

# **INTRUSI AIR LAUT PADA SISTEM AKUIFER TERTEKAN CEKUNGAN AIR TANAH JAKARTA BERDASARKAN ANALISIS HIDROKIMIA DAN HIDROISOTOP**

*Seawater Intrusion in the Confined Aquifer System of Jakarta Groundwater Basin Base on Hydrochemical and Hydroisotope Analysis*

**Taat Setiawan<sup>1</sup>, Eli Yermia<sup>2</sup>, Budi Joko Purnomo<sup>1</sup>,  
dan Haryadi Tirtomihardjo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi, KESDM

<sup>2</sup> Inspektorat Jenderal KESDM

**ABSTRAK** Fenomena intrusi air laut di Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta sampai saat ini masih menjadi perdebatan baik dari segi skala, mekanisme, maupun ada atau tidaknya fenomena tersebut. Tulisan ini mengelaborasi karakter hidrokimia dan hidroisotop (<sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H), serta hidrograf pisometrik untuk mengidentifikasi fenomena intrusi air laut pada CAT Jakarta. Hasil analisis menunjukkan air tanah yang bersifat asin berasal dari sistem akuifer tertekan atas dengan jarak kurang dari 3 km dari pantai, sedangkan air tanah yang bersifat sedikit asin berasal baik dari akuifer tertekan atas maupun akuifer tertekan tengah dengan jarak kurang dari 9 km dari pantai. Air tanah yang terindikasi intrusi air laut dengan TDS > 1000 mg/L, Na/Cl < 1, dan Cl/HCO<sub>3</sub>> 0,55 ditunjukkan oleh contoh dari daerah Kapuk, Tongkol, dan Sunter untuk akuifer tertekan atas, serta daerah Daan Mogot, Cakung, dan Tongkol untuk akuifer tertekan tengah. Hanya di daerah Kapuk proses intrusi air laut tersebut berhubungan dengan penurunan pisometrik yang masih berlangsung hingga saat ini. Secara kuantitatif,

intrusi air laut di daerah ini telah mencapai tingkat pencampuran sekitar 11 – 21 % berdasarkan komposisi isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H.

**Kata kunci:** hidrokimia, hidroisotop, intrusi air laut, Jakarta.

**ABSTRACT** *The seawater intrusion phenomenon in the Jakarta groundwater basin is still on going debate, in terms of the scale, mechanism, and its existence. This paper elaborates the characteristics of hydrochemistry and hydroisotopes (<sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H) as well as the piezometric hydrograph to identify seawater intrusion in the Jakarta groundwater basin. Analyses show that saline groundwater is originated from upper confined aquifer with distance of less than 3 km from coastline, while the slightly saline groundwater is originated from both upper confined aquifer and middle confined aquifer with distances of less than 9 km from coastline. The indicated groundwater intruded by seawater with TDS > 1000 mg/L, Na/Cl < 1, and Cl/HCO<sub>3</sub>> 0,55 is showed by sample from areas of Kapuk, Tongkol, and Sunter for the upper confined aquifer, and areas from Daan Mogot, Cakung, and Tongkol for the middle confined aquifer. Only in Kapuk the seawater intrusion associated with the piezometric drop that continually occur up to present. Quantitatively, seawater intrusion in this area have reached mixing scales of up to c.a. 11 – 21 %, based on the composition of <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H.*

**Keywords:** hydrochemistry, hydroisotopes, seawater intrusion, Jakarta.

---

Naskah masuk : 26 Januari 2017  
Naskah direvisi : 04 Februari 2017  
Naskah diterima : 05 April 2017

---

Taat Setiawan  
Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan,  
Badan Geologi, KESDM  
Jl. Diponegoro No. 57, Bandung 40122  
Email : taat\_setia@yahoo.com

## PENDAHULUAN

Jakarta sebagai ibukota negara merupakan pusat pemerintahan sekaligus pusat perekonomian di Indonesia. Pemerintahan, ekonomi, dan otomatis penduduk yang terpusat di kota ini tentunya membutuhkan pasokan air bersih dalam jumlah besar, sementara sampai saat ini belum bisa dipenuhi oleh jaringan PDAM. Hal tersebut berimplikasi terhadap kebutuhan pasokan air bersih dari sumber lain. Salah satu sumber air bersih yang sejak awal tahun 1950-an dimanfaatkan secara luas adalah air tanah, yang ditandai dengan penurunan muka air tanah tertekan atau pisometrik secara gradual sampai dengan awal tahun 1970-an (Djaeni *et al.*, 1986). Penurunan pisometrik secara dramatis terjadi pada rentang awal tahun 1970-an sampai dengan tahun 1985, dan mulai berkurang kembali sampai dengan pengukuran terakhir pada tahun 2013 oleh Tirtomihardjo dan Setiawan (2013). Turunnya pisometrik sebagai akibat dari pengambilan air tanah yang berlebihan teridentifikasi telah menimbulkan dampak lanjutan yaitu antara lain penurunan tanah dan intrusi air laut, terutama di beberapa tempat di Jakarta bagian utara (Abidin *et al.*, 2009; Djijono, 2002; Murdohardono dan Sudarsono, 1998).

Terkait dengan terjadinya intrusi air laut sebagai dampak dari pengambilan air tanah di Jakarta sudah diterima secara luas. Namun demikian, menurut Hutasoit dan Pindratno (1998), sampai saat ini masih terdapat beberapa perdebatan terkait dengan skala, mekanisme tambahan, dan bahkan ada/tidaknya fenomena intrusi air laut itu sendiri. Selain intrusi air laut setidaknya terdapat tiga mekanisme lain yang diperkirakan menyebabkan bertambahnya skala atau secara tersendiri membentuk air payau pada akuifer di Jakarta, yaitu 1) air fosil, 2) reaksi air-batuan, dan 3) tambak ikan yang menggunakan air payau. Keberadaan air payau pada akuifer di Jakarta yang disimpulkan karena intrusi air laut pertama kali diungkapkan oleh Hehanusa (1979) berdasarkan pada dua parameter, yaitu rasio  $Cl/HCO_3 > 1$  dan level muka air tanah di bawah muka air laut. Soenarto and Widjaya (1985) mendukung konsep intrusi air laut tersebut, namun hanya untuk akuifer bebas dan bukan untuk akuifer tertekan karena tidak adanya kontak hidrolika dengan air laut. Djaeni *et al.* (1986) melaporkan keberadaan air payau pada kedalaman 0 hingga 100 meter di bawah muka tanah (mbmt) telah menyebar sampai

6 km dari garis pantai dan disimpulkan oleh karena intrusi air laut. Adapun keberadaan air payau pada akuifer >200 mbmt diperkirakan oleh karena keberadaan air fosil. Kesimpulan tersebut didasari pada perkiraan bahwa air laut fosil pada akuifer <100 mbmt telah tercuci secara keseluruhan oleh air meteorik (Djaeni *et al.*, 1986; Soefner *et al.*, 1986).

