

Karakteristik Air Tanah Dangkal Kota Semarang Pada Musim Penghujan Berdasarkan Pendekatan Isotop Stabil (^{18}O , ^2H) dan Kimia Air

Characteristics of Shallow Groundwater of Semarang City in the Rainy Season Based on Stable Isotopes (^{18}O , ^2H) and Water Chemistry

Satrio¹, Hendarmawan², M. Sapari Dwi Hadian² dan E. Ristin
Pujiindiyati¹

¹ Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan 12440

² Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung

Jl. Raya Bandung Sumedang KM 21, Jatinangor 45363

Email : satrio@batan.go.id

Diterima 26-02-2015; Diterima dengan revisi 10-03-2015; Disetujui 26-05-2015

ABSTRAK

Karakteristik Air Tanah Dangkal Kota Semarang Pada Musim Penghujan Berdasarkan Pendekatan Isotop Stabil (^{18}O , ^2H) dan Kimia Air. Pada bulan Maret 2014 telah dilakukan penelitian air tanah di wilayah Kota Semarang dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik air tanah dangkal pada saat musim penghujan melalui pendekatan isotop stabil (^{18}O , ^2H) dan kimia air yang didukung dengan data hidrogeologi setempat. Sejumlah sampel air tanah dangkal diambil di beberapa lokasi dengan kedalaman antara 0 – 35 m di bawah permukaan tanah setempat (dbpts). Analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H serta kimia air dilakukan di laboratorium Hidrologi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN Jakarta. Hasil analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H menunjukkan bahwa sekitar 63 % air tanah cenderung berada di dekat garis meteorik Semarang dan sekitar 37 % sisanya mengalami evaporasi, interaksi dengan oksida batuan dan sedikit pengaruh interaksi atau *mixing* dengan air laut. Dari hasil analisis kimia air dengan *ionic balance* sekitar 3 % menunjukkan bahwa pada saat musim penghujan akuifer air tanah dangkal di wilayah Kota Semarang didominasi oleh ion bikarbonat (HCO_3^-) dengan tipe air didominasi CaHCO_3 . Sedangkan dari data parameter *Chloride Bicarbonate Ratio*, sekitar 24 % air tanah dangkal di wilayah Kota Semarang terindikasi mengalami intrusi air laut dan sisanya sekitar 76 % masih menunjukkan karakteristik sebagai air tanah tawar.

Kata kunci : karakteristik air tanah, air tanah dangkal, Semarang, musim penghujan, isotop stabil dan kimia air

ABSTRACT

Characteristics of Shallow Groundwater of Semarang City in the Rainy Season Based on Stable Isotopes (^{18}O , ^2H) and Water Chemistry. In March 2014 a research has been conducted of groundwater in the area of Semarang aimed to determine the characteristics of shallow groundwater in rainy season by using stable isotopes (^{18}O , ^2H) and water chemistry, also supported by local hydrogeologic data. A number of shallow groundwater samples were taken at several locations at a depth of 0-35 m from the subsurface. Analysis of stable isotopes (^{18}O , ^2H) and water chemistry were done in the Hydrology laboratory, Isotopes and Radiation Application Center, BATAN Jakarta. The results of the analysis of stable isotopes ^{18}O and ^2H showed that the characteristics of shallow groundwater during the rainy season is around 63% and tend to be the meteoric water line of Semarang and about 37% was evaporated, the interaction with the oxide rocks or mixing with water sea. The results of chemical analysis of water with the ionic balance is around 3% indicating that during the rainy season shallow groundwater aquifers in the city of Semarang

was dominated by bicarbonate (HCO_3^-) with water type was dominated by CaHCO_3 . While the data parameter Bicarbonate Chloride Ratio Ratio, shallow groundwater during the rainy season, where about is 24% indicated by the intrusion of sea water and the remaining approximately 76% showed characteristics as fresh groundwater.

Key word : groundwater characteristics, shallow groundwater, Semarang, rainy season, stable isotopes and water chemistry

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu kebutuhan pokok bagi manusia, baik untuk kebutuhan air minum maupun untuk berbagai keperluan lainnya. Kebutuhan terhadap air semakin lama semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perkembangan industri. Air yang dikenal dengan sebutan *white gold* merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan, sehingga kualitas dan kuantitas sumber daya air perlu terus dijaga dan dilestarikan. Namun disisi lain, peningkatan jumlah penduduk dan kebutuhan air ini memberikan dampak yang nyata terhadap perubahan lingkungan, khususnya kondisi air tanah [1].

Pada beberapa dasawarsa terakhir ini, eksploitasi air tanah, baik air tanah pada bagian akuifer dangkal maupun akuifer dalam terus meningkat sangat pesat. Fenomena tersebut apabila tidak dikendalikan akan berdampak terhadap kuantitas maupun kualitas air tanah, seperti penurunan muka tanah, penurunan kualitas air dan kejadian intrusi air laut. Eksploitasi air tanah yang tidak terkontrol dapat mengakibatkan dampak negatif terhadap keseimbangan alam itu sendiri [2].

Dalam beberapa tahun terakhir diketahui bahwa di beberapa lokasi di wilayah Kota Semarang bagian utara telah terjadi penyusupan air asin terus meningkat [3], terutama pada daerah pemukiman pusat perkotaan dan di beberapa wilayah industri di bagian utara, misalnya daerah sekitar Muara Kali Garang, Tanah Mas, Pengapon, Simpang Lima. Penyusupan air asin terindikasi dari hasil pemantauan pada beberapa sumur gali penduduk yang tersebar, maupun dari kualitas sumur bor di beberapa tempat. Di wilayah Semarang

penyusupan air asin tersebut diperkirakan sudah mencapai sejauh 2 km ke arah selatan garis pantai. Daerah Kendal penyusupan air asin, terdeteksi di utara Kaliwungu, Murorejo, Kumpulrejo sampai sekitar Sukolilan. Sumur bor yang dikelola oleh PDAM Kendal, di kampung Pegandon air tanahnya sudah dipengaruhi oleh penyusupan air asin, yang diperkirakan sebagai akibat kurang sempurnanya sistem konstruksi sumurbor. Nilai daya hantar listrik (DHL) air sumur bor tersebut melebihi 2000 $\mu\text{hos/cm}$, dengan jarak lokasi sumur bor dari garis pantai kurang lebih 5 km. Pola salinitas pada air tanah yang dilakukan melalui pengukuran DHL meningkat dari 1995 - 2008 [4].

Dengan permasalahan tersebut, penting dilakukan penelitian dengan metode isotop, kimia air dan geologi sehingga, diperoleh data maupun peta mengenai penyebaran air laut secara lebih aktual. Metode isotop stabil ^{18}O dan ^2H merupakan salah satu "tool" dalam mempelajari asal-usul air tanah. Kedua isotop tersebut bersifat stabil dan dalam penelitian hidrologi digunakan sebagai sidik jari (*finger print*) untuk mengetahui asal-usul air dan dapat membedakan berbagai sumber air seperti air hujan, air tanah, air laut, air magmatik dan air konat (*connate water*) [5].

