

Studi Intrusi Air Laut di Tegal - Jawa Tengah Menggunakan Isotop Stabil Oksigen-18 (^{18}O) dan Deuterium (^2H)

Seawater Intrusion Study in Tegal-Central Java Using Stable Isotopes of Oxygen-18 (^{18}O) and Deuterium (^2H)

H. S. Wati^{1*}, E. Rayhana¹, B. Pratikno²

¹ Fakultas Sains dan Teknologi Informasi, Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moh Kahfi II, Srengseng Sawah, Jagakarsa, Jakarta 12630, Indonesia

² Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440, Indonesia

* E-mail : hikmah_setiaw@yahoo.co.id

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian intrusi air laut di kota Tegal-Jawa Tengah menggunakan metode isotop stabil oksigen-18 dan deuterium. Studi dilakukan dengan mengambil contoh air tanah dari sumur bor dengan kedalaman antara 1 m sampai dengan 60 m di beberapa wilayah kecamatan di sekitar Kota Tegal. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui kemungkinan telah terjadinya intrusi dan kualitas air tanah di kota Tegal berdasarkan analisis kelimpahan relatif isotop oksigen-18 dan deuterium dalam air dan parameter lain yang dapat menjadi data dukungannya yaitu kadar klorida, dan pH. Berdasarkan hasil analisis telah terindikasi adanya intrusi air laut pada beberapa lokasi antara lain di titik sampling T1 jalan sangir kelurahan Mintragen kecamatan Tegal Timur yang berjarak $\pm 420\text{m}$ dari garis pantai, kemudian di titik T2 yaitu di kantor PLN UPJ Tegal di kelurahan Mintragen, kecamatan Tegal Timur yang berjarak ± 545 dari garis pantai dan di lokasi T3 di jalan Karimun Jawa 2, kelurahan Mintragen kecamatan Tegal Timur yang berjarak $\pm 685\text{m}$ dari garis pantai, sedangkan pada jarak yang lebih dari 700 m tidak terindikasi adanya intrusi.

Kata kunci: oksigen-18, deuterium, pH, kadar klorida

ABSTRACT

Seawater intrusion research has been conducted in the city of Tegal-Central Java using the stable isotope method of oxygen-18 and deuterium. The study was conducted by taking groundwater samples from boreholes with depths ranging from 8 m to 60 m in several districts around the City of Tegal. The purpose of this study is to determine the possibility of intrusion and to know the quality of ground water in the city of Tegal, based on an analysis of the relative abundance of isotopes of oxygen-18 and deuterium in water, and other parameters that can be supporting data, namely chloride levels, and pH. Based on the results of the analysis, there were indications of sea water intrusion in several locations, among others at the sampling point T1, sangir road, Mintragen sub-district, East Tegal sub-district, which is $\pm 420\text{m}$ from the coastline, then at point T2, namely the PLN office of UPJ Tegal in Mintragen sub-district, East Tegal sub-district which is ± 545 from the coastline and at location T3 on Jalan Karimun Jawa 2, Mintragen sub-district, East Tegal sub-district which is $\pm 685\text{m}$ from the coastline, while at a distance of more than 700 m intrusion is not indicated.

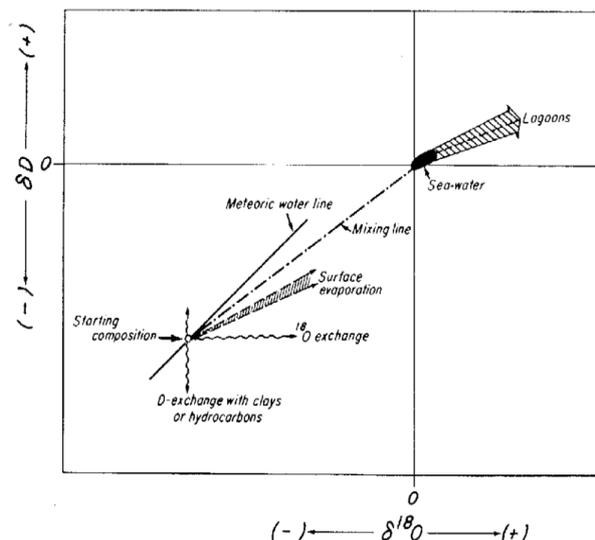
Keywords: relative abundance, oxygen-18, deuterium, pH, chloride level

