

**STUDI TERHADAP FAKTOR YANG MEMPENGARUHI
KANDUNGAN ISOTOP OKSIGEN-18 DARI SENYAWA
SULFAT TERLARUT DALAM AIR TANAH DANGKAL
DI DAERAH KARAWANG**

E. Ristin Pujiindiyati dan Bungkus Pratikno

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi – BATAN, Jakarta
e-mail : ristinpi@batan.go.id

Diterima 28 September 2009; disetujui 29 Maret 2010

ABSTRAK

STUDI TERHADAP FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KANDUNGAN ISOTOP OKSIGEN-18 DARI SENYAWA SULFAT TERLARUT DALAM AIR TANAH DANGKAL DI DAERAH KARAWANG. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui faktor-faktor yang mempengaruhi kandungan isotop oksigen-18 dalam senyawa sulfat terlarut. Nilai $\delta^{18}\text{O}$ adalah kelimpahan relatif O-18 terhadap O-16 dalam gas CO_2 . Gas CO_2 diperoleh dari hasil kesetimbangan contoh air dengan gas CO_2 murni dan dari hasil reduksi contoh sulfat dengan grafit. Dari hasil penelitian ini diperoleh nilai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) adalah $-3,21$ ‰ hingga $-6,25$ ‰ sedangkan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) adalah $9,64$ ‰ hingga $20,72$ ‰. Variasi yang lebar pada nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) menunjukkan sumber sulfat yang tidak homogen pada air tanah tetapi sebagian besar sulfat air tanah berasal dari pelarutan batuan evaporit laut. Pada titik air sungai Citarum dan air tanah di lokasi Johar menunjukkan penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}). Hal ini mungkin ada kaitannya dengan adanya pasar tradisional di lokasi tersebut. Penurunan nilai ini kemungkinan disebabkan oleh peningkatan proses reduksi sulfat oleh pertumbuhan bakteri anaerobik pada tumpukan sampah organik. Dengan pengeplotan antara nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) dan $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) maka diketahui bahwa sumbangan oksigen dari H_2O dalam pembentukan senyawa sulfat adalah kurang dari 25%. Hal ini menunjukkan air tanah dangkal di daerah Karawang berada dalam suatu zona tak jenuh dan kondisi yang biotik.

Kata kunci : oksigen, isotop, sulfat, air tanah.

ABSTRACT

STUDY OF FACTORS INFLUENCING OXYGEN-18 ISOTOPIC CONTENTS OF DISSOLVED SULPHATE IN THE SHALLOW GROUNDWATER IN KARAWANG AREA. The study was conducted to investigate the factors influencing oxygen-18 isotopic contents of dissolved sulphate in shallow groundwater from Karawang area. The $\delta^{18}\text{O}$ is a relative abundance of O-18 compared to O-16 in CO_2 gas. CO_2 gas was released from the equilibrium between water samples and CO_2 gas, and from the reduction of sulphate samples with graphite. From this investigation, the $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) values were in the range of -3.21 ‰ to -6.25 ‰ whereas the $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) values were 9.64 ‰ to 20.72 ‰. The wide variation of $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) values might be result due to inhomogeneity of sulphate sources in groundwater where the groundwater sulphates were generally derived from the dissolution of marine evaporite rocks. The groundwaters and Citarum River

near waters to Johar site showed lowering of $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) values. It might be related to the present of the tradisional market in this location. The lowering of these values might be due to the increase of the sulphate reduction process caused by anaerobic bacteria growth in organic garbage deposition. Plotting between $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) and $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) exhibited that the oxygen contribution from H_2O to form sulphate was less than 25%. This indicated that the shallow groundwater in Karawang is located in a non-saturated zone and had a biotic condition.

Key words : oxygen, isotope, sulphate, groundwater.

PENDAHULUAN

Karawang secara umum merupakan dataran rendah dengan ketinggian antara 0 hingga 5 m kecuali di bagian selatan yang mempunyai ketinggian mencapai 1200 m. Di sebelah utara berbatasan dengan Laut Jawa, sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Bekasi sebagai kota industri dan sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Subang sebagai terutama daerah pertanian padi. Daerah Karawang dialiri oleh sungai Citarum yang dimanfaatkan untuk pengairan sawah dan sebagai penyedia air bersih [1, 2].

Daerah Karawang adalah daerah yang subur sehingga sangat cocok untuk pertanian padi. Menurut Pemda Karawang, luas Kabupaten Karawang adalah 1753,27 km^2 . Berdasarkan data pada tahun 2000, penggunaan wilayah ini adalah 70% untuk pertanian padi, 2% adalah untuk industri seperti industri kimia, tekstil, permesinan dan elektronik, dan 11% untuk pemukiman [1]. Penggunaan lahan di daerah ini terus berubah yakni dengan semakin meluasnya daerah industri pada 10 tahun terakhir.