Tjahjadi (1991) secara lebih berani menyimpulkan bahwa intrusi air laut terjadi baik pada akuifer bebas maupun akuifer tertekan, masing-masing sudah tersebar sampai dengan 15 dan 10 km ke arah darat. Tirtomihardjo (1994) berpendapat bahwa intrusi air laut hanya terjadi pada akuifer tertekan, sedangkan air payau pada akuifer bebas lebih dikarenakan oleh reaksi air-batuan dan keberadaan tambak air payau. Berbeda, berdasarkan data hidrolika, hidrokimia, dan isotop ( $^2H$  dan  $^{18}O$ ), Djijono (2002) mengungkapkan bahwa intrusi air laut terjadi pada akuifer dangkal dan tersebar sampai 10 km dari pantai, meskipun di beberapa tempat juga karena keberadaan air laut fosil. Konsep intrusi air laut ditolak oleh IWACO *et al.* (1994) baik untuk akuifer bebas maupun tertekan, didasarkan pada hidrolika, hidrokimia, *carbon dating*, dan isotop ( $^2H$  dan  $^{18}O$ ). Mereka menyimpulkan keberadaan air payau pada akuifer bebas adalah sebagai akibat dari adanya air laut yang terjebak pada saat terjadinya kenaikan muka air laut (*flooding event*) pada sekitar 4500 tahun yang lalu. Sedangkan air payau pada akuifer tertekan merupakan kombinasi air fosil pada saat sedimentasi Pleistosen dan rembesan vertikal dari akuifer bebas. Penelitian-penelitian terakhir, Onodera *et al.* (2008) menyimpulkan terjadinya intrusi air laut pada akuifer tertekan berdasarkan distribusi  $Cl$  dan isotop  $^{18}O$ . Pemantauan air tanah pada tahun 2013, Tirtomihardjo and Setiawan (2013) melaporkan distribusi air payau telah menyebar sampai sekitar 10 km dari pantai, namun mekanisme pembentukannya tidak dibahas.

Tulisan ini bertujuan untuk mengidentifikasi intrusi air laut berdasarkan atas analisis hidrokimia dan hidroisotop ( $^{18}O$  dan  $^2H$ ), serta hidrograf pisometrik sumur bor pada sistem akuifer tertekan. Namun demikian karena keterbatasan metode yang digunakan, tentunya tulisan ini tidak akan sampai pada kesimpulan secara pasti berkaitan dengan mekanisme pembentukan air tanah yang bersifat asin di CAT

Jakarta untuk mengakhiri perdebatan yang sampai saat ini masih berlangsung.

**LOKASI PENELITIAN**

Lokasi penelitian meliputi wilayah CAT Jakarta yang terletak pada posisi 106° 36' 32,54" - 107° 4' 4,78" BT dan 6° 0' 43,50" - 6°26' 58,23" LS. Batas daerah penelitian di bagian utara adalah Laut Jawa, di bagian barat adalah Sungai Cisadane, di bagian timur adalah Sungai Bekasi, dan di bagian selatan adalah bagian tengah CAT Bogor (Gambar 1).

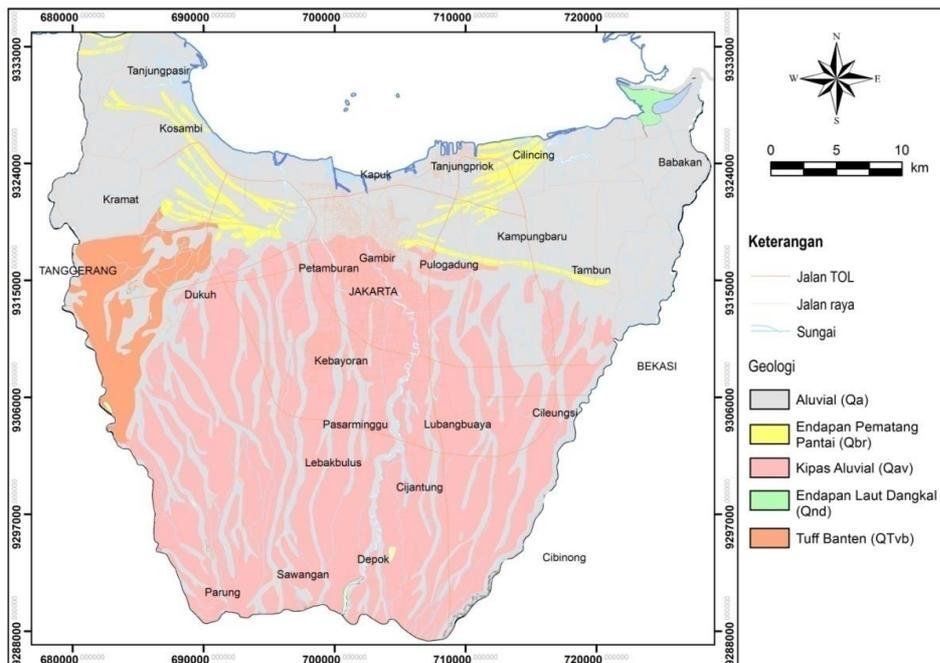


Gambar 1. Lokasi Penelitian.

Menurut Turkandi *et al.* (1992), daerah penelitian tersusun atas Endapan Aluvial (Qa), Endapan Pematang Pantai (Qbr), Kipas Aluvial (Qav), dan Tuf Banten (Qtvb). Endapan Aluvial (Qa) tersusun atas lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal, hingga bongkah. Endapan Pematang Pantai (Qbr) tersusun atas pasir halus hingga kasar dengan pemilahan baik dan terdapat cangkang moluska. Kipas Aluvial (Qav) tersusun atas tuf halus berlapis, tuf pasir, berselingan dengan tuf konglomeratan. Tuf Banten (Qtvb) tersusun atas tuf, tuf batuapung, dan tuf pasir (Gambar 2).

Menurut Poespowardoyo (1986a), daerah penelitian termasuk dalam kelompok akuifer dengan aliran melalui ruang antar butir. Akuifer tersebut secara umum memiliki produktivitas sedang dengan penyebaran luas. Poespowardoyo dan Purbohadiwidjono (1975) menyatakan bahwa batuan dasar CAT Jakarta merupakan lapisan batulempung berumur Tersier dengan kedalaman sekitar 300 m, sedangkan Assegaf (1998), Hutasoit *et al.* (2000), dan Harsolumakso (2001) menyebutkan bahwa kedalaman batas batuan Tersier – Kuartar pada CAT Jakarta bervariasi pada kedalaman kurang dari 300 m. Batuan berumur Tersier tersebut juga dapat bertindak sebagai akuifer.