PENDAHULUAN

Kota Tegal terletak di antara $109^{\circ}08'$ - $109^{\circ}10'$ Bujur Timur dan $6^{\circ}50'$ - $6^{\circ}53'$ Lintang Selatan, dengan wilayah seluas 39,68 km² atau kurang lebih 3.968 hektar. Kota Tegal berada di wilayah pantai utara, dari peta orientasi Provinsi Jawa Tengah berada di wilayah barat dengan bentang terjauh utara ke selatan 6,7 km dan barat ke timur 9,7 Km. Dilihat dari letak geografis, posisi kota Tegal sangat strategis sebagai penghubung jalur perekonomian lintas nasional dan regional di wilayah pantai Utara Jawa (Pantura) yaitu dari barat ke timur (Jakarta-Tegal-Semarang-Surabaya) dengan wilayah tengah dan selatan Pulau Jawa (Jakarta-Tegal-Purwokerto-Yogyakarta-Surabaya) dan sebaliknya [1]. Oleh karena itu banyak terdapat industri di sekitar kawasan pantai utara kota Tegal. Keberadaan industri-industri besar yang berlokasi di sekitar pantai utara, ditambah lagi dengan meningkatnya pemukiman warga yang semakin padat serta pertumbuhan kawasan perkantoran di sepanjang kota Tegal, telah meningkatkan pula kebutuhan air bersihnya. Meningkatnya pemanfaatan air bersih yang umumnya berasal dari sumur bor, jelas akan meningkatkan volume air yang digunakan, dengan kata lain eksploitasi air tanah semakin bertambah. Eksploitasi air tanah yang berlebihan akan menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan sekitar seperti di antaranya dapat terjadi penurunan muka air tanah terus-menerus dan pengurangan potensi air tanah di dalam akuifer. Hal ini akan memicu terjadinya dampak negatif seperti intrusi air laut, penurunan kualitas air tanah, dan penurunan tanah [2].

Berdasarkan analisa dampak lingkungan seperti tersebut, maka perlu dilakukan penelitian tentang air tanah, yang dalam makalah ini dititikberatkan pada kemungkinan terjadinya intrusi air laut ke daratan pantai kota Tegal. Penentuan lokasi daerah penelitian dilakukan berdasarkan tingkat kepadatan penduduk dan industri yang tersebar di wilayah kota Tegal, Jawa Tengah.

Berdasarkan literatur yang ada bahwa keterhubungan satu air tanah dengan sumber air tanah lainnya dapat diketahui dengan menggunakan metode isotop stabil, yaitu isotop deuterium (²H) dan isotop oksigen-18 (¹⁸O) yang terkandung dalam molekul air (H₂O), sedangkan analisis kimia air tanah dilakukan untuk mengetahui kualitas dan *fasies* air tanah [3].



Gambar 1. Karakteristik isotop stabil air tanah

Seperti tampak pada Gambar 1., air tanah yang mengalami pencampuran atau *mixing* dengan air laut maka akan mengalami pengkayaan komposisi isotopnya dan berada di sepanjang garis pencampuran (*mixing line*), sedangkan jika mengalami penguapan (*evaporation*) air tanah akan mengalami pengkayaan dan akan berada di sepanjang garis evaporasi.

METODOLOGI

Dalam penelitian ini menggunakan metode isotop stabil ¹⁸O dan ²H dengan didukung indikator lain yaitu kadar klorida air tanah, konduktivitas listrik dan derajat keasaman.