Perkembangan daerah industri umumnya diikuti juga dengan timbulnya beberapa masalah seperti dampak lingkungan terhadap air tanah maupun udara. Ketersediaan air minum yang bersih bagi penduduk yang semakin padat juga perlu mendapatkan perhatian. Teknik isotop alam dapat memberikan informasi tentang kondisi lingkungan suatu daerah. Pada dasarnya isotop alam dapat digunakan sebagai perunut (*finger printing*) untuk menentukan asal-usul air tanah, proses kimia yang dialami air tanah dan proses pencampuran dengan sumber air tanah lain [3].

Isotop oksigen-18 dalam senyawa sulfat dapat digunakan untuk merunut asal-usul senyawa sulfat di dalam air tanah. Sifat perunut yang dipunyai isotop tersebut

disebabkan oleh nilai yang sangat spesifik pada kelimpahan relatif isotop berat ^{18}O terhadap isotop ringan ^{16}O dalam suatu sumber sulfat. Kelimpahan relatif kedua isotop ini terhadap suatu standar dinyatakan dengan nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam satuan permill (‰). Salah satu standar yang umum digunakan adalah SMOW (Standard Mean Ocean Water) [3, 4].

Nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa sulfat adalah tertentu dan tidak mengalami perubahan selama berada dalam suatu sumber sulfat yang sangat dominan. Akan tetapi beberapa hal dapat menyebabkan perubahan nilai ini seperti (1). proses pencampuran dengan sumber sulfat lain (misalnya air laut), pelarutan mineral sulfat seperti gipsum, pelepasan gas SO_2 dari kegiatan vulkanik dan industri, (2). pertukaran isotop dan reduksi sulfat yang diikuti oleh oksidasi senyawa sulfida logam. Reaksi pertukaran isotop berjalan sangat lambat pada lingkungan dengan suhu dan pH normal (seperti air tanah pada umumnya) sehingga dapat diabaikan. Reduksi senyawa sulfat dapat berlangsung apabila terdapat bakteri anaerob pereduksi sulfat (misalnya, *Desulfovibrio desulfuricans*). Logam berat dalam sulfida dapat menurunkan nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa sulfat pada air tanah [5, 6].

Nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam H_2O dalam senyawa air pada air tanah umumnya bernilai negatif. Proses yang mempengaruhi variasi nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam H_2O tersebut terutama adalah evaporasi dan pengenceran oleh air meteorik (misalnya, air hujan). Proses evaporasi mengakibatkan pergeseran nilai ke arah positif sedangkan pengenceran mengakibatkan pergeseran nilai ke arah negatif. Proses tersebut akan memberikan kecenderungan titik-titik yang berbeda apabila nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam SO_4^{2-} digambarkan terhadap nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam H_2O . Kecenderungan inilah yang digunakan sebagai dasar menentukan asal senyawa sulfat dan proses yang mempengaruhi nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa sulfat terlarut pada air tanah [3, 6].

Studi ini bertujuan untuk mengetahui faktor-faktor yang dapat mempengaruhi komposisi nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa sulfat pada air tanah dangkal dan air sungai Citarum di daerah Karawang dalam upaya merunut sumber pencemaran sulfat dalam air tanah dan air sungai.

TATA KERJA

Bahan dan alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah N₂ cair; grafit, aseton, BaCl₂, NaCl, HgCl₂, Jakarta Water Standard, resin penukar ion Cl⁻ (Dowex 50-100 mesh), HCl, gas CO₂ murni 99,9%, kertas saring *milipore* 0,25 μm.

Alat yang digunakan adalah alur penyiapan sulfat, lempeng platina, Isogas Isoprep-18 line, spektrometer massa Sira 9 VG Isogas, spektrofotometer UV-VIS, *Cryocool immersion cooler* CC-100 II, pH meter, kolom gelas (d = 28 mm, t = 200 mm).

Pengambilan air tanah dangkal dan air sungai Citarum di daerah Karawang

Contoh air tanah dangkal diambil dari sumur pompa atau sumur gali penduduk pada kedalaman 8 m hingga 40 m sedangkan contoh air sungai Citarum diambil pada permukaan. Contoh air diambil sebanyak 20 mL untuk analisis δ ¹⁸O dalam H₂O, 1 L untuk analisis konsentrasi sulfat dan 20 L untuk analisis δ ¹⁸O dalam SO₄²⁻. Larutan HgCl₂ secukupnya ditambahkan pada contoh air kemasan 1 L dan 20 L untuk mencegah aktivitas bakteri. Untuk analisis δ ¹⁸O dalam H₂O botol gelas harus terisi penuh dan tertutup rapat sehingga tidak ada gelembung di dalamnya. Pengambilan contoh dilakukan pada musim kemarau bulan Juni, Juli, Agustus 2002. Peta lokasi pengambilan contoh disajikan pada Gambar 1, serta diberi tanda *. Analisis isotop ¹⁸O dan kandungan sulfat dilakukan di laboratorium Hidrologi - Bidang Kebumihan dan Lingkungan, Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi -BATAN.