Intrusi atau penyusupan air asin ke dalam akuifer di daratan pada dasarnya adalah proses masuknya air laut di bawah permukaan tanah melalui akuifer di daratan atau daerah pantai. Dalam pengertian lain, yaitu proses terdesaknya air bawah tanah tawar oleh air asin/air laut di dalam akuifer pada daerah pantai [6].

Interaksi antara air tanah dengan air laut dapat diteliti melalui pendekatan metode isotop stabil ^{18}O , ^2H dan kimia air serta didukung dengan geologi. Secara

teoritis, kandungan isotop air laut memiliki kandungan isotop, baik ^{18}O dan ^2H sebesar 0 ‰. Air tanah yang mengalami *mixing* dengan air laut cenderung memiliki kandungan isotop lebih *enrich* dibandingkan kandungan isotop air tanah pada kondisi normal. Kandungan kimia air juga digunakan dalam memvalidasi hasil analisis isotop, baik melalui pendekatan *carbonate bicarbonate* maupun melalui diagram *piper* yang digunakan untuk mengetahui tipe air [7].

HIDROGEOLOGI DAERAH PENELITIAN

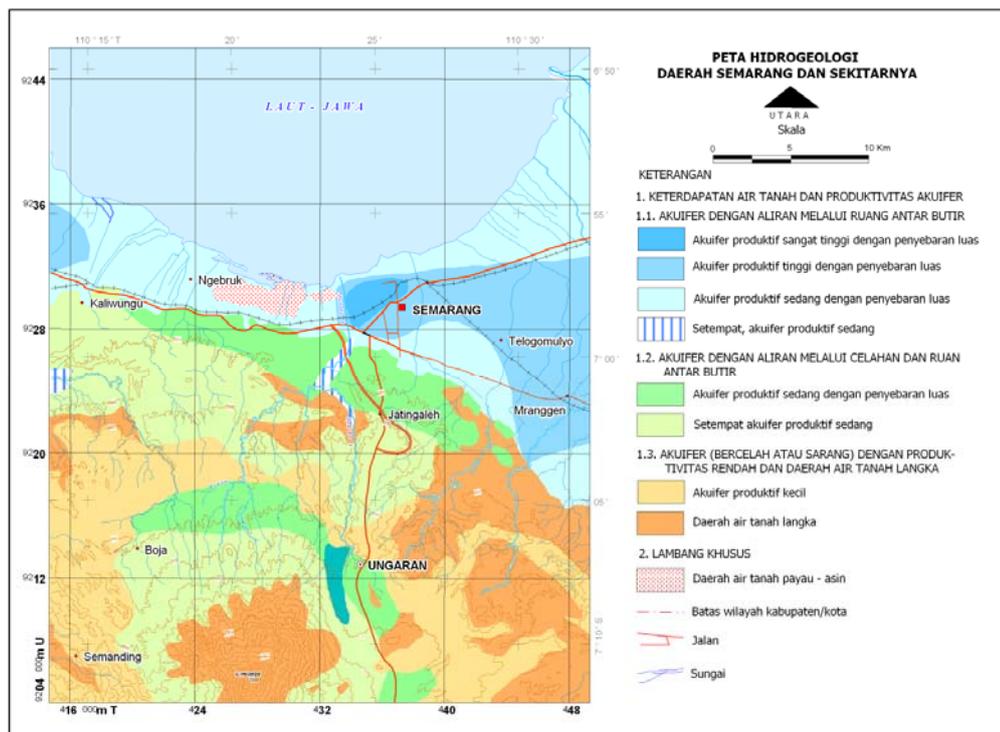
Sistem akuifer air tanah Semarang dapat dilihat melalui peta hidrogeologi Semarang pada Gambar 1 di bawah ini. Berdasarkan kondisi geologi dan pembentukannya, sistem air tanah di wilayah Kota Semarang dapat dibagi menjadi dua sistem air tanah [8], yaitu:

a. Sistem akuifer di daerah dataran

Sistem akuifer ini terdiri dari akuifer tak tertekan (*unconfined*) yang kedalamannya antara 5 hingga 30 m di bawah permukaan tanah setempat (dbpts) dan akuifer tertekan (*confined*) terdiri dari delta akuifer Delta Garang dan akuifer Formasi Damar. Kedalaman kedua akuifer tersebut antara 30 hingga 130 m dbpts dan bersifat semi tertekan dan tertekan.

Akuifer tak tertekan (*unconfined aquifer*).

Akuifer tak tertekan berada dekat permukaan tanah dan muka air tanahnya berhubungan langsung dengan udara bebas atau sering disebut sebagai air tanah bebas. Akuifer bagian bawahnya merupakan lapisan kedap air, sedangkan bagian atasnya merupakan material berbutir halus. Pengamatan di lapangan terhadap beberapa sumur gali di dataran Semarang menunjukkan bahwa kedalaman muka air tanah dangkal berkisar antara 0,2 hingga 3,0 m dbpts, sedangkan kedalaman sumur gali



Gambar 1. Peta hidrogeologi Semarang [9]

di dataran tersebut umumnya berkisar antara 6 hingga 12 m dbpts.

Akuifer tertekan

Akuifer tertekan yaitu yang bagian atas dan bawahnya merupakan lapisan kedap air, dimana tekanan airnya lebih besar dari tekanan atmosfer. Pada lapisan pembatasnya tidak ada air yang mengalir. Akuifer di dataran Semarang mempunyai kedalaman 30 hingga 70 dbpts. Batuan pembentuk akuifer tersebut terdiri dari lensa-lensa pasir dan kerikil yang ditutupi oleh lapisan lempung atau lempung pasiran sehingga airnya bersifat semi tertekan atau tertekan.

b. Sistem akuifer di daerah perbukitan

Sistem akuifer di daerah perbukitan dibagi menjadi dua, yaitu:

Akuifer tak tertekan

Akuifer tak tertekan di daerah perbukitan merupakan akuifer Formasi Notopuro dan akuifer Ungaran Tua bersifat tak tertekan. Muka air tanahnya berkisar antara 8 – 15 m dbpts, kedalamannya 10 – 30 m dbpts. Di beberapa tempat, muka air tanahnya mencapai lebih dari 20 m dbpts, tetapi pada tempat yang lain air tanahnya muncul sebagai mata air.

Akuifer tertekan - semi tertekan

Akuifer tertekan - semi tertekan berupa pasir vulkanik, breksi vulkanik dan konglomerat dari akuifer Formasi Damar yang tersebar merata di daerah perbukitan. Akuifer ini umumnya berada pada kedalaman antara 30 – 150 m dbpts.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan penelitian terdiri atas botol plastik berkapasitas 30 ml untuk sampel isotop stabil ^{18}O dan ^2H , botol plastik berkapasitas 500ml untuk sampel kimia air, larutan HNO_3 untuk *treatment* sampel

kation, pipet tetes, probe pipet, *dry rit* dan *syringe* CTC 1,2 μL .