Isotop ¹⁸O dan ²H

Isotop oksigen-18 (¹⁸O) dan deuterium (²H) merupakan isotop alam yang telah banyak digunakan dalam pemecahan masalah manajemen sumber daya air tanah. Hal ini karena adanya proses yang lebih rinci dalam senyawa kimia yaitu fraksinasi isotop antara isotop lebih ringan (¹⁶O dan ¹H) dan isotop lebih berat (¹⁸O dan ²H). Efek fraksinasi isotop ini memberikan komposisi perbandingan isotop berat terhadap isotop ringan yang khas pada senyawa air (H₂O). Kelimpahan relatif kedua isotop ini terhadap suatu standar dinyatakan dengan nilai $\delta^{18}\text{O}$ untuk oksigen dan $\delta^{2}\text{H}$ untuk hidrogen dalam satuan per mill. Oksigen-18 merupakan isotop stabil dari oksigen, selain oksigen-16 dan oksigen-17. Banyaknya oksigen-18 yang ada di alam adalah sebesar 0,2%. Komposisi rasio isotop $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^{2}\text{H}$ selalu diacu

terhadap standar internasional air laut diseluruh dunia yang sudah disepakati secara internasional disebut *Standard Mean Ocean Water* (SMOW) yang mempunyai nilai $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 0 \text{ ‰}$ dan $\delta^2\text{H}_{\text{SMOW}} = 0 \text{ ‰}$ [5],[6].

Kelimpahan relatif isotop dalam molekul air dituliskan $\delta^2\text{H}$ (atau δD) untuk deuterium dan $\delta^{18}\text{O}$ untuk oksigen-18 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\delta = \frac{RS-RST}{RST} \times 1000\text{‰} \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta\text{D}\text{‰} = \frac{(D/H)_{\text{SAMPSEL}} - (D/H)_{\text{SMOW}}}{(D/H)_{\text{SMOW}}} \times 1000 \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SAMPSEL}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \times 1000 \dots\dots\dots (3)$$

Dengan:

δ = nilai kelimpahan relatif isotop, dinyatakan dalam satuan permil (‰)

Rs = Rasio isotop sampel

Rst = Rasio isotop standar

Jika nilai δ pada sampel menunjukkan nilai negatif maka kelimpahan relatif isotop sampel lebih kecil dari standar. Sedangkan nilai positif maka kelimpahan relatif isotopnya lebih besar dari standar [7].

Kelimpahan isotop air tanah dapat pula digunakan dalam penentuan genesis air tanah. Pada penentuan asal-usul air tanah, biasanya dilakukan dengan melihat nilai δD dan $\delta^{18}\text{O}$ pada dua titik sampel air yang diteliti yang keduanya berada pada Daerah Aliran Sungai (DAS) yang sama. Jika nilai kelimpahan relatif isotopnya baik O-18 dan deuterium kedua sampel tersebut sama, maka dapat diindikasikan bahwa kedua sampel air tersebut berasal dari sumber yang sama [8].

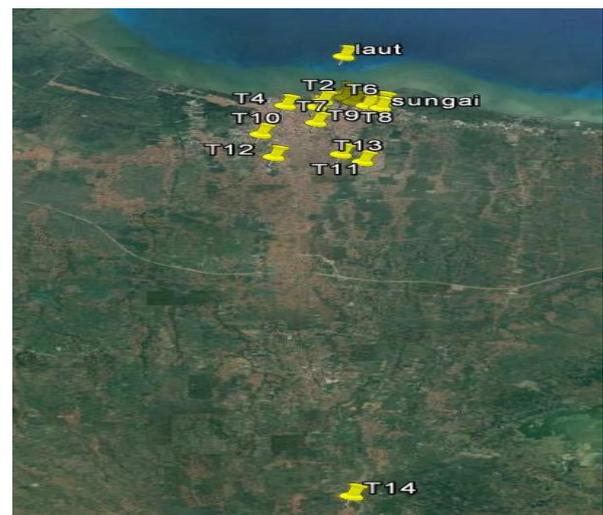
Lokasi pengambilan sampel

Dalam penelitian ini lokasi pengambilan sampel ditentukan di dataran pantai kota Tegal, kecamatan Tegal Barat, kecamatan Tegal Timur, kecamatan Tegal Selatan, kecamatan Kramat dan kecamatan Lebaksiu. Lokasi penelitian ini berada pada $6^{\circ}45'41''\text{S}$ dan $109^{\circ}09'44''\text{E}$ hingga $7^{\circ}02'24''\text{S}$ dan $109^{\circ}08'47''\text{E}$. Daerah penelitian dipilih berdasarkan pada pertimbangan bahwa daerah tersebut mengalami peningkatan pembangunan industri yang pesat serta jumlah penduduk yang relatif padat. Sampel air yang

diambil umumnya merupakan air tanah dangkal dengan kedalaman kurang dari 20 meter, sesuai dengan kedalaman air di rumah-rumah penduduk pada umumnya.