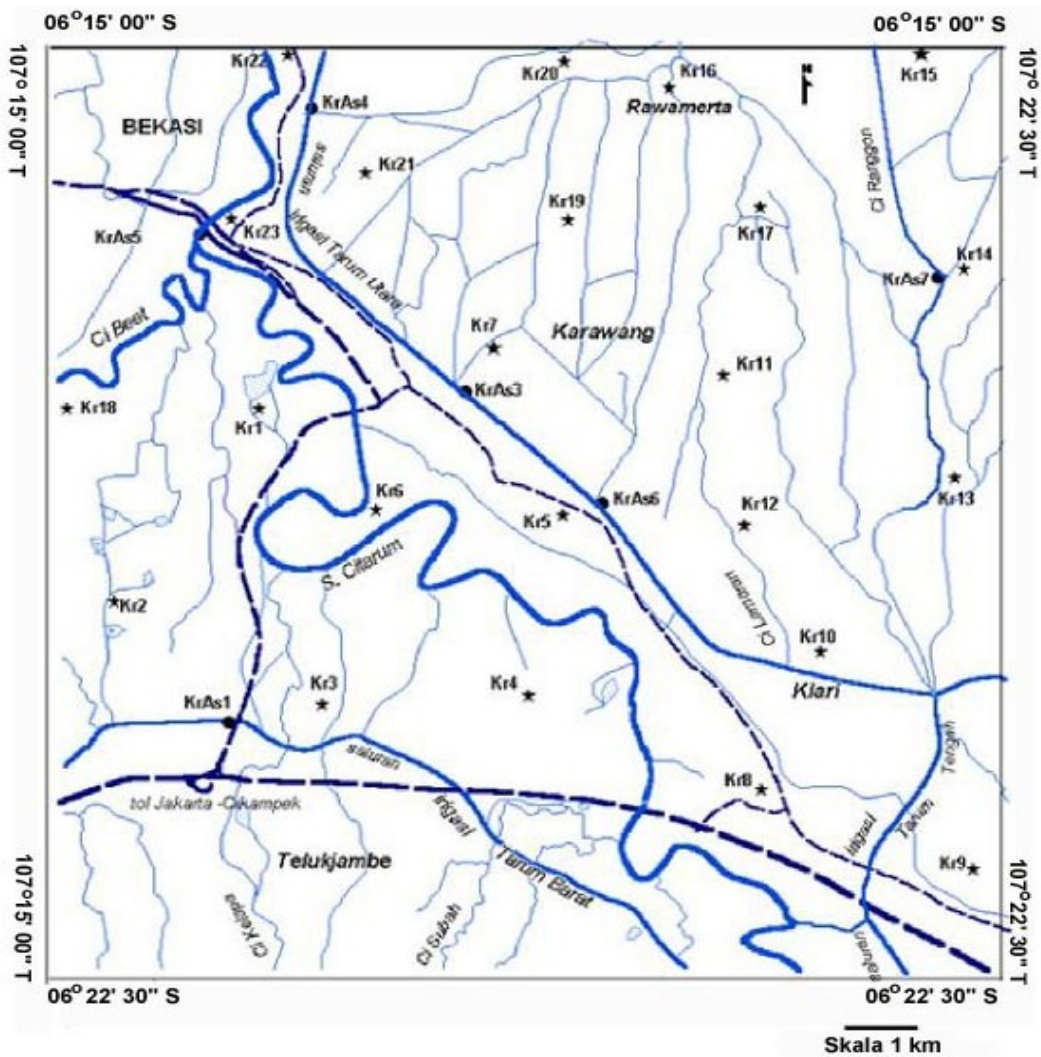
Analisis konsentrasi sulfat

Analisis konsentrasi sulfat dilakukan dengan pengukuran absorbansi larutan pada panjang gelombang 420 nm dengan alat spektrometer UV-Vis [7].

Analisis rasio isotop ¹⁸O/¹⁶O dalam senyawa sulfat

Metode yang digunakan adalah metode Rafter yakni dengan pengukuran kelimpahan isotop ¹⁸O terhadap ¹⁶O pada gas CO₂ hasil reduksi contoh senyawa sulfat dengan grafit. [8]. Contoh air dengan konsentrasi sulfat rendah perlu dilakukan pemekatan menggunakan resin penukar ion. Kolom diisi dengan resin penukar ion Cl⁻,

dikondisikan dengan pengaliran HCl 6N kemudian 300 ml aquades. Contoh air diialirkan ke dalam kolom. Sebanyak 300 ml NaCl 1 M dialirkan untuk melarutkan ion sulfat. Larutan diatur pada pH 3-4 kemudian dipanaskan. Larutan BaCl₂ ditambahkan sehingga terbentuk endapan BaSO₄.