Metode

Pengambilan sampel

Isotop stabil ^{18}O dan ^2H berada di air dalam bentuk senyawa $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ dan $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}_2$. Kedua isotop tersebut sangat peka terhadap proses fisika seperti evaporasi dan kondensasi. Oleh karena itu, untuk mencegah hal tersebut maka pengambilan sampel air dilakukan sebagai berikut:

- Sampel air sebanyak 20 ml dimasukkan kedalam botol khusus kedap udara dengan cara mendekatkan botol terhadap sumber air atau memasukkannya kedalam sumber.
- Hindarkan adanya gelembung udara dalam sampel dengan cara memasukan sampel secara perlahan-lahan.
- Setelah sampel terisi penuh dan tidak ada gelembung udara tutup botol tersebut hingga kedap udara.

Pengambilan sampel kimia air untuk analisis kimia air dilakukan dengan mengambil sampel air sebanyak 500 ml untuk anion dan 500 ml untuk kation. Sampel air untuk analisis kation biasanya ditambahkan larutan asam sebanyak 3 tetes untuk menghindari pengendapan ion dan perubahan sifat akibat bakteri.

Analisis sampel

Analisis komposisi isotop isotop dilakukan menggunakan *Liquid-water stable isotope analyzer* LGR (*Los Gatos Research*) DLT-100. Sedangkan analisis kimia air dilakukan menggunakan alat *Ion Chromatography* (IC).

Pendekatan isotop stabil ^{18}O dan ^2H

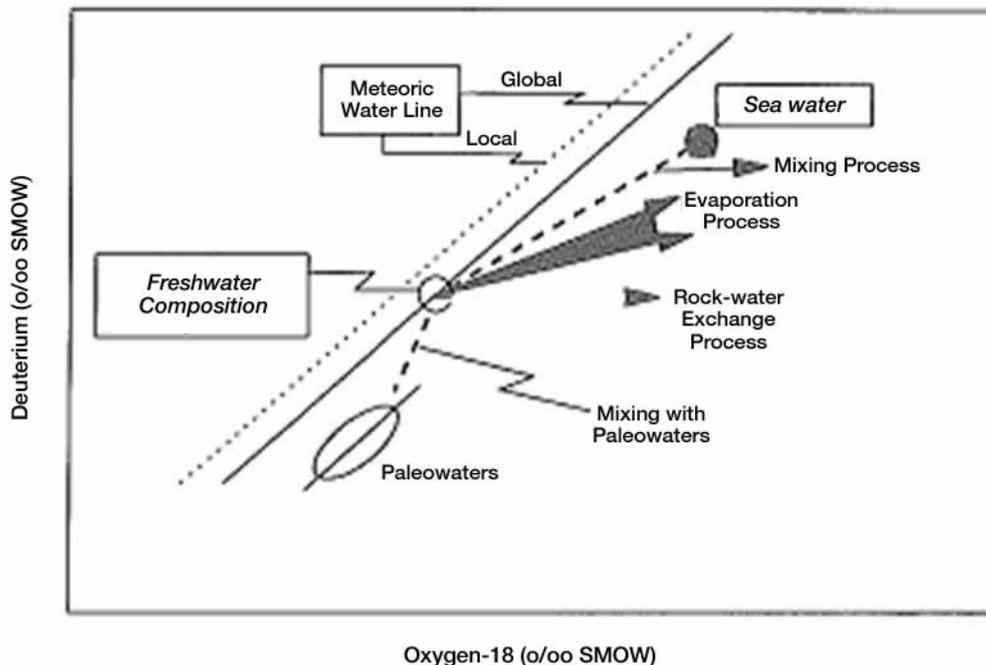
Melalui pendekatan metode isotop stabil ^{18}O , ^2H dan kimia air serta didukung dengan geologi, dapat diketahui mengenai pola penyebaran intrusi daerah penelitian dan tingkat pencemaran pada masing-masing lokasi. Secara teoritis, kandungan isotop air laut memiliki kandungan isotop 0 ‰ dan air tanah yang mengalami pencampuran atau *mixing* dengan air laut

cenderung memiliki kandungan isotop lebih *enrich* dibandingkan kandungan isotop air tanah pada kondisi normal. Air tanah yang mengalami pencampuran dengan air laut cenderung berada pada garis *mixing* seperti terlihat pada Gambar 2 di bawah ini. Grafik hubungan antara isotop ^{18}O dan ^2H merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk identifikasi fenomena intrusi laut pada suatu daratan [10].

Pendekatan lain yang umum digunakan adalah hubungan antara isotop ^{18}O dan ion klorida (Cl^-). Pada air tanah yang mengalami *mixing* dengan air laut, pergeseran isotop ^{18}O dan ^2H biasanya diikuti juga dengan perubahan konsentrasi ion klorida [11].

baik dalam air laut maupun air tanah, hanya persentasenya saja yang berbeda, misalnya ion klorida secara alami akan dominan di air laut dan sedikit di air tawar, sebaliknya ion karbonat atau bikarbonat dominan di air tawar dan sedikit di air laut.

Terdapat beberapa pendekatan kimia air untuk mengetahui adanya intrusi air laut, antara lain *Molar ratio Chloride Bicarbonate* dan melalui evaluasi diagram piper. Untuk mengetahui adanya intrusi tersebut dapat ditentukan dengan analisis kimia yang disebut "perbandingan klorida bikarbonat". Pada kasus ini dapat diketahui bahwa ion Cl^- dan Na^+ lebih dominan pada air laut, sedangkan pada air tanah tawar, ion yang dominan adalah CO_3^{2-} dan HCO_3^- [13,14].



Gambar 2. Karakteristik isotop ^{18}O dan ^2H dalam berbagai proses [12]

Pendekatan kimia air

Indikasi adanya intrusi air laut dapat diketahui pula melalui pendekatan kimia air. Terdapat delapan ion yang dapat dijadikan indikasi adanya intrusi air laut, yaitu Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^+ , Mg^+ dan K^+ . Kedelapan ion tersebut selalu ada,

$$CBR = \frac{\text{Cl}^-}{\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-}$$

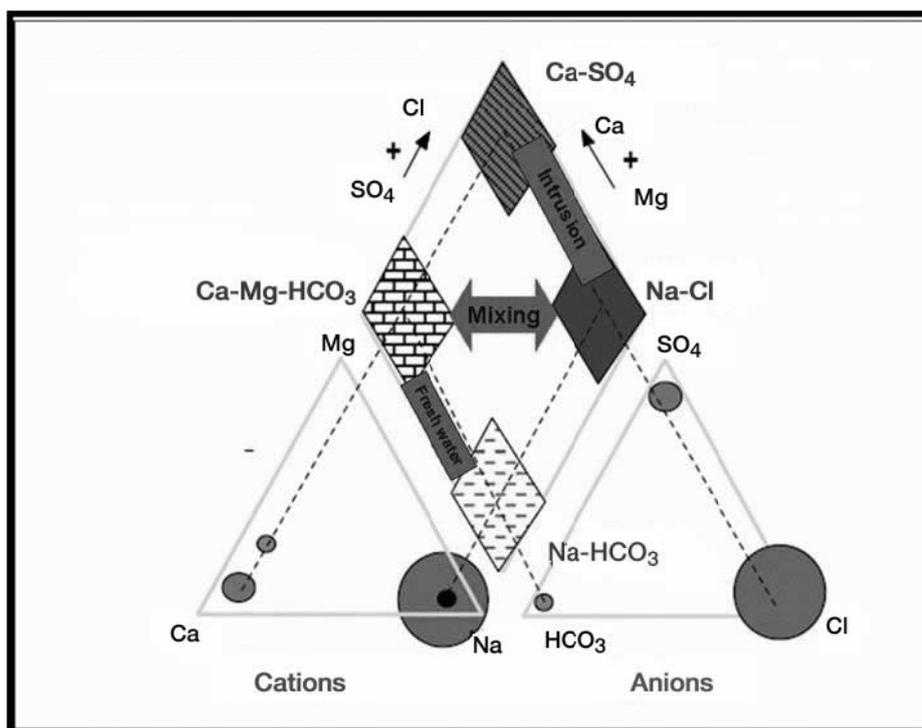
Perbandingan klorida bikarbonat dalam berbagai nilai dan kondisi air tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan klorida bikarbonat dalam berbagai kondisi air tanah [15]