Poespowardoyo (1986b) menyebutkan bahwa sistem akuifer di CAT Jakarta merupakan *multi*



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Modifikasi dari Turkandi *et al.*, 1992).

layers aquifer yang dikelompokkan menjadi empat sistem akuifer berdasarkan sifat hidrauliknya antara lain sistem akuifer tidak tertekan dengan kedalaman rata-rata kurang dari 40 mbmt, sistem akuifer tertekan atas dengan kedalaman rata-rata 40-140 mbmt, sistem akuifer tertekan tengah dengan kedalaman rata-rata 140-250 mbmt, dan sistem akuifer tertekan bawah dengan kedalaman rata-rata lebih dari 250 mbmt. Sistem akuifer tersebut secara umum disusun oleh endapan Kuartar dan dialasi oleh endapan Tersier yang secara nisbi bersifat kedap air. Assegaf (1998) menyimpulkan bahwa berdasarkan sifat lapisan penutup, akuifer CAT Jakarta dibagi menjadi sistem akuifer tidak tertekan pada kedalaman kurang dari 20 m, dan akuifer tertekan pada kedalaman 20 – 300 meter yang dibagi menjadi tujuh kelompok. Fachri, et al. (2002) membagi zona hidrostratigrafi CAT Jakarta menjadi empat zona yaitu Zona 1 berupa akuifer yang tersusun atas batupasir, konglomerat, dan batulempung, Zona 2 berupa akuifer yang tersusun atas batulempung dengan sisipan pasir, Zona 3 berupa akuifer yang tersusun atas batupasir bersisipan breksi dan batulempung, dan Zona 4 berupa akuifer yang tersusun atas sisipan batupasir dan batulempung.

## METODOLOGI

Metodologi penelitian yang digunakan adalah metode hidrogeologi lapangan disertai dengan

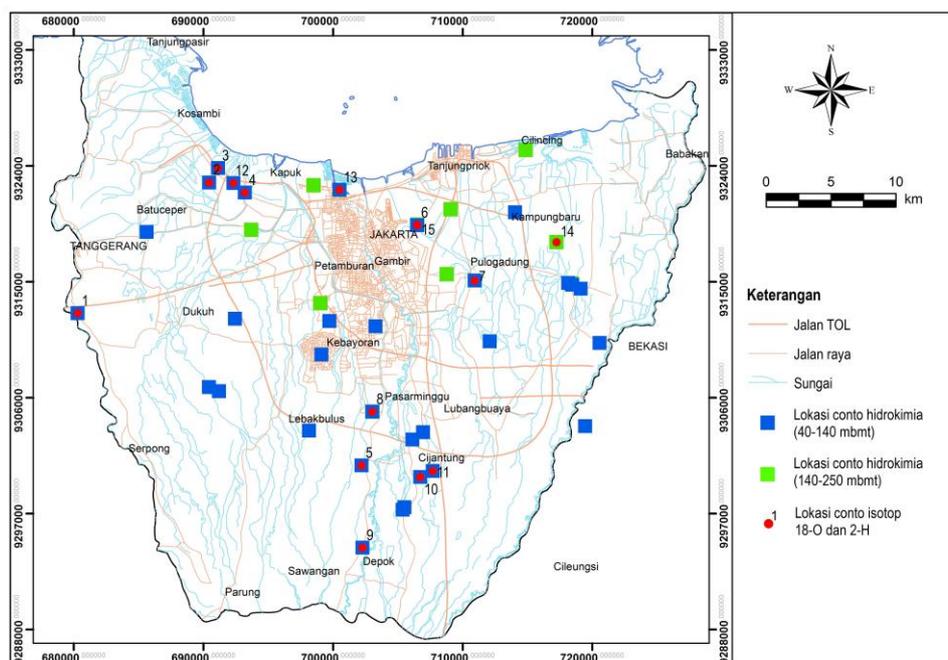
pengambilan contoh air, untuk analisis hidrokimia sebanyak 42 conto, dan isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  sebanyak 15 conto pada sumur bor dengan kedalaman 50 – 250 m (Gambar 3). Pengambilan conto air tanah untuk analisis hidrokimia dilakukan pada awal bulan November hingga awal bulan Desember tahun 2013, sedangkan untuk isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  dilakukan pada bulan Juli 2014.

Pengukuran secara langsung di lapangan meliputi pengukuran pisometrik dan pengukuran sifat kimia-fisika air berupa suhu, derajat keasaman (pH), dan daya hantar listrik (DHL). Analisis kandungan ion utama dilakukan di laboratorium dengan menggunakan acuan *Standar Methods for The examination of Water and Wastewater 20<sup>th</sup> Edition 1998* (SMEWW). Untuk mengetahui kualitas hasil analisis tersebut dilakukan perhitungan *charge balance error* (CBE), dengan rumus (Freeze dan Cherry, 1979);

$$CBE = \frac{\sum Zm_c - \sum Zm_a}{\sum Zm_c + \sum Zm_a} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Notasi Z adalah valensi ion,  $m_c$  adalah molalitas kation, dan  $m_a$  adalah molalitas anion.

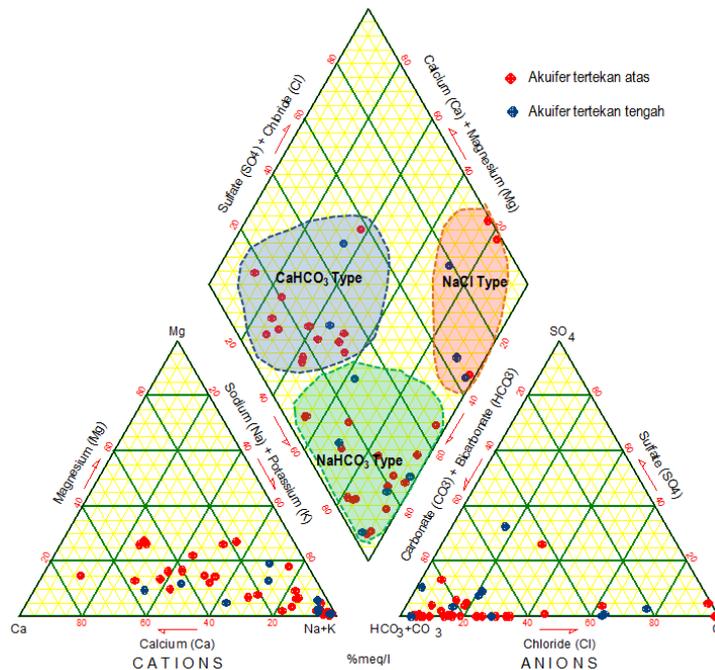
Analisis fasies air tanah secara numerik dan grafis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Aquachem 2010.1*, sedangkan analisis bivariat parameter hidrokimia dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MS. Excel 2007*,



Gambar 3. Lokasi pengambilan conto air tanah tertekan daerah penelitian.

Tabel 1. Hasil analisis hidrokimia conto air tanah tertekan daerah penelitian.

