tanah telah dilakukan oleh Batan bekerjasama dengan berbagai institusi pemerintah dan swasta sejak tahun 1985 dengan hasil yang cukup memuaskan. Hasil penelitian tersebut dapat mengungkapkan beberapa informasi ilmiah tentang potensi sumber serta dapat memberikan solusi terbaik dalam pengelolaan air tanah. Teknik isotop memberikan informasi sangat penting yang sebelumnya sangat sulit untuk diungkapkan dengan cara konvensional, misalnya tentang daerah imbuah dan umur air tanah.

a. Air Tanah Jakarta

Hasil studi isotop terhadap air tanah Jakarta memperjelas hasil studi hidrogeologi yang telah dilakukan sebelumnya oleh berbagai institusi tentang kondisi akifer. Isotop memberikan informasi bahwa daerah imbuah air tanah dalam (>60 m) di Jakarta berasal dari sekitar Depok dan tidak menunjukkan indikasi adanya pasokan dari imbuah lokal. Hal tersebut menginformasikan bahwa air tanah dalam daerah Jakarta hanya berasal atau imbuah dari daerah tertentu. Umur air tanah dalam daerah Jakarta tersebut menunjukkan bahwa daerah selatan mempunyai umur lebih muda dari daerah utara. Di daerah selatan umur air tanah berkisar antara 5.000 hingga 10.000 tahun sedangkan di utara berkisar antara 15000 hingga 25000 tahun. Keadaan ini mengindikasikan adanya aliran air tanah yang sangat lambat dari daerah selatan ke utara. Kedua informasi tersebut dapat memberikan indikasi bahwa air tanah dalam yang banyak dipakai untuk keperluan industri di Jakarta mempunyai daerah imbuah yang sangat terbatas dengan umur yang sangat tua. Hal ini menunjukkan air tanah tersebut merupakan air tanah fosil yang tidak berhubungan secara langsung dengan daerah imbuah. Kontur isotop ¹⁴C umur air tanah juga menunjukkan adanya efek eksploitasi dengan memperlihatkan gerakan air tanah yang lebih cenderung cepat ke arah pusat dan utara. Dengan demikian eksploitasi air tanah dalam di Jakarta akan menyebabkan gejala *land subsidence*. Keadaan ini terlihat pada berbagai tempat di Jakarta. Informasi isotop dapat digunakan oleh Pemda DKI Jakarta dalam menetapkan strategi dalam eksploitasi air tanah untuk menghindari penurunan muka air tanah yang sangat cepat misalnya

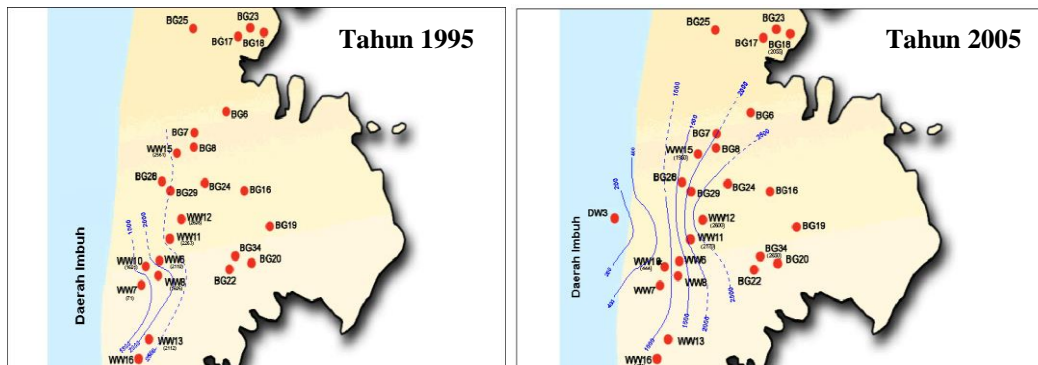
dengan cara reinjeksi air ke dalam sistem akifer. Gambar 2 di bawah ini memperlihatkan penampang lintang geohidrologi air tanah Jakarta dengan daerah imbuhan di sekitar Depok.



Gambar 2. Penampang lintang geohidrologi air tanah Jakarta dengan daerah imbuhan di sekitar Depok

b. Monitoring efek eksploitasi

Teknik isotop telah mendemonstrasikan bahwa monitoring isotop ^{14}C (umur air tanah) dapat digunakan untuk melihat efek eksploitasi sumber air tanah di daerah Bontang Kalimantan Timur. Monitoring isotop ^{14}C dilakukan pada tahun 1995 dan 2005 yaitu pada selang waktu 10 tahun dan hasilnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini;