Gambar 1. Lokasi pengambilan air tanah dan air sungai Citarum, Karawang

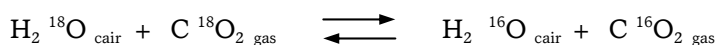
Sekitar 50 mg BaSO₄ dicampur dengan 50 mg grafit kemudian diletakkan dalam lempeng platina. Campuran dibakar pada kondisi vakum dengan suhu 1200 °C dalam alat alur penyiapan sulfat. Reaksi reduksi sulfat adalah sebagai berikut:



Uap air dari pembakaran grafit dan BaSO₄ dibekukan pada suhu aseton yang tercelup pada alat *cryocool* (-70 °C) sedangkan gas CO dan CO₂ dialirkan ke tabung *discharge* yang tercelup pada suhu N₂ cair (-196 °C). Dengan mengalirkan arus listrik tegangan tinggi 1,2 kV pada kedua lempeng platina maka gas CO dioksidasi menjadi gas CO₂. Gas CO₂ diinjeksikan ke spektrometer massa untuk pengukuran kelimpahan massa 46 (isotop ¹⁸O) terhadap massa 45 (isotop ¹⁶O).

Analisis rasio isotop ¹⁸O/¹⁶O dalam air

Metode yang digunakan adalah metode Epstein Mayeda, yakni dengan pengukuran kelimpahan relatif isotop ¹⁸O terhadap ¹⁶O dalam gas CO₂ hasil kesetimbangan contoh air [9]. Sebanyak 2 mL air dimasukkan ke dalam tabung reaksi kemudian dilekatkan pada alat *Isoprep-18*. Alat ini dapat dimuati sebanyak 22 contoh air dan 2 standar kerja. Seluruh tabung divakumkan kemudian dialiri gas CO₂ dan dikocok selama 10 jam agar terjadi kesetimbangan. Reaksi kesetimbangan yang terjadi adalah sebagai berikut:



Gas CO₂ hasil kesetimbangan dialirkan ke dalam alat spektrometer massa *SIRA-9 Isogas* untuk pengukuran kelimpahan massa 46 terhadap massa 45.

Penentuan nilai δ ¹⁸O

Kelimpahan relatif isotop dinyatakan dengan nilai δ (delta) dalam satuan per mil (‰) dan didefinisikan dengan persamaan:

$$\delta \text{ } ^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{contoh}}}{R_{\text{standar}}} - 1 \right) \times 10^3$$

Notasi R adalah kelimpahan isotop $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Standar internasional yang digunakan adalah air laut rata-rata atau SMOW (Standard Mean Ocean Water) [3,4].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi pengambilan contoh dan kedalaman air sumur dan air sungai pada penelitian ini seperti tertera pada Tabel 1. Hasil analisis kandungan sulfat dan nilai δ ^{18}O dalam senyawa sulfat dan air seperti tertera pada Tabel 2.

Tabel 1. Lokasi pengambilan contoh dan kedalaman sumur

No	Kode	Lokasi	Kedalaman (m)
1	Kr-1	Resinda-Purwadana	40
2	Kr-2	Karangligar-Margamulya	40
3	Kr-3	Per.Teluk Jame-Sukaharjo	12
4	Kr-4	Sukadana-Telukjambe	17
5	Kr-5	Johar Barat-Adiarsa	20
6	Kr-6	Poponcol kaler-Karangkulon	16
7	Kr-7	Kepuh Karang Pawitan	10
8	Kr-8	Sukamulya- Ds. Anggadita	8
9	Kr-9	Kosambi2-Ds Duren	12
10	Kr-10	Citrakebunmas-Ds. Bangle	16
11	Kr-11	Gebangjaya-Ds.Plawad	16
12	Kr-12	Tumelangraya-Ds.Margasari	10
13	Kr-13	Masjid-Ds.Majalaya	10
14	Kr-15	Sumurbatu-Ds.Sukamerta	15
15	Kr-16	Bojongloa-Ds.Tegalsawah	30
16	Kr-17	Panglay-Ds.Plawad	10
17	Kr-18	Rengas10-Ds.Parungsari	12
18	Kr-19	Kiaralawang-DsKarang.Pawitan	8
19	Kr-20	Krajan-Ds.Purwamekar	40
20	Kr-21	Jatimulya1-Ds. Tunggakjati	10
21	Kr-22	Jatiilir2-Ds. Tunggakjati	16
22	Kr-23	Kaum-Ds.Kedunggede	16
23	Kr-As1	Cisalak Utara	permukaan
24	Kr-As3	Karang pawitan	permukaan
25	Kr-As5	Bekasi	permukaan
26	Kr-As6	Johar Timur	permukaan
27	Kr-As7	Ciranggon	permukaan