Rasio $\text{Cl}^- / (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$	Tingkat Intrusi Air Laut
< 0,5	Air tanah tawar (<i>fresh groundwater</i>)
0,5 - 1,30	Terjadi intrusi air laut sedikit
1,30 - 2,80	Terjadi intrusi air laut sedang
2,80 - 6,60	Terjadi intrusi air laut agak tinggi
6,60 - 15,50	Terjadi intrusi air laut tinggi
15,5 - 20	Air laut

Berdasarkan data kimia air, yaitu delapan ion Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na, Ca, Mg dan K dapat pula diketahui mengenai tipikal dari sampel air dan evolusi kimia air dari setiap lokasi berdasarkan diagram piper [16]. Secara umum, interpretasi data kimia air menggunakan diagram piper dapat digambarkan pada Gambar 3.

Panasbumi, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR) - BATAN yang meliputi analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H menggunakan *Liquid-water stable isotope analyzer LGR (Los Gatos Research) DLT-100*. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini. Data isotop stabil ^{18}O dan ^2H pada Tabel 2 tersebut selanjutnya diplotkan



Gambar 3. Interpretasi tipikal air tanah dengan diagram piper [17]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H

Analisis terhadap sampel-sampel air tanah dilakukan di lab Hidrologi dan

dalam bentuk grafik hubungan antara isotop ^2H terhadap isotop ^{18}O untuk mengetahui tipikal dari sampel-sampel air yang telah dianalisis. Grafiknya dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini. Terlihat bahwa pada

pengambilan sampel air tanah yang telah dilakukan pada bulan Maret 2014 atau mewakili musim penghujan, komposisi isotopnya memiliki kandungan yang relatif *depleted* dan cenderung lebih banyak berada dekat dengan garis meteorik atau garis hujan

lokal Semarang. Ini menunjukkan pula bahwa pada musim penghujan, sebagian akuifer dangkal di Kota Semarang lebih dominan terisi air hujan secara langsung dan sebagian kecil lainnya mengalami proses pencampuran dengan air laut. Berdasarkan

Tabel 2. Hasil analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H air tanah dangkal wilayah Kota Semarang

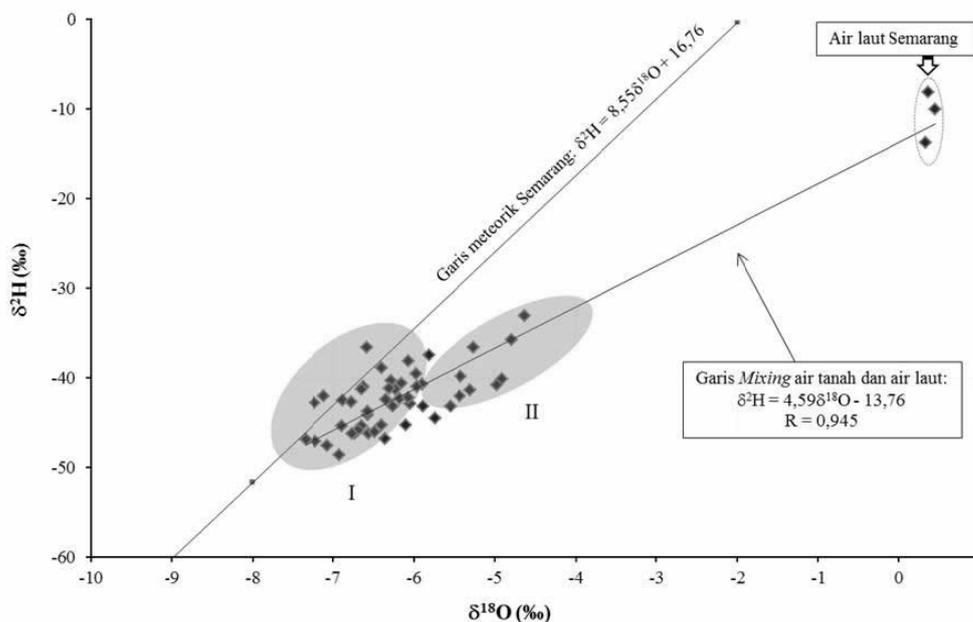
No.	Lokasi Sampel	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1	Karang Nangka	-6,15	-40,6
2	Wonosari	-5,88	-43,2
3	Rowosari	-6,62	-41,0
4	Krajan	-5,73	-44,5
5	Tanggulsari	-4,90	-40,1
6	Pondok	-5,42	-39,9
7	Margosari	-6,73	-46,2
8	Puspagiwang	-6,57	-44,1
9	Puswoyoso	-7,07	-47,6
10	Pasadena	-6,87	-42,5
11	Tugu Lapangan	-7,21	-47,1
12	Karanganyar	-6,58	-36,6
13	Tugurejo	-7,22	-42,8
14	Ngliwonan	-7,34	-46,9
15	Tambakharjo	-5,30	-41,4
16	Kendeng	-6,57	-43,8
17	Kalialang	-6,34	-42,4
18	Manyaran	-6,10	-45,3
19	Purianjosmoro	-4,79	-35,8
20	Dorowati	-6,64	-45,4
21	Lemah gempal	-6,92	-48,6
22	Lempongsari	-6,68	-45,9
23	Tengger	-6,76	-46,2
24	Deliksari	-6,17	-42,3
25	Bongsari	-6,88	-45,4
26	Bidaken	-6,35	-46,8
27	Tanah Mas	-5,26	-36,6
28	Kepatihan	-4,63	-33,1
29	Petelan	-6,64	-41,3
30	Wonodri	-6,04	-42,9
31	Candi sari	-6,55	-46,2
32	Jongli	-6,06	-38,1
33	Terboyo	-5,54	-43,2
34	Sawah besar	-5,43	-42,0
35	Sambirejo	-6,39	-38,9
36	Gayomsari	-6,28	-40,3
37	Sendangguo	-6,40	-45,3
38	Amposari	-6,26	-43,2
39	Juwono	-6,48	-46,0
40	Genuk	-5,89	-40,7
41	Karangroto	-6,77	-42,7
42	Genuksari	-4,97	-40,8
43	Tlogorejo	-5,97	-39,6
44	Pedurangan	-6,07	-42,2
45	Penggaron	-6,22	-41,3
46	Tlogomulyo	-5,81	-37,5
47	Goden	-6,30	-41,2
48	Meteseh	-5,96	-41,0
49	Krapyak	-7,11	-42,0
50	Air laut Marina Smg	0,33	-13,8
51	Air lautPelabuhan Smg	0,45	-10,1
52	Aair lautMaron Smg	0,36	-8,2