Tabel 1. Lokasi pengambilan sampel

Kode	Lokasi	Koordinat	
Laut	Laut Tegal	6°45'41"S	109°09'44"E
Sungai	Kali Ketiwon	6°51'34"S	109°09'11"E
T1	Jl. Sangir	6°51'06"S	109°08'38"E
T2	PLN UPJ Tegal	6°51'19"S	109°08'19"E
T3	Jl. Karimun Jawa 2	6°51'13"S	109°08'37"E
T4	Sanggar Pramuka	6°51'27"S	109°07'47"E
T5	Jl. Seram	6°51'22"S	109°08'46"E
T6	SD Panggung 8	6°51'29"S	109°08'58"E
T7	Yayasan Tridarma	6°51'30"S	109°08'14"E
T8	Jl. Dampyak	6°51'24"S	109°09'11"E
T9	Masjid Agung Tegal	6°51'59"S	109°08'14"E
T10	Jl. Kopol Suprpto	6°52'19"S	109°07'26"E
T11	SMP Ihsaniyah	6°52'57"S	109°08'36"E
T12	SD Debong Tengah 1	6°53'00"S	109°07'38"E
T13	SPBU Mejasem Barat	6°53'11"S	109°08'55"E
T14	Desa Kajen Lebaksiu	7°02'24"S	109°08'47"E



Gambar 2. Titik lokasi pengambilan sampel (menggunakan Google Earth)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kandungan deuterium dan oksigen-18

Hasil analisis laboratorium Industri dan Lingkungan, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR), BATAN, kelimpahan relatif isotop (δ)

air tanah di wilayah kota Tegal, terlihat bahwa sampel yang dijadikan acuan air tanah yang masih jernih dan asli (*fresh water*) yaitu yang berada di titik T-14 yang berlokasi jauh dari laut dan berada di kaki gunung berjarak hampir 21,3 km dari pantai, memiliki nilai $-7,38$ ‰ untuk oksigen-18 dan $-44,2$ ‰ untuk deuterium. Sedangkan untuk nilai sampel air laut memiliki nilai yaitu $-0,71$ ‰ untuk oksigen-18 dan $-6,80$ ‰ untuk deuterium.

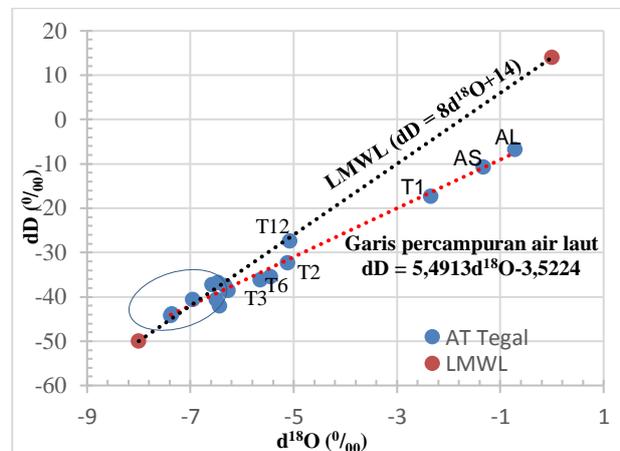
Tabel 2. Hasil analisis komposisi isotop deuterium dan oksigen-18