Kandungan sulfat pada air tanah dangkal bervariasi dari 12 ppm hingga 293 ppm sedangkan air sungai Citarum menunjukkan kandungan sulfat yang seragam yakni sekitar 29 ppm, seperti terlihat pada Tabel 2. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI No: 416/MENKES/PER/IX/1990, ambang batas senyawa sulfat yang diijinkan dalam air minum adalah 400 ppm. Semua contoh air tanah dangkal dan air sungai Citarum daerah Karawang menunjukkan kandungan sulfat di bawah ambang batas untuk air minum. Rendahnya kandungan sulfat tersebut disebabkan pengenceran oleh air hujan. Pada umumnya air tanah dangkal daerah Karawang merupakan tipe NaHCO_3 atau air segar tetapi sebagian menunjukkan adanya pelarutan mineral gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Contoh air sungai Citarum menunjukkan tipe air NaHCO_3 [10].

Tabel 2. Data nilai $\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-})$, $\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ dan konsentrasi sulfat

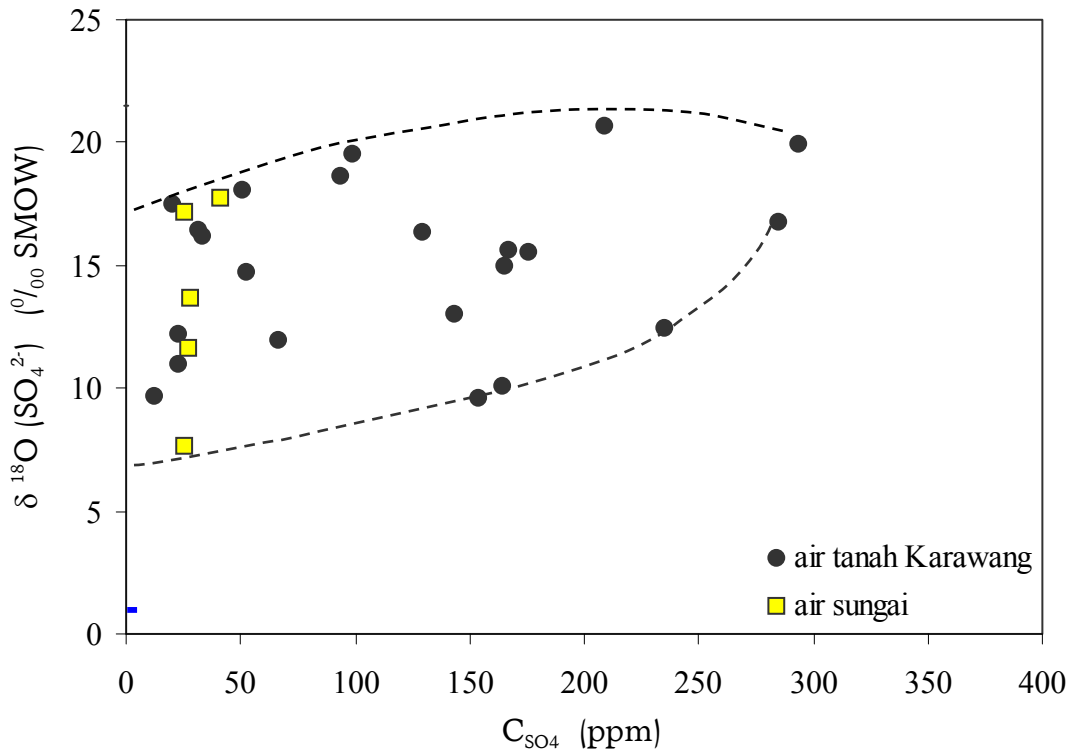
No.	Kode	$\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-})$ (‰ SMOW)	$\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ (‰ SMOW)	$[\text{SO}_4^{2-}]$ (ppm)
1	Kr-1	18,06	-3,63	50,92
2	Kr-2	16,43	-5,10	31,57
3	Kr-3	18,67	-4,66	93,47
4	Kr-4	12,20	-5,41	22,92
5	Kr-5	9,64	-4,70	153,85
6	Kr-6	11,00	-5,10	22,53
7	Kr-7	10,06	-5,75	163,79
8	Kr-8	9,73	-3,82	12,4
9	Kr-9	14,77	-3,80	52,35
10	Kr-10	15,00	-3,94	164,72
11	Kr-11	19,53	-3,21	99,03
12	Kr-12	16,40	-5,84	128,98
13	Kr-13	16,21	-3,48	32,85
14	Kr-15	13,00	-3,98	143,59
15	Kr-16	15,57	-3,70	175,41
16	Kr-17	12,45	-4,64	234,66
17	Kr-18	19,99	-5,80	293,08
18	Kr-19	15,68	-5,36	166,9
19	Kr-20	17,54	-5,86	20,46
20	Kr-21	20,72	-5,00	208,86
21	Kr-22	16,81	-6,25	285
22	Kr-23	11,96	-5,99	65,98
23	Kr-As-1	11,65	-7,97	27,08
24	Kr-As-3	17,20	-5,68	25,16
25	Kr-As-5	17,78	-7,41	41,18
26	Kr-As-6	7,61	-5,79	25,16
27	Kr-As-7	13,67	-6,64	27,72