No.	TDS (mg/L)	Suhu (°C)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Fe <sup>3+</sup> (mg/L)	Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	CBE (%)
1	240	29,60	30,13	5,24	7,56	0,32	5,32	23,70	0,00	326,79	35,44	39,90	0,00	1,70	-1,20
2	5384	29,31	116,86	84,48	20,04	0,82	36,05	1361,90	0,00	403,22	2780,08	0,00	0,00	0,00	-4,20
3	280	31,30	7,04	3,38	0,33	0,00	9,71	75,17	0,00	867,38	10,63	0,00	0,00	0,00	0,20
4	188	31,10	25,34	6,76	2,99	0,29	6,85	39,77	0,00	111,00	38,54	0,00	0,00	18,60	6,90
5	424	29,40	3,38	3,89	0,00	0,05	11,25	134,97	0,00	804,23	14,62	43,40	0,00	0,00	-0,10
6	652	30,80	41,96	29,74	0,19	0,35	8,29	104,60	0,00	315,71	70,89	42,40	0,00	1,40	-1,00
7	1908	23,50	9,29	5,41	0,02	0,00	11,83	597,74	0,70	182,78	419,78	10,80	0,20	0,00	1,70
8	12724	31,60	236,54	440,99	39,90	2,86	40,40	3480,70	29,00	99,70	7598,14	520,00	0,02	0,00	-6,20
9	1200	23,90	8,73	0,68	0,17	0,02	19,24	426,12	0,40	175,03	163,48	0,10	0,00	0,00	4,60
10	460	28,40	7,32	1,69	0,34	0,00	5,94	140,14	0,00	635,85	44,30	16,10	0,00	0,00	-0,10
11	216	29,31	29,29	10,14	0,26	0,01	3,73	17,26	0,00	182,78	10,63	0,00	0,00	0,00	-2,40
12	124	29,31	19,71	4,39	2,25	0,34	3,24	17,84	0,00	122,96	18,16	0,00	0,00	0,00	1,20
13	232	29,31	23,37	9,29	12,59	0,39	6,07	31,05	0,00	233,74	32,34	0,00	0,00	0,20	-4,70
14	2348	30,40	6,76	3,38	5,20	0,11	31,41	725,98	0,00	238,17	662,34	56,10	0,40	1,80	4,30
15	404	29,00	2,82	1,01	0,15	0,04	4,69	122,77	1,10	162,84	69,56	0,00	0,50	0,00	-0,20
16	200	30,00	10,98	10,14	0,42	0,08	6,97	34,43	0,00	224,88	31,01	0,00	0,00	0,00	2,80
17	288	28,00	17,74	4,06	0,46	0,07	6,22	66,07	0,00	281,37	11,96	8,60	0,00	0,00	-1,10
18	308	29,40	67,30	8,45	0,38	0,13	1,61	11,94	0,00	529,51	26,58	1,10	0,02	0,00	-0,70
19	200	28,60	33,23	4,73	1,48	0,10	5,90	16,58	0,00	561,63	15,06	0,00	0,00	0,00	-3,00
20	264	29,10	36,04	9,12	3,79	1,95	5,43	41,25	0,00	389,93	23,04	0,90	0,00	0,00	1,40
21	316	29,31	12,39	2,20	0,08	0,08	2,69	96,54	0,00	375,53	9,30	2,30	0,02	0,00	1,40
22	604	29,31	6,76	2,03	0,00	0,05	4,25	208,77	0,00	220,44	12,85	2,40	0,00	0,00	3,20
23	648	29,60	8,45	0,68	0,00	0,05	7,03	227,13	0,00	217,12	22,15	0,00	0,00	0,00	3,50
24	536	29,20	14,92	6,42	2,47	1,72	4,51	152,85	0,00	210,47	53,61	15,40	0,00	0,00	-1,10
25	448	28,00	64,49	22,98	3,09	1,15	4,64	38,13	0,90	220,44	29,68	7,30	0,00	0,00	-1,80
26	248	27,90	23,37	6,76	0,00	0,03	3,84	45,20	0,00	178,35	9,75	0,00	0,00	0,00	-1,20
27	288	29,10	20,84	3,72	2,39	0,08	9,20	61,98	0,00	85,30	29,24	0,60	0,00	1,50	-1,40
28	220	30,60	22,53	5,07	0,00	0,03	8,40	36,62	0,00	689,03	8,42	0,00	0,00	0,00	-4,80
29	260	32,10	13,24	1,01	0,00	0,03	3,09	75,62	0,00	999,20	6,65	0,00	0,00	0,10	3,90
30	236	30,70	32,95	10,64	0,69	0,44	4,94	16,36	0,00	440,89	19,05	10,40	0,00	0,10	-4,60
31	108	28,80	14,64	1,86	0,38	0,04	5,23	12,07	0,00	661,33	9,75	0,00	0,00	2,10	-4,00
32	912	32,90	5,91	2,53	0,00	0,05	7,42	305,62	0,00	515,11	70,00	1,30	0,00	0,00	2,50
33	3240	32,20	15,49	5,07	0,22	0,00	18,10	998,95	2,20	67,57	1016,78	4,10	0,00	0,00	0,00
34	2504	23,50	104,19	56,18	0,36	0,70	23,10	566,62	0,30	118,53	928,17	47,30	0,00	5,50	1,00
35	2256	29,40	18,02	21,63	0,90	0,03	22,82	611,56	0,00	738,01	694,24	11,70	0,00	0,00	-1,30
36	708	30,20	9,86	2,03	0,78	0,06	9,88	205,19	0,00	321,25	54,05	18,00	0,00	6,80	-2,50
37	112	32,20	10,42	1,01	0,57	0,06	7,14	19,09	0,00	560,53	15,95	0,00	0,00	0,00	1,80
38	252	27,80	39,71	4,22	0,00	0,05	3,63	26,33	0,00	368,88	23,04	60,50	0,00	0,00	-3,90
39	946	29,20	28,45	28,88	0,26	0,06	0,60	198,00	0,30	326,79	6,79	71,30	0,02	0,00	-5,10
40	544	28,50	70,12	12,00	0,05	0,25	13,10	77,28	0,00	403,22	57,15	33,60	0,00	1,40	3,80
41	620	29,60	9,01	3,55	0,54	0,06	10,19	213,25	0,00	867,38	11,52	0,00	0,00	0,00	3,90
42	568	30,10	1,97	1,01	0,00	0,02	3,94	189,58	0,00	111,00	62,47	31,10	0,00	0,00	0,40



Gambar 4. Diagram Piper contoh air tanah tertekan daerah penelitian.

Tabel 2. Karakteristik hidrokimia fasies air tanah tertekan daerah penelitian.

Parameter Hidrokimia	Fasies Ca-HCO <sub>3</sub>			Fasies Na-HCO <sub>3</sub>			Fasies Na-Cl		
	Min.	Maks.	Rata-rata	Min.	Maks.	Rata-rata	Min.	Maks.	Rata-rata
DHL (μS/cm)	145,00	736,00	349,18	154,00	3100,00	720,61	2760,00	13000,00	5638,74
TDS (mg/L)	108,00	544,00	267,27	112,00	1908,00	528,88	2256,00	12724,00	4742,67
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	14,60	70,10	39,78	2,00	42,00	13,84	6,80	236,50	82,98
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	1,90	23,00	8,52	1,00	29,70	5,72	5,10	441,00	101,95
Na <sup>+</sup> (mg/L)	11,90	77,30	27,16	19,10	597,70	152,33	566,60	3480,70	1290,95
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	82,00	375,50	188,12	67,60	867,40	376,52	58,70	999,20	484,50
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	9,70	57,20	24,33	6,60	419,80	51,19	662,30	7598,10	2279,96

dan analisis spasial dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ArcMap 10*. Analisis isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H dilakukan di Technische Universitat Darmstadt, Jerman.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis hidrokimia dari 42 conto air tanah dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil analisis tersebut menunjukkan harga *charge balance error* (CBE) berkisar antara 0,1 % hingga 6,9 % dengan rata-rata sebesar 2,5 %. Untuk mengetahui proses – proses hidrogeokimia pada setiap zona air tanah yang dicirikan oleh kandungan ion – ion terlarut maka analisis fasies air tanah menjadi hal yang sangat penting (Hiscok, 2005). Salah satu metode analisis yang umum digunakan untuk mengetahui fasies air tanah adalah menggunakan *Trilinear*

Tabel 3. Klasifikasi derajat salinitas air berdasarkan zat padat terlarut (TDS) menurut USGS (Hem, 1970 dalam Thangarajan, 2007).