Kode Sampel	Jarak dari pantai (m)	δD (‰)		$\delta^{18}O$ (‰)	
Laut	0	-6,8	± 0	-0,71	± 0,4
Sungai	1,29	-10,8	± 1,2	-1,33	± 0,1
T1	420	-17,4	± 0,1	-2,34	± 0,1
T2	545	-32,4	± 5	-5,11	± 0,3
T3	685	-36,2	± 0,1	-5,64	± 0
T4	747	-40,6	± 2,9	-6,95	± 0,2
T5	964	-36,8	± 0,8	-6,46	± 0
T6	1265	-35,5	± 0,5	-5,45	± 0,2
T7	1283	-42,1	± 2	-6,43	± 0,3
T8	1343	-38,6	± 2,7	-6,27	± 0,2
T9	1970	-43,9	± 0,4	-7,36	± 0
T10	2608	-37,3	± 0,3	-6,58	± 0,1
T11	3850	-40,7	± 0,1	-6,5	± 0
T12	3860	-27,5	± 0,2	-5,07	± 0
T13	4270	-37,5	± 0	-6,33	± 0,1
T14	21300	-44,2	± 0	-7,38	± 0

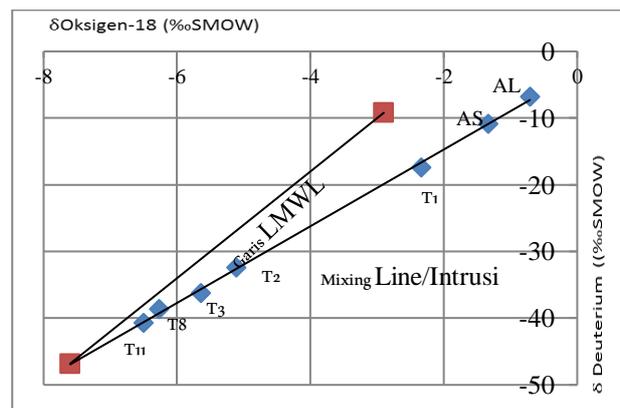
Grafik hubungan kelimpahan relatif isotop oksigen-18 dengan deuterium dari sampel yang diteliti dapat dilihat pada Gambar 3 berikut. Pola garis titik-titik hasil analisis akan mengarah ke titik sampel air laut. Titik-titik sampel yang berada di sepanjang garis itu menunjukkan bahwa air tanah yang diwakili titik sampel tersebut terindikasi telah mengalami pencampuran dengan air laut.

Gradien garis pada lokasi sampel air tanah memiliki kemiringan yang lebih rendah dari LMWL yaitu 5,4913 dengan nilai *intercept* sebesar -3,5224 sehingga persamaan garisnya menjadi $\delta D = 5,4913 \delta^{18}O - 3,5224$. Persamaan garis ini menjadi persamaan garis pencampuran air tanah dengan air laut karena menghubungkan titik

sampel air tanah (*fresh water*) dengan air laut, sehingga semua titik sampel yang berada di sepanjang garis pencampuran ini mengindikasikan telah mengalami pencampuran dengan air laut, terutama titik air sungai (AS) dan titik T-1 karena kedua titik sampel ini sangat dekat dengan titik air laut.



Gambar 3. Grafik hubungan oksigen-18 dan deuterium



Gambar 4. Grafik hubungan ^{18}O dan D di garis *mixing line*

Sampel yang berada tepat di sepanjang garis pencampuran sebanyak enam titik yaitu titik sampel seperti pada Tabel 3. Dari grafik Gambar 4 juga dapat dihitung presentase besarnya air laut yang mengintrusi air tanah pada lokasi sampel tersebut. Jika dibuat pola garis kelimpahan relatif isotop dari sampel air tanah hingga ke titik air laut akan didapatkan persamaan garis $\delta D = 5,4913 \delta^{18}O - 3,5224$. Persamaan garis tersebut adalah garis pencampuran air laut yang menyusup ke dalam akuifer air tanah dangkal memotong garis meteorik lokal di titik $(-7,651; -$