Kelimpahan relatif isotop oksigen-18 dalam senyawa air atau ditulis sebagai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) untuk air tanah dangkal menunjukkan variasi antara $-3,21$ ‰ hingga $-6,25$ ‰ sedangkan $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) pada air sungai berkisar $-5,68$ ‰ sampai $-7,97$ ‰. Kisaran nilai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) pada air sungai menunjukkan variasi yang lebih sempit daripada air tanah. Pergeseran nilai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) ke arah positif atau lebih diperkaya pada air tanah menunjukkan adanya proses pencampuran dengan air permukaan yang mempunyai nilai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) lebih diperkaya karena penguapan [3]. Pengkayaan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (H_2O) ini disebabkan pengambilan contoh dilakukan pada musim kemarau sehingga proses penguapan pada air permukaan lebih tinggi. Air permukaan yang menginfiltrasi kemungkinan berasal dari saluran-saluran irigasi di area persawahan, empang (kolam) dan rawa-rawa. Keadaan ini sejalan dengan data dari Pemda Karawang, yang menyatakan bahwa 17% dari luas area $1753,27$ km² Kabupaten Karawang masih berupa rawa-rawa, empang dan padang rumput [1].

Kelimpahan relatif isotop oksigen-18 dalam senyawa sulfat atau ditulis sebagai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) untuk air tanah dangkal Karawang bervariasi dari $9,64$ ‰ hingga $20,72$ ‰. Air sungai Citarum mempunyai nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) $11,65$ hingga $17,78$ ‰ kecuali KrAs-6 dengan nilai lebih rendah yaitu $7,61$ ‰. Nampak jelas bahwa kisaran nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) pada air tanah dangkal lebih lebar daripada air sungai. Hal ini disebabkan senyawa sulfat dalam air tanah mempunyai waktu tinggal yang lebih lama sehingga mengalami proses pencampuran dengan sumber sulfat yang berbeda. Selain itu, waktu tinggal senyawa sulfat yang lama dalam air tanah memungkinkan terjadi reaksi redoks dan reaksi pertukaran isotop oksigennya dengan senyawa lain seperti H_2O dan CO_3^{2-} . Pada Gambar 2, nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) rendah lebih tersebar pada contoh dengan konsentrasi sulfat rendah, kemudian distribusi titik data mengerucut ke nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) lebih tinggi pada contoh dengan konsentrasi sulfat tinggi. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya pengenceran yang tetap terhadap konsentrasi sulfat oleh aliran sungai S. Citarum.

Variasi dari nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) yang lebar kemungkinan juga disebabkan oleh kandungan isotop oksigen yang tidak homogen dari tiap sumber sulfat. Kondisi fisik

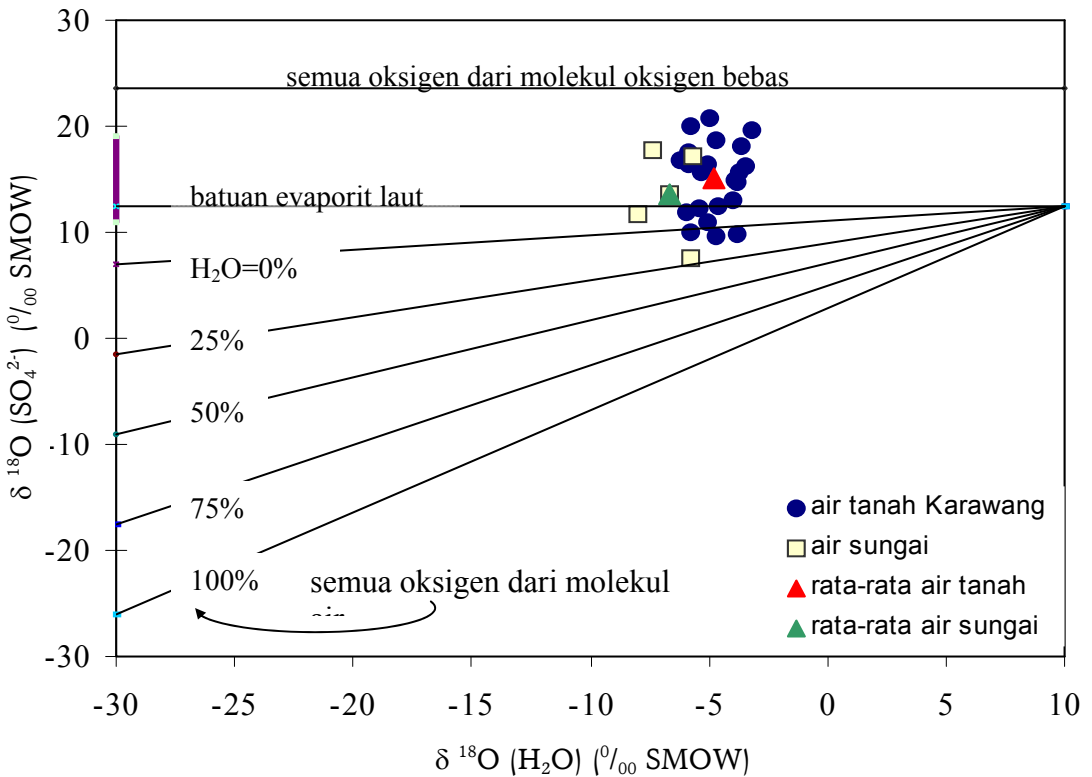
dan kimia air juga turut mempengaruhi laju pertukaran isotop dalam senyawa sulfat. Laju reaksi pertukaran isotop oksigen dalam sulfat dan air akan semakin cepat pada suhu tinggi dan pH rendah.