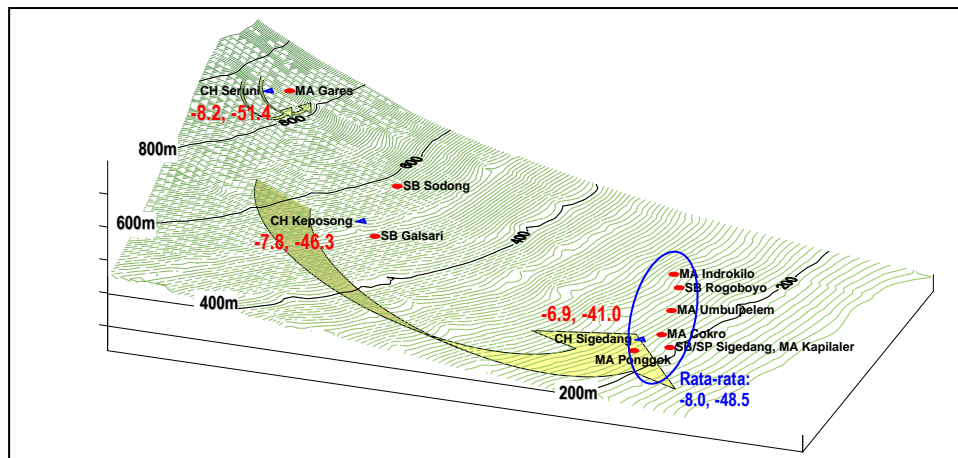


Gambar 3 dan 4. Kontur isotop ^{14}C tahun 1995 dan tahun 2005

Hasil monitoring isotop ^{14}C memperlihatkan bahwa secara umum ada penurunan umur (lebih muda) air tanah antara 200 hingga 500 tahun selama 10 tahun periode eksploitasi. Penurunan umur air tanah mengindikasikan adanya imbuhan air modern (*modern recharge*) yang berasal dari daerah imbuhan yang berjarak sekitar 3-4 km dari daerah eksploitasi. Indikasi tersebut sangat berguna bagi pengelola air tanah agar dalam pelaksanaan eksploitasi dapat dilakukan dengan menggunakan strategi manajemen dalam mengatur operasi sumur⁵⁾.

c. Penentuan Daerah Imbuhan

Studi terpadu geohidrologi, geofisik, dan isotop alam juga dilakukan pada sumber air di daerah Klaten Jawa Tengah terutama untuk mengetahui daerah imbuhan dan potensi sumber air. Hasil analisis isotop ^{18}O dan ^2H air hujan, sumur dalam dan mata air memperlihatkan bahwa sumber air tanah yang berada pada elevasi 200 m di atas permukaan laut (dpl) berasal atau imbuhan dari air hujan yang turun dari elevasi antara 600 – 900 m dpl. Informasi tersebut diperkuat oleh data hasil penelitian umur air tanah dan geofisika yang memperlihatkan bahwa umur air tanah yang relatif tua sekitar 1500 tahun serta adanya lapisan akifer yang mengarah ke elevasi tersebut. Gambar 5 di bawah ini memperlihatkan penampang lintang daerah penelitian dan konsentrasi isotop dari sumber air di sekitarnya.



Gambar 5. Penampang lintang daerah penelitian dan daerah imbuhan air tanah. Gambar di atas memperlihatkan bahwa data isotop dapat menentukan secara langsung dan cepat daerah imbuhan air tanah. Konsentrasi isotop mata air dan sumur bor pada elevasi 210 m dpl mempunyai nilai konsentrasi sama dengan air hujan yang turun pada elevasi antara 500 m

hingga 900 m dpl. Informasi ini sangat bermanfaat bagi pengelola sumber air tanah untuk melakukan upaya konservasi daerah imbuhan agar tetap terpelihara sebagai pasokan air tanah.

KESIMPULAN

Teknik isotop dapat memberikan informasi dengan cepat dan spesifik sebagai sidik jari untuk mengetahui daerah imbuhan dan umur air tanah. Data ini sangat dibutuhkan dalam menopang pengelolaan air tanah dan untuk melakukan upaya konservasi kawasan daerah imbuhan serta *sustainability* sumber air tanah. Hasil penelitian isotop air tanah sangat berguna bagi regulator dalam menetapkan aturan tentang layak atau tidaknya suatu sistem akifer (air tanah) dapat dieksploitasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. FRITZ P. and C. H. FONTES, "Handbook of Environmental Isotope Geochemistry", Elsevier Scientific Publisher Co., vol 1, 1981.
2. PAYNE, B., and Y. YUTSEVER, "Environmental Isotopes as a Hydrological Tool in Nicaragua", Isotope Technique in Groundwater Hydrogeology Vol. 1, 1974.
3. IAEA – Vienna, "Stabel Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle".
4. CLARK, I., FRITZ, P., "Environmental Isotopes in Hydrogeology", Lewis Publisher, 1997.
5. LAPI-ITB., 'Verifikasi Pemakaian Air Bawah Tanah di PT Badak NGL,' laporan Akhir, 1995 & 2005.

Lampiran :

Kerjasama BATAN dengan berbagai Institusi Pemerintah dan Swasta

1. Kerjasama Studi Isotop Air Tanah Jakarta dengan Direktorat Geologi Tata Lingkungan Bandung, tahun 1996.
2. Kerjasama Verifikasi Pemakaian Air Tanah di PT Badak dengan Lapi-ITB dan PT Badak-Kaltim, tahun 1995 dan 2005.
3. Kerjasama Studi Isotop Air Tanah Bangkalan-Madura dengan Pemda Bangkalan Madura, tahun 2001.

4. Kerjasama Studi Isotop Air Tanah Pasuruan-Jatim dengan Dinas Pertambangan Jawa Timur dan Universitas Brawijaya, tahun 2003.
5. Kerjasama Analisis Isotop ^{18}O , D dan ^{14}C Air Tanah Kepulauan Seribu dengan Dinas Pertambangan DKI, tahun 2000.
6. Kerjasama Studi Isotop Air Tanah daerah Klaten Jawa Tengah dengan PT Tirta Investama dan Universitasw Gajah Mada Yogyakarta, tahun 2007.
7. Kerjasama Studi Isotop Air tanah daerah Sukabumi Jawa Barat dengan PT Tirta Investama dan Universitas Pajajaran-Bandung, tahun 2007.