47,209). Koordinat titik potong ini adalah komposisi awal isotop air tanah (*fresh water*) sebelum mengalami intrusi dan dinyatakan ($\delta_0^{18}\text{O}$; $\delta_0\text{D}$) dengan fraksi ($f_{0(\text{O-18})}$; $f_{0(\text{D})}$). Sedangkan komposisi isotop air laut yang mengintrusi adalah ($\delta_1^{18}\text{O}$; $\delta_1\text{D}$) dengan fraksi ($f_{1(\text{O-18})}$; $f_{1(\text{D})}$), dan kelimpahan relatif untuk masing-masing sampel dinyatakan sebagai ($\delta_m^{18}\text{O}$; $\delta_m\text{D}$), dengan m menunjukkan *mixing*, maka dengan memasukkan variabel-variabel komposisi isotop tersebut akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\delta_m^{18}\text{O} = \delta_{0(\text{O18})}f_0 + \delta_{1(\text{O18})}f_1 \dots\dots\dots(4)$$

$$\delta_m\text{D} = \delta_{0(\text{D})}f_0 + \delta_{1(\text{D})}f_1 \dots\dots\dots (5)$$

Berdasarkan persamaan 4 dan 5 dengan memasukkan hasil analisis komposisi isotop pada Tabel 3 maka sampel air tanah di lokasi sampel T1 didapatkan persamaan:

$$-2,34 = -0,71f_0 + (-7,651)f_1 \dots\dots\dots(6)$$

$$-17,4 = -6,87f_0 + (-47,209)f_1 \dots\dots\dots(7)$$

Melalui metode eliminasi persamaan 3 dan 4, dapat diketahui besarnya fraksi air laut (f_0) yang mengintrusi air tanah di lokasi sampel T1 yaitu 65,5 % dan fraksi air tanahnya (f_1) 52,959 %. Dengan menggunakan perhitungan yang sama, maka didapatkan data fraksi air laut (f_0) dan (f_1) dari masing masing sampel seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Presentase intrusi air laut menurut garis linear *mixing line*

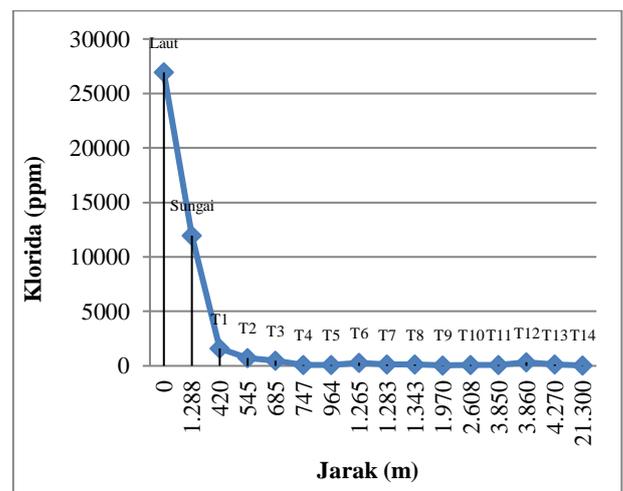
Kode Sampel	D (‰) SMOW	¹⁸ O (‰) SMOW	f_0 (%)	f_1 (%)
Laut	-6,8 ± 0,0	-0,71 ± 0,41	100	0
sungai	-10,8 ± 1,2	-1,33 ± 0,07	79,6	20,4
T1	-17,4 ± 0,1	-2,34 ± 0,13	65,5	34,5
T2	-32,4 ± 5,0	-5,11 ± 0,25	29,6	70,4
T3	-36,2 ± 0,1	-5,64 ± 0,01	21,9	78,1
T8	-38,6 ± 2,7	-6,27 ± 0,21	14,6	85,4
T11	-40,7 ± 0,1	-6,50 ± 0,01	10,9	89,1

Jika dilihat dari Tabel 3 intrusi air laut menurut garis linear *mixing line* presentase air laut yang tinggi di lokasi sampel sungai sebanyak 79,6%, T1 sebanyak 65,5%, dan terendah di lokasi T11 sebanyak 10,9%. Dari perhitungan

fraksi air laut tersebut didukung dengan data kandungan klorida di T1 sebesar 1578,33 ppm, T2 sebesar 728,33 ppm dan di T3 sebesar 491 ppm, maka terlihat jelas bahwa air tanah yang telah mengalami intrusi adalah air tanah di titik T1 dengan jarak sejauh 420 m dari bibir pantai , T2 berjarak 545 m dan T3 dengan jarak sejauh 680 m dari bibir pantai, sementara titik sampel yang lainnya walaupun berada di garis *mixing line* namun kandungan klorinya masih di bawah batas baku mutu Departemen Kesehatan sebesar 250 ppm, menunjukkan tidak mengalami intrusi air laut yaitu di titik T4 sampai dengan titik T14. Titik sampel T12 walaupun kandungan kloridanya berada di atas baku mutu yaitu sebesar 315,67 ppm, namun karena titik sampelnya tidak berada pada garis *mixing line* maka dapat dipastikan bahwa titik T12 tidak mengalami intrusi air laut.