Description	TDS (mg/L)
<i>Fresh</i>	< 1000
<i>Slightly saline</i>	1000 – 3000
<i>Moderately saline</i>	3000 – 10000
<i>Very saline</i>	10000 – 35000
<i>Brine</i>	> 35000

*Piper Plot* (Piper 1944 dalam Clark, 2015). Hasil analisis menunjukkan fasies air tanah secara garis besar dikelompokkan menjadi tiga yaitu Ca-HCO<sub>3</sub> (11 conto), Na-HCO<sub>3</sub> (25 conto), dan Na-Cl (6 conto) (Gambar 4). Karakteristik hidrokimia fasies air tanah berupa daya hantar listrik (DHL),

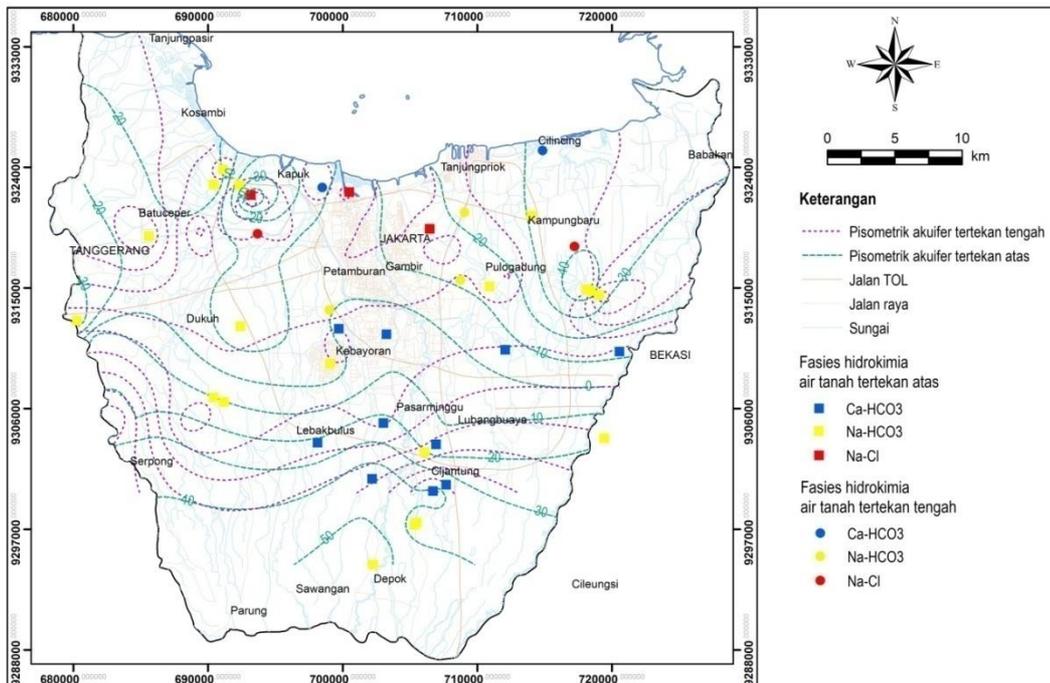
zat padat terlarut (TDS), dan kandungan ion utama masing – masing fasies air tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Salah satu parameter hidrokimia yang dapat digunakan untuk mengetahui tingkat salinitas air tanah adalah zat padat terlarut (Hem, 1970 dalam Thangarajan, 2007). Menurut Davis dan De Wiest (1967), zat padat terlarut merupakan jumlah semua mineral terlarut yang tertinggal ketika air teruapkan semuanya atau jumlah konsentrasi garam yang terkandung dalam air. Berdasarkan atas klasifikasi salinitas air tanah menurut USGS (Hem, 1970 dalam Thangarajan, 2007) (Tabel 3), maka fasies Ca-HCO<sub>3</sub> merupakan air tanah yang bersifat tawar, fasies air tanah Na-HCO<sub>3</sub> merupakan air tanah tawar hingga sedikit asin, dan fasies air tanah Na-Cl merupakan air tanah yang bersifat sedikit asin hingga sangat asin.

Pada sistem akuifer tertekan atas, fasies Ca-HCO<sub>3</sub> memiliki sebaran pada bagian tengah hingga selatan CAT Jakarta, yaitu sekitar Kebayoran, Lebakbulus hingga Cijantung, dan pada bagian timur yaitu sekitar Duren Sawit hingga daerah perbatasan dengan Kota Bekasi. Fasies Na-HCO<sub>3</sub> memiliki sebaran yang relatif merata pada semua bagian CAT Jakarta kecuali pada bagian tengah. Fasies Na-Cl memiliki sebaran terutama pada bagian utara CAT Jakarta yang berbatasan dengan

Laut Jawa, yaitu di sekitar daerah Kapuk, Tongkol, dan Sunter. Pada sistem akuifer tertekan tengah, fasies Ca-HCO<sub>3</sub> terdapat pada dua sumbu bor di bagian utara, yaitu pada lokasi Penjaringan dan KBN Marunda (Cilincing). Fasies Na-HCO<sub>3</sub> memiliki sebaran yang relatif merata pada semua bagian CAT Jakarta. Fasies Na-Cl memiliki sebaran terutama pada bagian utara CAT Jakarta yang berbatasan dengan Laut Jawa, yaitu daerah Daan Mogot, Tongkol, dan Cakung. Air tanah baik dari sistem akuifer tertekan atas maupun tertekan tengah dengan fasies Na-Cl secara umum berada pada pusat penurunan muka air tanah (*cone depression*), antara lain pada Kantor Kelurahan Kapuk (Cengkareng, Jakarta Barat), PT ABC Battery (Daan Mogot, Jakarta Barat), Sunter Jakarta Utara, dan Tambun Rengas (Cakung, Jakarta Timur). (Gambar 5).