Gambar 2. Variasi nilai $\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-})$ terhadap konsentrasi sulfat terlarut dalam air tanah dangkal dan air sungai Citarum di daerah Karawang

Sulfat dalam air tanah dapat berasal dari pelarutan mineral sulfat seperti gypsum dan pupuk; dari senyawa sulfur dalam air hujan akibat gas buang industri dan kendaraan bermotor; dari oksidasi mineral sulfida atau sulfur organik. Proses intrusi sulfat air laut ke air tanah dangkal juga dimungkinkan karena di sebelah utara daerah Karawang berbatasan dengan laut Jawa. Pemakaian air tanah yang berlebihan oleh industri akan meningkatkan laju intrusi oleh air laut ke air tanah. Pemakaian pupuk sulfat seperti ZA (Amonium Sulfat) di daerah Karawang sebagai daerah pertanian

adalah sebanyak 50 kg per hektar area. Bahan kimia dalam pupuk tersebut kemungkinan hanya 50% saja yang terserap oleh tanaman dan sisanya mengikuti sistem aliran air tanah [1].



Gambar 3. Nilai $\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4^{2-})$ terhadap nilai $\delta^{18}\text{O} (\text{H}_2\text{O})$ pada air tanah dangkal dan air sungai Citarum di daerah Karawang

Untuk mengetahui proses atau reaksi yang mempengaruhi distribusi isotop oksigen dalam sulfat, maka dilakukan plot nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa sulfat terlarut yang dihubungkan dengan nilai $\delta^{18}\text{O}$ dalam senyawa air. Gambar 3 memperlihatkan sebaran contoh air tanah dangkal dan air sungai Citarum di daerah Karawang. Pergerakan titik-titik data tersebut cenderung ke arah vertikal daripada ke arah horizontal. Pergerakan horizontal menunjukkan adanya faktor penguapan (ke arah

positif) dan pengenceran air hujan (ke arah negatif). Distribusi titik data ke arah vertikal sebagian besar terkumpul pada kisaran nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) untuk batuan evaporit laut (berupa gypsum dan anhidrit) yaitu 10 ‰ hingga 17 ‰ [5]. Hal ini menunjukkan bahwa adanya pelarutan batuan sulfat evaporit dari laut yang sangat dominan. Kenyataan ini dapat dimengerti karena daerah Karawang merupakan daerah pantai yang pembentukan endapan permukaan dan bawah permukaan dipengaruhi oleh pelarutan batuan dari laut. Geologi permukaan cekungan Karawang pada umumnya terdiri atas alluvium (berupa lempung, pasir, kerikil, kerakal dan bongkahan yang meliputi endapan pantai, endapan sungai dan rawa) dan endapan pematang pantai yang diduga pembentukannya berasal dari lingkungan laut [2].

Nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) pada contoh air tanah Kr-5 dan Kr-8, dan air sungai KrAs-6 menunjukkan pelebaran ke arah yang lebih rendah dari batuan evaporit laut asal. Hal ini menunjukkan ada kemungkinan proses reduksi senyawa sulfat laut asal yang diikuti oleh oksidasi senyawa sulfida maupun sulfur organik. Titik Kr-5 dan KrAs-6 terletak pada lokasi berdekatan dan terletak di lokasi pasar tradisional yang cukup besar. Secara visual contoh air sungai di lokasi KrAs-6 terlihat agak kehitaman, kemungkinan warna ini disebabkan oleh asam humus yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik. Tingginya kadar senyawa karbon dari bahan organik terlarut menimbulkan peningkatan mikroorganisme anaerobik yang berperan dalam fraksinasi isotop pada senyawa sulfat. Ada kemungkinan limbah organik dari kegiatan pasar tradisional turut mempengaruhi penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) pada air sungai dan air tanah. Sebagai perbandingan, air lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bantar Gebang menunjukkan penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) sebesar 6,46 ‰ [11]. Selain itu penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO_4^{2-}) juga dapat dipengaruhi oleh banyaknya sulfida logam (seperti; Fe, Zn, Cu, Pb, U) yang dapat teroksidasi menjadi senyawa sulfat [6].