Analisis kandungan klorida air tanah

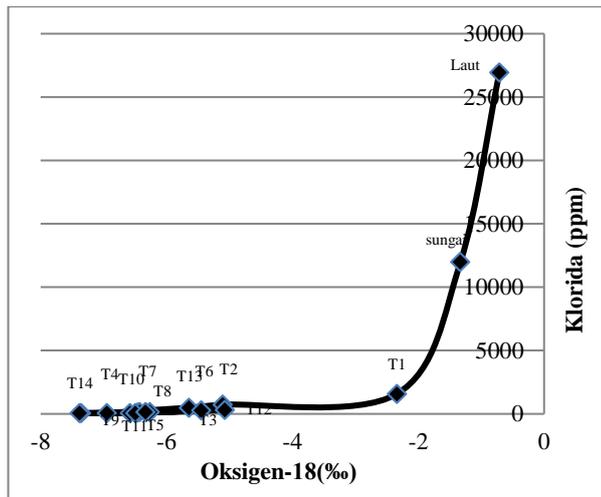
Pada Gambar 5 disajikan grafik hubungan ion klorida terhadap jarak titik sampling dari garis pantai. Dari grafik terlihat bahwa semakin dekat jarak sampling dari garis pantai akan semakin tinggi kandungan ion kloridanya. Hal ini dapat dipahami karena semakin dekat ke garis pantai maka air tanah akan sangat dipengaruhi oleh kandungan ion klorida yang berasal dari air laut sebagai dampak dari terjadinya intrusi.



Gambar 5. Grafik hubungan ion klorida terhadap jarak

Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan antara oksigen-18 dan kadar klorida yang terkandung pada sampel. Kandungan kadar ion klorida sampel air semakin tinggi pada saat kelimpahan oksigen-18 semakin kaya (*enrich*). Hal ini menunjukkan bahwa ion klorida sangat

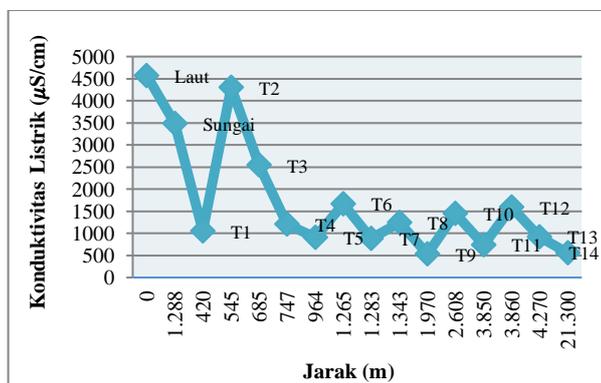
mempengaruhi komposisi rasio isotop oksigen-18 dari air.



Gambar 6. Grafik hubungan ion klorida terhadap oksigen-18

Analisis konduktivitas listrik air tanah

Pada Gambar 7 yakni grafik hubungan konduktivitas listrik dengan jarak memperlihatkan bahwa semakin jauh jarak dari garis pantai nilai konduktivitasnya semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa adanya faktor arah dan kecepatan pergerakan air tanah yang menyebabkan air laut akan terhambat meneruskan alirannya ke dataran karena gaya hidrostatik air.