Untuk mengetahui penyebab keasinan atau salinitas air tanah tertekan di daerah penelitian dilakukan beberapa analisis bivariat parameter hidrokimia yang saling berhubungan, yaitu besaran nilai TDS terhadap jarak pengambilan contoh air dari pantai, rasio Na/Cl, dan Cl/HCO<sub>3</sub>. Rasio Na/Cl (satuan dalam mg/L) berguna untuk mengetahui derajat konsentrasi ion natrium yang nilainya berbanding terbalik dengan salinitas. Rasio Na/Cl pada air laut adalah sekitar 0,85 dan



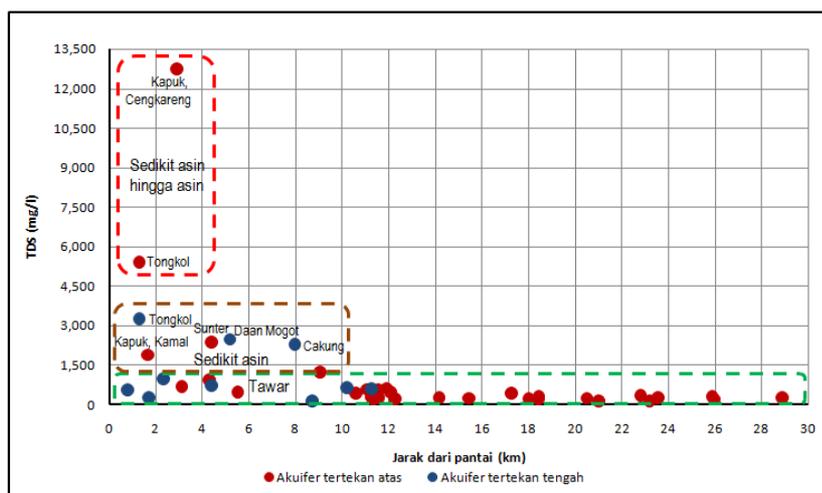
Gambar 5. Zonasi fasies air tanah tertekan daerah penelitian.

semakin tinggi rasio Na/Cl maka salinitas semakin rendah (Richter dan Kreitler, 1991). Rasio Na/Cl <1 kemungkinan disebabkan oleh proses pencampuran air laut ke dalam akuifer atau oleh karena rendahnya tingkat pencucian air hujan yang mengalami perkolasi (Sammans dan Jaks, 2007), sedangkan tingginya nilai rasio Na/Cl menunjukkan adanya proses interaksi antara air tanah dengan batuan melalui proses hidrolisis dan reaksi asam basa (Yang dan Guang, 2013). Selain rasio Na/Cl, rasio Cl/HCO<sub>3</sub> (satuan dalam mg/L) juga dapat digunakan sebagai indikator pengaruh air laut terhadap keasinan air tanah (Revelle, 1941). Rasio Cl/HCO<sub>3</sub> < 0,5 untuk tidak terpengaruh, 0,55 hingga 6,6 untuk terpengaruh sedikit hingga sedang, dan >6,6 untuk terpengaruh tinggi.

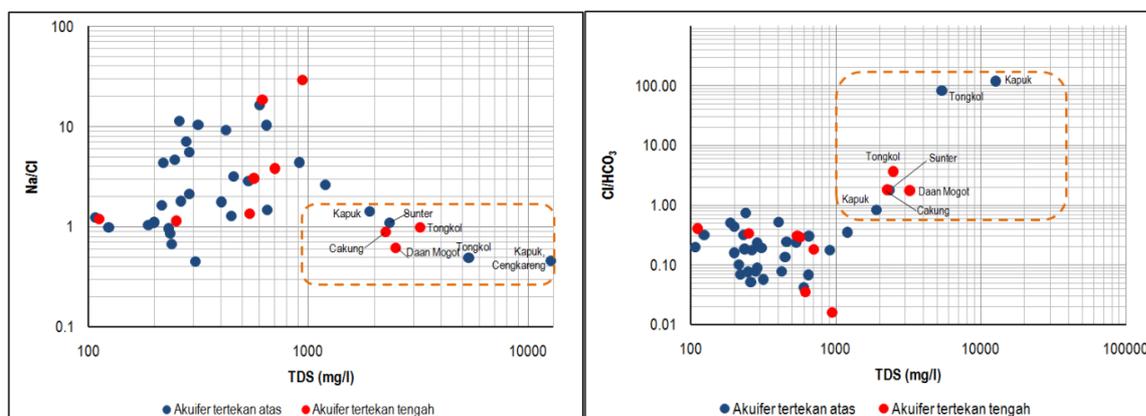
Grafik bivariat antara nilai TDS dengan jarak lokasi pengambilan contoh air terhadap pantai dapat dilihat pada Gambar 6. Dari grafik tersebut

terlihat bahwa air tanah yang bersifat asin berasal dari sistem akuifer tertekan atas dengan jarak dari pantai < 3 km, yaitu pada conto air dari Kapuk dan Tongkol, sedangkan air tanah yang bersifat sedikit asin berasal baik dari akuifer tertekan atas maupun akuifer tertekan tengah dengan jarak pengambilan kurang dari 9 km dari pantai. Air tanah yang bersifat tawar baik pada sistem akuifer tertekan atas maupun akuifer tertekan tengah memiliki jarak yang bervariasi dari garis pantai dan secara umum berada lebih dari 10 km.

Pada grafik bivariat antara nilai TDS (Gambar 7) dengan rasio Na/Cl menunjukkan bahwa conto dengan nilai TDS > 1000 mg/L dan rasio Na/Cl < 1 berasal dari daerah Tongkol, Sunter, dan Kapuk untuk akuifer tertekan atas, dan dari daerah Daan Mogot, Cakung, dan Tongkol untuk akuifer tertekan tengah. Hal tersebut menunjukkan bahwa keasinan air tanah pada daerah tersebut lebih ditentukan oleh tingginya konsentrasi ion Cl



Gambar 6. Grafik nilai TDS dengan jarak lokasi pengambilan conto air tanah dari pantai.



Gambar 7. Grafik nilai TDS terhadap Na/Cl (kiri) dan Cl/HCO<sub>3</sub> (kanan).

Tabel 4. Hasil analisis <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H air tanah tertekan daerah penelitian.

No.	X	Y	Lokasi	Elv. (maml)	Saringan (mbmt)	<sup>18</sup> O (‰)	<sup>2</sup> H (‰)
1	706488	9319400	Sunter III, Jakarta Utara	2,20	115-132	-5,94	-33,19
2	690442	9322716	Tegal Alur, Jakarta Barat	15,00	100-120	-5,92	-32,86
3	691128	9323838	Nagamas, Kapuk Kamal, Jakarta Utara	2,70	<140	-5,04	-29,24
4	693202	9321935	Kelurahan Kapuk, Jakarta Barat	7,00	96-100	-5,63	-31,94
5	703037	9304920	Pasar Minggu II, Jakarta Selatan	30,00	92-96	-5,41	-31,49
6	702200	9300750	Jagakarsa, Jakarta Selatan	61,21	60-67	-6,18	-34,30
7	680294	9312565	PT. Yuasa Battery, Tangerang	20,00	71-83	-6,15	-34,04
8	680426	9312381	PT. Yuasa Battery, Tangerang	20,00	<140	-6,27	-34,44
9	702275	9294360	Hotel Bumi Wiyata, Depok	80,00	<140	-6,04	-32,83
10	707698	9300312	PT. Centex, Ciracas, Jakarta Timur	50,00	<140	-5,51	-31,45
11	707615	9300310	PT. Centex, Ciracas, Jakarta Timur (pantau)	50,00	58-122	-5,76	-32,34
12	706729	9299843	PT. Khong Guan, Ciracas, Jakarta Timur	87,00	<140	-6,44	-35,19
13	700503	9322149	Tongkol X, Jakarta Utara	2,80	210-245	-5,80	-34,22
14	706496	9319448	Sunter II, Jakarta Utara	2,40	173-177	-6,11	-32,86
15	717243	9318096	Tambun Rengas, Cakung, Jakarta Timur	5,24	187-190	-6,26	-33,76

akibat adanya proses intrusi air laut. Tingkat pengaruh air laut terhadap air tanah berdasarkan atas rasio Cl/HCO<sub>3</sub> pada sistem akuifer tertekan atas menunjukkan bahwa conto dari lokasi Tongkol dan Kapuk terpengaruh tinggi, sedangkan pada lokasi Sunter dan Kapuk terpengaruh sedikit hingga sedang. Untuk conto air tanah dari sistem akuifer tertekan tengah terlihat bahwa untuk lokasi Tongkol, Cakung, dan Daan Mogot terpengaruh sedikit hingga sedang.