grafik tersebut, secara umum air tanah Kota Semarang dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu air tanah kelompok I: sebanyak 38 sampel atau sekitar 78 % air tanah pada kelompok ini cenderung berada pada di dekat garis meteorik Semarang dengan kandungan isotop stabil ^{18}O dan ^2H yang relatif miskin atau *depleted*. Ini mengindikasikan bahwa air tanahnya berasal dari imbuhan lokal yang relatif sama. Air tanah pada kelompok I ini sebagian berada di dataran dan sebagian lagi berada di perbukitan. Sedangkan air tanah kelompok II: sebanyak 11 sampel atau sekitar 22 % air tanah pada kelompok ini memiliki kandungan isotop ^{18}O dan ^2H yang relatif kaya (*enrich*) jika dibandingkan dengan air tanah kelompok I. Dari 11 sampel tersebut, 9 sampel atau sekitar 18 % diantaranya berada di garis percampuran atau di garis *mixing* antara air tanah dangkal dengan air laut Semarang. Indikasi ini menguatkan dugaan bahwa pada 9 lokasi tersebut air tanahnya sudah terkontaminasi air laut. Ke sembilan lokasi tersebut terdiri

atas Semarang Barat meliputi: Tanggulsari, Pondok dan Tambak Harjo serta Semarang Timur meliputi: Puri Anjosmoro, Tanah Mas, Kepatihan, Terboyo, Sawah Besar dan Genuksari.

Hasil analisis kimia air

Analisis kimia air dilakukan terhadap anion yang meliputi ion Cl^- , SO_4^{2-} dan HCO_3^- serta kation yang meliputi ion Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Data hasil analisis kimia selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3. Dengan *ionic balance* rata-rata 2,7 %, persentase dari masing ion dapat dilihat melalui grafik pada Gambar 5. Berdasarkan grafik tersebut, persentase dari masing-masing ion pada saat musim penghujan adalah: Na^+ 28,84 %; K^+ 1,37 %; Ca^{2+} 12,54 %; Mg^{2+} 8,07 %; Cl^- 27,02 %; SO_4^{2-} 5,84 % dan HCO_3^- 16,31 %. Dari data tersebut terlihat bahwa pada saat musim penghujan, air tanah dangkal wilayah Kota Semarang didominasi oleh ion Na, Cl dan HCO_3^- .



Gambar 4. Grafik hubungan isotop ^2H terhadap ^{18}O sampel air tanah dangkal wilayah Kota Semarang pada musim penghujan

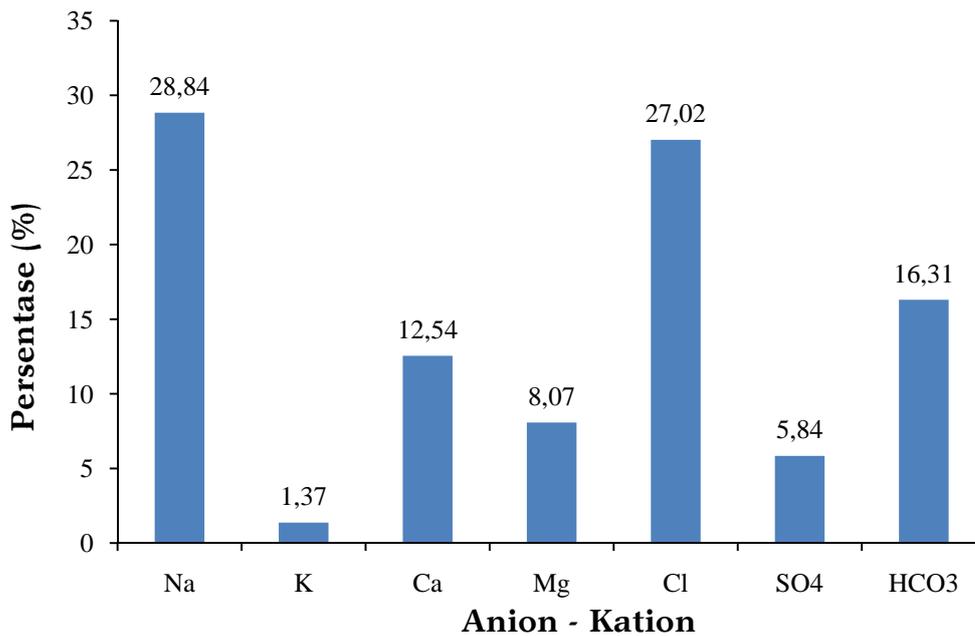
Tabel 3. Hasil analisis kimia air sampel air tanah dangkal wilayah Kota Semarang saat musim penghujan

No.	Kode	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)	Ca ²⁺ (ppm)	Mg ²⁺ (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SO ₄ ²⁻ (ppm)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
1	Tanggulsari	156,29	13,98	14,20	5,74	165,03	43,00	167,08
2	Karang Nangka	52,67	7,95	44,16	23,53	51,83	84,40	173,70
3	Wonosari	94,54	14,71	77,82	42,24	126,10	73,00	350,72
4	Rowosari	57,40	5,30	51,60	14,30	64,70	47,50	208,40
5	Krajan	68,80	13,40	51,50	44,60	142,60	39,10	338,30
6	Pondok	147,00	6,00	46,40	7,00	154,80	46,60	188,20
7	Margosari	35,94	4,48	39,53	15,19	32,34	58,70	145,58
8	Puspagiwang	177,00	10,10	18,53	1,85	65,51	73,00	268,00
9	Purwoyoso	28,66	8,16	47,56	22,60	16,59	48,10	287,23
10	Pasadena	30,75	3,13	43,23	9,63	17,00	40,30	162,95
11	Tugu Lapangan	23,70	8,00	57,80	15,40	25,40	22,30	206,90
12	Karanganyar	64,91	4,27	45,70	1,10	99,93	39,10	85,20
13	Ngliwonan	19,37	8,15	47,25	14,27	21,56	30,00	191,11
14	Tugurejo	109,90	20,50	78,00	25,80	112,90	45,60	378,00
15	Tambakharjo	207,70	29,37	56,82	24,27	189,50	162,00	291,16
16	Krapyak	111,05	7,20	81,70	20,10	156,60	85,00	276,60
17	Kendeng	35,94	7,06	46,01	10,93	24,88	60,70	155,51
18	Kalialang	59,70	4,50	81,80	13,00	48,90	58,00	281,20
19	Manyaran	14,88	5,28	34,59	15,93	23,63	44,00	120,77
20	Puri Anjosmoro	161,50	23,40	44,70	53,00	267,20	47,90	403,40
21	Dorowati	90,43	20,87	44,78	23,16	65,93	86,00	256,40
22	Lemah Gempal	21,23	6,05	47,56	21,31	21,56	43,60	200,17
23	Lempingsari	35,26	9,41	47,86	10,56	31,93	54,60	139,94
24	Tengger	12,70	6,30	61,20	4,10	19,80	20,40	153,50
25	Deliksari	57,73	8,36	65,47	21,12	42,29	53,90	292,81
26	Bongsari	56,50	8,50	62,40	12,10	55,10	35,80	265,40
27	Bidakan	104,71	31,20	99,74	17,23	152,59	88,40	286,20
28	Tanah Mas	3319,00	114,00	76,50	229,00	5470,00	100,70	655,30
29	Kepatihan	73,79	35,15	56,82	17,42	130,30	64,90	242,36
30	Petelan	112,90	41,00	83,70	21,70	133,90	34,00	349,10
31	Wonodri	45,30	15,36	44,78	3,52	26,54	122,00	125,00
32	Candisari	34,31	6,48	30,88	25,57	30,68	35,60	170,39
33	Jangli	16,30	14,90	25,90	3,90	21,60	39,60	69,50
34	Terboyo	450,90	26,40	81,70	27,00	574,50	86,30	379,70
35	Sawah Besar	151,80	16,40	46,00	8,00	126,10	84,50	220,90
36	Sambirejo	69,00	10,00	46,01	15,01	45,61	56,30	230,78
37	Gayamsari	43,80	7,70	57,40	20,20	36,50	52,20	225,00
38	Sengdangguo	66,80	10,00	33,97	37,80	52,24	88,00	331,86
39	Amposari	48,92	12,62	51,26	18,90	34,00	112,00	173,70
40	Juwono	24,85	13,30	35,51	29,27	15,76	34,50	253,50
41	Genuk	75,00	7,20	121,70	24,30	75,50	119,00	360,60
42	Karangroto	66,40	3,23	94,80	32,24	44,40	157,50	324,25
43	Genuksari	155,80	5,94	50,03	21,12	173,32	101,30	268,83
44	Tlogorejo	109,17	10,47	104,99	33,17	171,70	115,00	284,50
45	Pedurungan	228,27	0,63	80,29	53,73	181,61	198,00	460,70
46	Penggaron	41,50	3,80	128,50	18,30	30,30	132,00	327,60
47	Tlogomulyo	71,20	8,30	67,90	26,70	76,30	88,80	346,70
48	Godean	85,50	12,36	105,00	8,00	76,10	67,80	301,90
49	Meteseh	31,05	5,98	100,05	13,15	33,69	27,40	371,31