Gambar 7. Grafik hubungan konduktivitas listrik terhadap jarak

Pengamatan lapangan menunjukkan bahwa aliran air tanah di Kota Tegal mengarah ke laut, aliran dari hulu ke hilir yaitu dari tempat yang lebih tinggi ketempat yang lebih rendah. Hal ini mengakibatkan daerah pantai merupakan tempat akumulasi ion-ion yang terbawa aliran tanah dari

daerah hulu, dengan tingginya kadar ion dalam air, konduktivitas air tanah akan semakin meningkat. Tingginya nilai konduktivitas bisa juga karena akumulasi dari ion di sekitar lokasi sampling akibat limbah lingkungan. Hal ini terjadi di lokasi sampel T6, T10 dan T12 meskipun jaraknya jauh dari garis pantai nilai konduktivitas listriknya relatif tinggi jika dibandingkan dengan sampel T1, T4, T5 yang jaraknya lebih dekat dari garis pantai.

Analisis keasaman air tanah

Derajat keasaman (pH) didefinisikan sebagai negatif dari logaritma konsentrasi ion hidrogen [9]. Reaksi kimia akan meningkat seiring dengan perubahan temperatur air. Perubahan pH air bergantung pada jenis endapan akuifernya [4]. Sifat kimia air tanah sangat berpengaruh pada batuan akuifernya. Dari hasil pengukuran tingkat keasaman didapat hasil yang bersifat basa yaitu terkecil 7,09 dan tertinggi 8,90 sedangkan pada yang bersifat asam yaitu terkecil 6,82 dan tertinggi 6,99. Jika terindikasi adanya intrusi air laut seharusnya tingkat keasaman bersifat basa karena alkalinitas air laut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode isotop stabil dapat digunakan sebagai salah satu metode dalam menentukan intrusi air laut di suatu daerah, karena memiliki ketepatan dan keakuratan yang lebih baik dibanding metode konvensional lainnya.
2. Hasil analisis isotop oksigen-18 (¹⁸O) dan deuterium (²H) diketahui telah terjadi intrusi air laut sejauh 685 m ke arah Tegal bagian timur.
3. Besaran fraksi air laut di titik sampel yang terintrusi adalah sebagai berikut:
 - T1, persentase air laut 65,5 % dengan kadar Cl sebesar 1578,33 ppm.
 - T2, persentase air laut 29,6 % dengan kadar Cl sebesar 728,46 ppm.
 - T3, persentase air laut 21,9 % dengan kadar Cl sebesar 491,04 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada laboratorium Industri dan Lingkungan, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi - BATAN, Jakarta Selatan yang telah membantu proses analisis sampel dan penyusunan karya tulis ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. "Kondisi geografis kota Tegal". Diakses dari <http://www.tegalkota.go.id/v2/index.php/kami/profil-kota/kondisi-geografis>, diakses pada 13 Oktober 2018, 23:29:07.
- [2]. P. Rejekiningrum, "Peluang pemanfaatan air tanah untuk keberlanjutan sumber daya air". *Jurnal Sumberdaya Lahan*, Vol. 3 No. 2, 2009.
- [3]. B. Pratikno, Z. Abidin, P. Sidauruk, dkk., "Aplikasi isotop alam ^{18}O , ^2H , Dan ^{14}C untuk studi air tanah di Kepulauan Seribu" *A Scientific Journal For The Applications Of Isotopes And Radiation*, 5:68-82, 2009.
- [4]. I.S. Iffatul, A.B. Wijatna, B. Pratikno, "Aplikasi isotop alam untuk pendugaan daerah resapan air mata air di Kecamatan Cijeruk, Kabupaten Bogor, Jawa Barat" *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, Vol. 12 No. 2, Desember 2016.
- [5]. I.D. Clark, P. Fritz, "Environmental isotopes in hidrogeology", Lewis publishers, Boca Raton-New York, 1997.
- [6]. W.G. Mook, "Environmental isotopes in hidrogeology cycle: Introduction, theory, and methods review" *W.G Mook Edition*, IAEA-UNESCO, Paris, 2000.
- [7]. B.R. Payne, "Guidebook on nuclear techniques in hydrology", IAEA, Vienna, 1983.
- [8]. B.W. Agus, "Penentuan pola aliran air tanah menggunakan isotop alam", *Laporan Penelitian*, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 1996.
- [9]. P. Ahmad, "Studi intrusi air laut Di Kota Semarang dengan metode aplikasi isotop alam" *Skripsi*, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, 2013.