Kemungkinan terjadi reaksi oksidasi senyawa sulfida untuk pembentukan senyawa sulfat, dapat dilihat pada persentase molekul H_2O seperti terlihat pada Gambar 3. Air tanah dangkal dan sungai Citarum di daerah Karawang menunjukkan sumbangan oksigen dari molekul H_2O untuk membentuk senyawa senyawa sulfat adalah kurang dari 25 % dan sisanya berasal dari oksigen dalam molekul oksigen bebas

(O₂) di atmosfer. Air tanah dan air sungai tersebut pada umumnya menggambarkan kondisi yang biotik dan berada pada zona tak jenuh (*non-saturated zone*) dimana tekanan air sama dengan tekanan atmosfer. Sebaliknya, untuk air tanah yang berada pada kondisi jenuh (*saturated*) dan abiotik, persentase H₂O berkisar antara 25% hingga 75% [3].

KESIMPULAN

Nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄²⁻) pada air tanah umumnya menunjukkan adanya pelarutan batuan sulfat evaporit dari laut. Hal ini disebabkan pembentukan endapan permukaan dan bawah permukaan cekungan Karawang dipengaruhi oleh pelarutan batuan dari laut. Pada titik air sungai dan air tanah di lokasi Johar menunjukkan penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄²⁻). Ditemukannya limbah organik dari kegiatan pasar tradisional diduga menyebabkan peningkatan proses reduksi sulfat oleh bakteri anaerobik. Selanjutnya peningkatan proses reduksi sulfat inilah yang mengakibatkan penurunan nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄²⁻).

Dengan pengeplotan antara nilai $\delta^{18}\text{O}$ (SO₄²⁻) dan $\delta^{18}\text{O}$ (H₂O) maka diketahui bahwa sumbangan oksigen dari H₂O dalam pembentukan senyawa sulfat adalah kurang dari 25% dan sisanya berasal dari oksigen dalam molekul O₂ di atmosfer. Hal ini menunjukkan air tanah dangkal di daerah Karawang berada dalam suatu zona tak jenuh serta berkondisi yang biotik.

DAFTAR PUSTAKA

1. PEMDA KARAWANG, "Karawang dalam Angka", Pusat Statistik Kabupaten Karawang, 10-15 (2000).
2. PASARIBU, M., SUNGKOWO, W., "Peta Hidrogeologi Indonesia 1:100.000. Catatan penerangan Lembar 1209-5 Karawang dan 1210-2 Sedari., Departemen Pertambangan dan Energi - Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral, Bandung, 19-20 (1999).
3. CLARK, I.D., FRITZ, P., "Environmental Isotopes in Hydrogeology", Lewis publishers. Boca Raton - New York, 138-148 (1997).

-
4. WILLEM G.M., "Environmental Isotopes in Hydrological Cycle: Introduction, Theory and Methods Review (W.G Mook, Ed)", IAEA - Unesco. Paris, 49-51 (2000).
 5. MEBUS GEYH., "Environmental Isotopes in Hydrological Cycle: Groundwater, Saturated and Unsaturated zone (W.G Mook, Ed)", IAEA - Unesco. Paris 79-88 (2000).
 6. VAN EVERDINGEN, R.O and KROUSE, H.R., Isotope composition of sulphates generated by bacterial and abiological oxidation, *Nature.*, **315**, 345-346 (1985)
 7. BADAN STANDARISASI NASIONAL., Metode pengujian sulfat dalam air dengan alat spektrofotometer, *In: Standar Nasional Indonesia 06-2426-1991*, Badan Standarisasi Nasional (1991).
 8. RAFTER, T.A., A method for the extraction of oxygen and its quantitative conversion to carbon dioxide for isotope radiation measurements, *New Zealand Journal of Science*, **10**, 493-510 (1967).
 9. EPSTEIN, S and MAYEDA, T.K., Variation of ^{18}O content of waters from natural sources., *Geochim. Cosmochim Acta*, **4**, 213-224 (1953).
 10. RISTIN PUJIINDIYATI, E., Penggunaan program Aquachem untuk pengolahan data geokimia air sungai Citarum dan air tanah dangkal di daerah Karawang., *Sigma*, **9** (2), 107-118 (2006).
 11. RISTIN PUJIINDIYATI, E., SYAFALNI., Study of sulphate origin in shallow groundwater in the vicinity of Bantar Gebang landfill using sulphur-34 and oxygen-18, *Atom Indonesia*, **33** (2), 117-127 (2007).