Hasil penelitian komposisi isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H pada conto air tanah dapat dilihat pada Tabel 4. Dari tabel tersebut terlihat bahwa komposisi isotop air tanah tertekan yang dianalisis berkisar antara -6,44 ‰ hingga -5,04 ‰ (rata-rata -5,90 ‰) untuk isotop <sup>18</sup>O, dan antara -35,19 ‰ hingga -29,24 ‰ (rata-rata -32,94 ‰) untuk isotop <sup>2</sup>H. Dalam melakukan analisis isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H digunakan persamaan air meteorik lokal (*local meteoric water line*) LMWL berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Djijono (2002), yaitu  $\delta^2H = 7,9\delta^{18O} + 14,1$  dengan R = 0,97.

Analisis intrusi air laut berdasarkan estimasi komposisi isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H dilakukan dengan menggunakan formulasi pencampuran antara air

tanah yang bersifat tawar dengan air laut. Kandungan isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H air laut daerah Jakarta diambil dari hasil penelitian Pratikno *et al.* (2009), yaitu sebesar -0,41 ‰ untuk isotop <sup>18</sup>O dan -6,40 ‰ untuk isotop <sup>2</sup>H. Kandungan isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H air tanah segar berdasarkan hasil penelitian Wandowo *et al.* (2001) yang diambil dari daerah Bogor (elevasi 200 maml) sebesar -6,3 ‰ untuk isotop <sup>18</sup>O dan -35,00 ‰ untuk isotop <sup>2</sup>H. Di antara titik isotop air tanah segar dengan air laut dibuat *trendline* garis pencampuran/intrusi air laut ke dalam akuifer air tanah dan diperoleh persamaan  $\delta^2H = 4,855\delta^{18O} - 4,409$ .

Pengeplotan hasil pengujian isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H terhadap LMWL dan garis pencampuran air tanah dengan air laut dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan atas Gambar 8 terlihat bahwa sebagian conto air tanah masih mengikuti garis air hujan lokal, akan tetapi beberapa conto telah mengalami pengayaan kandungan isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H yang relatif mengikuti garis pencampuran air tanah dengan air laut. Besarnya nilai pencampuran air laut dengan air tanah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan umum pencampuran

dua sumber air yang berbeda kandungan isotopnya (Pujiindiyati et al., 2012);

$$\delta^{18}O = \delta_a^{18}OX + \delta_b^{18}O(1 - X) \dots\dots(2)$$

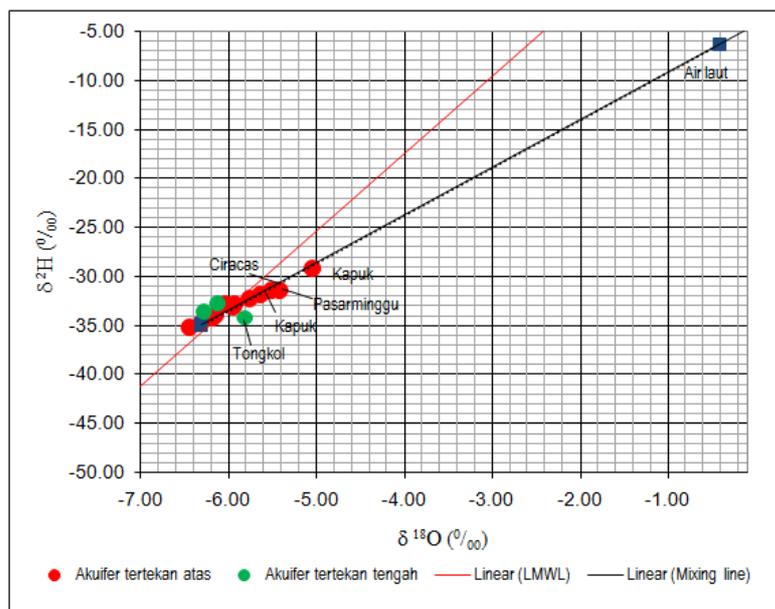
a dan b adalah jenis dua larutan, x dan (1-x) adalah fraksi mol dari H<sub>2</sub>O larutan a dan b sedangkan  $\delta^{18}O$  adalah nilai isotop yang terukur. Dengan memasukkan data  $\delta_a^{18}O$  sebesar untuk air laut dan  $\delta_b^{18}O$  sebesar untuk air tanah tawar dari Bogor, maka diperoleh fraksi mol dari air laut. Hasil perhitungan dengan rumus tersebut menunjukkan bahwa tingkat pencampuran air tanah segar dengan air laut pada daerah penelitian bervariasi dari 0% hingga 21,36% dengan rata-

rata sekitar 6,99%. Berikut hasil perhitungan tingkat pencampuran air tanah dengan air laut dengan nilai di atas 5% (Tabel 5).

Berdasarkan perhitungan tersebut terlihat bahwa conto dari daerah Kapuk mengalami tingkat pencampuran 11,29% dan 21,36%. Conto lainnya yang berasal dari bagian utara CAT Jakarta yaitu Sunter, Tongkol, dan Tegal Alur menunjukkan tingkat pencampuran 6,15%, 8,47%, dan 6,43%. Hal yang relatif “aneh” terjadi pada conto dari Ciracas dan Pasarminggu yang memiliki tingkat pencampuran 13,46% dan 15,11%. Kedua conto tersebut relatif jauh dari garis pantai, yaitu sekitar 23 km untuk lokasi Ciracas dan 18 km untuk lokasi Pasarminggu.

Tabel 5. Besaran pencampuran air laut dengan air tanah tertekan daerah penelitian.

ID	X	Y	Lokasi	Pencampuran (%)
1	706488	9319400	Sunter III, Jakarta Utara	6.15
2	690442	9322716	Tegal Alur, Jakarta Barat	6.43
3	691128	9323838	Nagamas, Kapuk Kamal, Jakarta Utara	21.36
4	693202	9321935	Kelurahan Kapuk, Jakarta Barat	11.29
5	703037	9304920	Pasar Minggu II, Jakarta Selatan	15.11
10	707698	9300312	PT. Centex, Ciracas, Jakarta Timur	13.46
11	707698	9300312	PT. Centex, Ciracas, Jakarta Timur (pantau)	9.17
13	700503	9322149	Tongkol X, Jakarta Utara	8.47



Gambar 8. Pengeplotan isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H terhadap LMWL dan garis pencampuran air tanah dengan air laut.