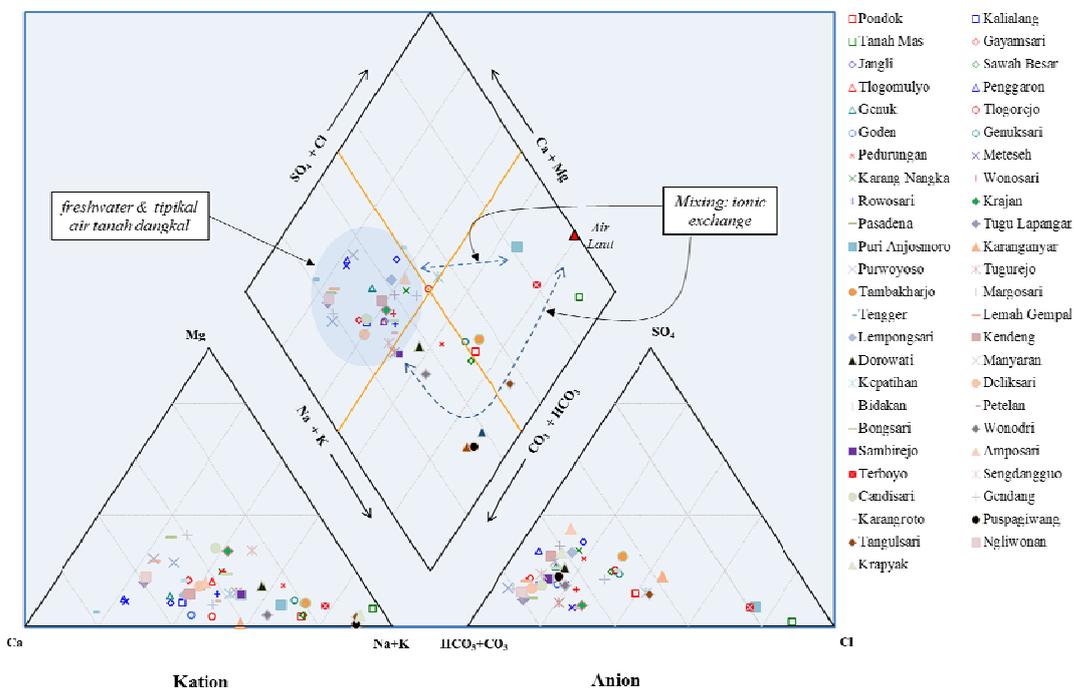
Diagram piper

Gambar 6 di bawah ini menunjukkan diagram piper mengenai tipikal air tanah dangkal Kota Semarang pada saat musim penghujan. Secara garis besar tipikal air tanah yang diambil pada musim penghujan tersebut dapat dikelompokkan menjadi

empat, yaitu sebanyak 69 % merupakan *freshwater* dan sisanya sekitar 31 % sebagai air tanah yang mengalami evolusi pada saat melalui batuan. Berdasarkan diagram piper tersebut terlihat bahwa sebagian besar air tanah yang diambil pada saat musim penghujan menempati sebelah kiri atas



Gambar 5. Persentase masing-masing ion air tanah dangkal wilayah Kota Semarang pada musim penghujan



Gambar 6. Diagram piper pengambilan sampel air tanah dangkal Kota Semarang

jajaran genjang merupakan *freshwater* dengan tipe air CaHCO_3 hingga CaNaHCO_3 . Keadaan ini diduga sangat dipengaruhi oleh

kehadiran air hujan pada akuifer tanah dangkal karena sampel-sampel air tersebut diambil saat musim penghujan. Sedangkan

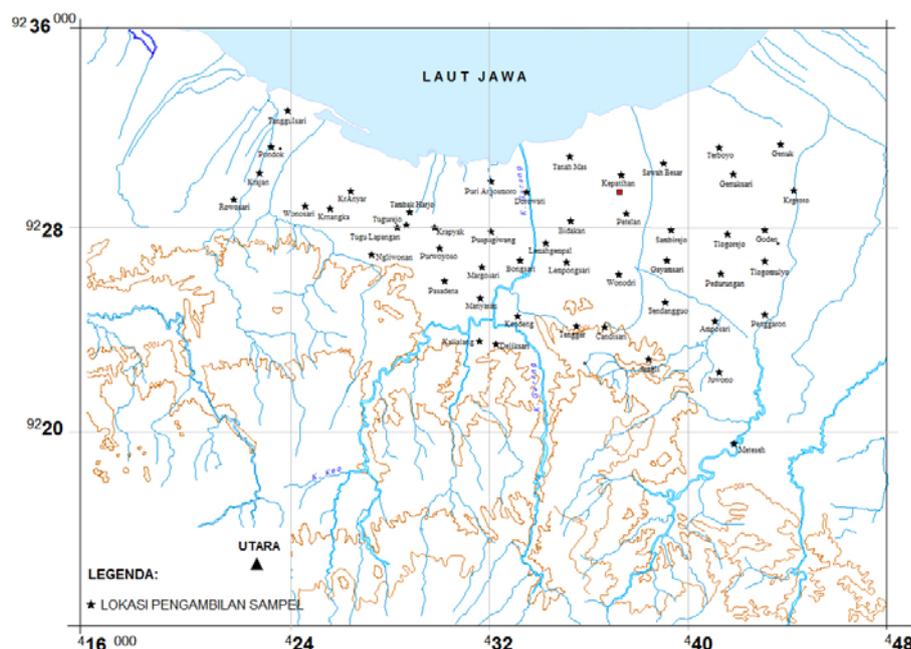
sebagian lainnya merupakan air tanah yang mengalami evolusi dari *freshwater* menjadi air yang memiliki tipe NaCaHCO_3 , $\text{NaCaHCO}_3\text{Cl}$ hingga NaCl yang merupakan air dengan tipikal campuran (*mixing*). Kehadiran Ca pada sebagian sampel diduga berasal dari pelarutan batuan kalsit, baik oleh air tanah maupun oleh intrusi air laut. Dari 31 % air tanah yang mengalami evolusi tersebut, 3 sampel atau sekitar 6 % memiliki tipe air NaCl yang mengindikasikan bahwa air tanah dangkal di tiga lokasi tersebut telah terkontaminasi air laut sebagai akibat intrusi air laut. Ketiga lokasi tersebut meliputi: Puri Anjosmoro, Tanah Mas dan Terboyo yang berada di dekat garis pantai Semarang. Di ketiga lokasi tersebut, faktor dilusi atau pengenceran oleh air hujan tidak mempengaruhi tipikal air tanah dengan tetap bertipe NaCl . Berdasarkan Gambar 6 tersebut terlihat pula bahwa terdapat 6 sampel atau sekitar 12 memiliki tipe $\text{NaCaHCO}_3\text{Cl}$ yang merupakan tipe campuran antara air tanah tawar dengan air laut. Sebanyak 6 sampel air tanah lainnya atau sekitar 12 % memiliki tipe NaCaHCO_3 .

Peta lokasi sampel dan kontur ion klorida

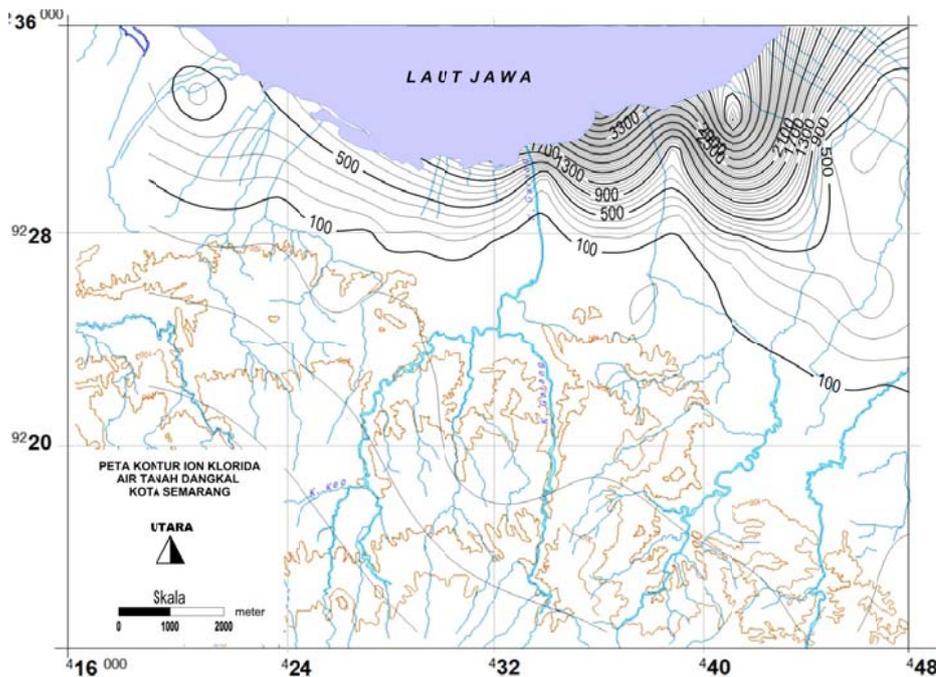
Gambar 7 memperlihatkan peta lokasi pengambilan sampel air tanah dangkal di beberapa lokasi di wilayah Kota Semarang. Berdasarkan peta tersebut terlihat bahwa sebagian besar sampel diambil di dataran aluvium Semarang dan sebagian lagi berasal dari daerah perbukitan yang terletak di selatan Kota Semarang. Sedangkan dari peta kontur ion klorida seperti terlihat pada Gambar 8, terlihat bahwa sebaran ion klorida dominan berada di area perkotaan khususnya di daerah Terboyo, Tanah Mas dan Sawah Besar. Sebaran lainnya mengarah ke daerah Puri Anjosmoro yang berada di sebelah baratnya. Fenomena ini sesuai dengan dugaan yang telah diperoleh berdasarkan analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H sebagaimana dibahas di atas.

Parameter: Molar rasio Chloride Bicarbonate

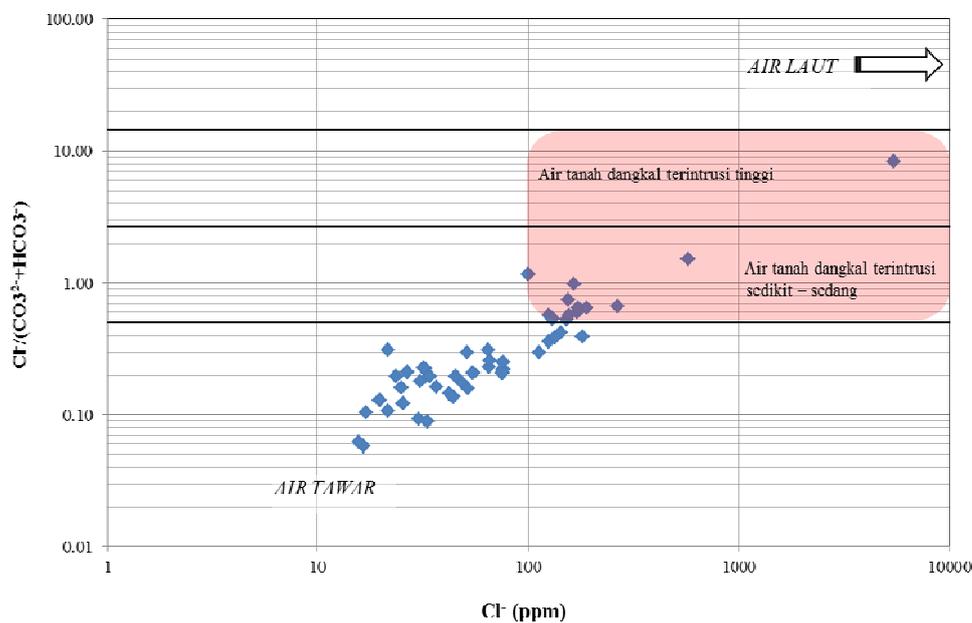
Berdasarkan data parameter molar rasio *Chloride Bicarbonate* yang ditunjukkan melalui grafik $\text{Cl}^-/(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ vs Cl^- pada Gambar 9, terlihat bahwa terdapat dua



Gambar 7. Peta lokasi pengambilan sampel air tanah dangkal wilayah Kota Semarang



Gambar 8. Peta kontur ion klorida air tanah dangkal wilayah Kota Semarang



Gambar 9. Grafik hubungan rasio $\text{Cl}^- / (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ terhadap ion Cl^- air tanah dangkal wilayah Kota Semarang pada musim penghujan

kelompok air tanah, yaitu kelompok air tanah tak intrusi dan intrusi. Kelompok air tanah dangkal tak terintrusi meliputi sebagian besar atau sekitar 78 % dari

keseluruhan sampel dengan sebarannya secara umum dijumpai di daerah kaki bukit hingga perbukitan di selatan Kota Semarang, yaitu di Semarang Barat dengan elevasi

antara 13 m hingga 82 m dpl Semarang Timur dengan elevasi antara 9 m hingga 142 m dpl. Sedangkan kelompok air tanah terintrusi meliputi sebagian kecil atau sekitar 22 % dari keseluruhan sampel. Sebarannya secara umum berada di dekat pantai dengan elevasi dengan elevasi antara 1 m hingga 13 m dpl. Daerah di Semarang Barat yang diduga terindikasi mengalami intrusi air meliputi: Tanggulsari, Pondok dan Tambak Harjo. Untuk Semarang Timur air tanah dangkalnya yang diduga terindikasi mengalami intrusi air laut meliputi: Puri Anjosmoro, Kepatihan, Tanah Mas, Terboyo, Sawah Besar dan Genuksari.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H menunjukkan bahwa karakteristik air tanah dangkal pada saat musim penghujan sebagian besar cenderung berada di dekat garis meteorik Semarang. Dari keseluruhan sampel, 38 sampel atau sekitar 78 % masih menunjukkan komposisi isotop stabil ^{18}O dan ^2H air meteorik dan 11 sampel atau sekitar 22 % air tanah pada kelompok ini memiliki kandungan isotop ^{18}O dan ^2H yang relatif kaya (*enrich*) jika dibandingkan dengan air tanah lainnya. Dari 11 sampel atau sekitar 22 % tersebut, 9 sampel atau sekitar 18 % diantaranya berada di garis percampuran atau di garis *mixing* antara air tanah dangkal dengan air laut Semarang. Indikasi ini menguatkan dugaan bahwa pada 9 lokasi tersebut air tanahnya sudah terkontaminasi air laut. Ke sembilan lokasi tersebut terdiri atas Semarang Barat meliputi: Tanggulsari, Pondok dan Tambak Harjo serta Semarang Timur meliputi: Puri Anjosmoro, Tanah Mas, Kepatihan, Terboyo, Sawah Besar dan Genuksari.

Sementara itu, hasil yang ditunjukkan dari analisis kimia air menunjukkan karakteristik yang relatif sama sebagaimana telah diperlihatkan hasil analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H . Data analisis kimia air (anion-kation) dengan *ionic balance* sekitar 2,7 % menunjukkan bahwa pada saat musim

penghujan, akuifer air tanah dangkal di wilayah Kota Semarang memiliki tipe air dari CaHCO_3 , CaNaHCO_3 hingga NaCaHCO_3 yang merupakan tipikal air tanah tawar dan sebagian lainnya bertipe NaCl yang merupakan tipikal air asin atau air laut. Demikian pula halnya data parameter *Chloride Bicarbonate Ratio Ratio* maupun kontur ion klorida menunjukkan bahwa sebagian besar air tanah di wilayah Kota Semarang pada saat musim penghujan masih berstatus air tanah tawar dan sebagian lainnya terkontaminasi air asin atau air laut. Lokasi-lokasi yang terkontaminasi air asin atau air laut tersebut relatif sama dengan yang telah diindikasikan sebelumnya melalui data isotop stabil ^{18}O dan ^2H di atas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada sdr. Setyo Budi dari Teknik Geologi Universitas Diponegoro Semarang yang telah membantu selama penelitian air tanah di Kota Semarang khususnya dalam pengambilan sampel air tanah dangkal dan air laut di beberapa lokasi.

DAFTAR PUSTAKA

1. SYAFALNI, Teknik Hidroisotop Untuk Analisis Keselamatan Lingkungan Tempat Pembuangan Akhir (TPA), Laporan Akhir Riset Unggulan Terpadu (RUT) (2002).
2. THOMAS, Permasalahan Air Tanah Pada Daerah Urban, *TEKNIK*, **30** (1), (2009).
3. <http://www.Sinar.harapan.co.id/index.html>, Intrusi air laut (2007).
4. RAHMAWATI, N., & MARFAI, M.A., Salinity Pattern in Semarang Coastal City, *Indonesia Journal of Geology*, **8** (2), June 2013, 111-120 (2013).

5. WEST, A.G., FEBRUARY, E.C. and BOWEN, G.J., Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes ("isoscapes") in ground water and tap water across South Africa, *Journal of Geochemical Exploration*, 145, 213-222 (2014).
6. HENDRAYANA, H., Intrusi air asin ke dalam akuifer di daratan, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta (2002).
7. MTONI, Y., et.all., Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar es Salaam, Tanzania, *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-012-2197-7., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2013).
8. MARSUDI, Prediksi Laju Amblesan Tanah di Dataran Alluvial Semarang-Jawa Tengah, Disertasi Program Doktor, Bandung, Institut Teknologi Bandung (2001).
9. SAID & SUKRISNO, Peta Hidrogeologi Semarang, Badan Geologi (1988).
10. SWARZENSKI, P.W., et.all., A Combined Radio and Stable Isotopic Study of a California Coastal Aquifer System, *Water* 2013, 5, 480-504; doi: 10.3390/w5020480 (2013).
11. MONGELLI, G., et.al., Tracing Groundwater Salinization Processes in Coastal Aquifers: A Hydrogeochemical and Isotopic Approach in the Na-Cl Brackish Waters of Northwestern Sardinia, Italy, *Hydrology and Earth Science*, 17, 2917-2928 (2013).
12. YURTSEVER, Y., Role of Environmental Isotopes in Studies Related to Salinization Process and Salt Water Intrusion Dynamics, IAEA, Vienna, Austria (1993).
13. SOUNDARYA, A. AND PRAKASH, M., Assesment of Seawater Intrusion Into The Coastal Aquifers In Nellore District, Sri Venkateswara College of Engineering and Technology, Chittoor 517127, Andhra Pradesh, India (2014).
14. KLASSEN, J., ALEEN, D.M., and KIRSTE, D., Chemical Indicators of Saltwater Intrusion for the Gulf Islands, British Columbia. Final Report, Department of Earth Sciences, Simon Fraser University (2014).
15. TODD, D. K., *Groundwater Hydrology*, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc., New York (1980).
16. ANDERS, R., et.all., Geochemical approach to determine sources and movement of saline groundwater in a coastal aquifer, *Journal of National Ground Water Association*, doi: 10.11111/gwat.12108, USA (2013).
17. AL-KHATIB, M., Hydro-Geochemical characteristics of groundwater beneath the Gaza Strip, *Journal of Water Resource and Protection*, 3 (5), (2011).