Untuk mengetahui tingkat intrusi air laut yang lebih pasti, dilakukan elaborasi beberapa parameter yang saling berkaitan yaitu jarak pengambilan contoh air dari pantai, tingkat keasinan air (berdasarkan nilai TDS), fasies

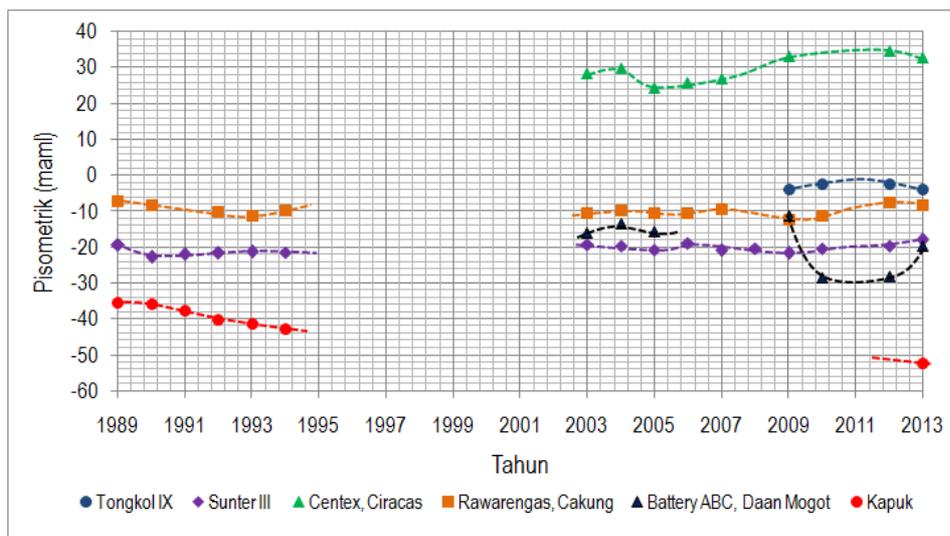
hidrokimia, rasio Cl/HCO<sub>3</sub> dan Na/Cl, serta tingkat pencampuran dengan air laut berdasarkan isotop <sup>18</sup>O dan <sup>2</sup>H. Ringkasan dari analisis beberapa parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 6. Selain parameter tersebut, informasi

Tabel 6. Data kondisi parameter intrusi air laut daerah penelitian.

No.	X	Y	Lokasi	Saringan (mbmt)	Jarak dari Pantai (km)	TDS (mg/L)	Fasies Hidrokimia	Cl/HCO <sub>3</sub>	Na/Cl	Isotop <sup>18</sup> O & <sup>2</sup> H
1	700503	9322149	Tongkol IX	96-125	1.27	5384 (asin)	Na-Cl	+	+	x
2	691128	9323838	Nagamas, Kapuk	< 140	1.67	1908 (sedikit asin)	Na-HCO <sub>3</sub>	+	+	+
3	693202	9321935	Kel. Kapuk	96-100	2.93	12724 (sangat asin)	Na-Cl	+	+	+
4	706488	9319400	Sunter III	115-132	4.43	2348 (sedikit asin)	Na-Cl	+	+	+
5	703037	9304920	Pasar Minggu II	92-96	17.99	200 (tawar)	Ca-HCO <sub>3</sub>	-	-	+
6	707698	9300312	Centex, Ciracas	58-122	23.17	108 (tawar)	Ca-HCO <sub>3</sub>	-	-	+
7	700503	9322149	Tongkol X, Jakut	210-245	1.27	3240 (asin)	Na-Cl	+	+	+
8	693698	9319045	ABC Battery, Daan Mogot	149-162	5.16	2504 (sedikit asin)	Na-Cl	+	+	x
9	717243	9318096	Tambun Rengas, Cakung	187-190	7.94	2256 (sedikit asin)	Na-Cl	+	+	-

Keterangan

- + Terindikasi intrusi air laut
- Tidak terindikasi intrusi air laut
- x Tidak ada data



Gambar 9. Hidrograf pisometrik beberapa sumur bor di daerah penelitian.

hidrograf pisometrik pada beberapa sumur bor juga digunakan sebagai data penunjang seperti yang disajikan pada Gambar 9.

Berdasarkan atas Tabel 5 dan Gambar 9 terlihat bahwa pada sistem akuifer tertekan atas, conto dari lokasi Kapuk terindikasi intrusi air laut yang ditunjukkan oleh semua parameter. Indikasi intrusi air laut tersebut juga diperkuat dengan penurunan pisometrik yang terus berlangsung hingga saat ini. Tercatat pada tahun 1989, 1994, dan 2013 masing – masing pisometrik berada pada elevasi 35,50; 42,90; dan 52,33 di bawah muka laut. Penurunan pisometrik sekitar 0,74 meter per tahun tersebut dapat dijadikan bukti pengambilan air tanah yang sangat intensif hingga saat ini.

Pada conto dari daerah Tongkol dan Sunter, adanya pengaruh intrusi air laut ditunjukkan oleh hampir semua indikator, kecuali parameter Na/Cl untuk lokasi Sunter, sedangkan untuk lokasi Tongkol tidak terdapat data isotop. Pisometrik pada lokasi tersebut relatif tidak mengalami penurunan. Hal tersebut terlihat di lokasi Tongkol IX pada tahun 2009 dan 2013 masing – masing berada pada elevasi 3,8 dan 4,12 meter di bawah muka laut, bahkan untuk lokasi Sunter III mengalami kenaikan yaitu pada tahun 1989 dan 2013 masing – masing 19,41 dan 17,98 di bawah muka laut. Pada conto dari daerah Pasarminggu dan Ciracas, meskipun dari isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$  mengindikasikan intrusi air laut, tetapi parameter lainnya tidak menunjukkan terpengaruh oleh air laut. Selain itu, lokasi tersebut relatif jauh dari pantai, yaitu 18 dan 23 km, serta air yang bersifat tawar. Perubahan pisometrik di lokasi ini juga tidak mengalami penurunan, bahkan sebaliknya. Hal tersebut terlihat dari data hidrograf pisometrik lokasi Ciracas yang pada tahun 2003 dan 2013 masing – masing pada elevasi 28,17 dan 32,61 meter di atas muka laut.

Pada sistem akuifer tertekan tengah, conto dari lokasi Tongkol terindikasi intrusi air laut yang ditunjukkan oleh semua parameter. Meskipun demikian, pada lokasi ini tidak terlihat adanya fenomena penurunan pisometrik, bahkan hingga saat ini masih bersifat positif (*self flowing*). Conto dari daerah Daan Mogot dan Cakung menunjukkan adanya pengaruh intrusi air laut. Hal tersebut ditunjukkan oleh hampir semua parameter, kecuali untuk lokasi Cakung yang berdasarkan data isotop tidak menunjukkan adanya pengaruh intrusi air laut. Penurunan

pisometrik di lokasi tersebut terlihat dari hidrograf pada sumur bor ABC Battery Daan Mogot, yaitu pada tahun 2003 dan 2013 masing – masing berada pada level elevasi 16 dan 19,78 meter di bawah muka laut. Pisometrik yang relatif stabil ditunjukkan dari hidrograf sumur bor di daerah Cakung, yaitu pada tahun 1989 dan 2013 masing – masing 7,38 dan 8,52 meter di bawah muka laut.

## KESIMPULAN

Analisis parameter hidrokimia berupa TDS, rasio Na/Cl, dan rasio Cl/HCO<sub>3</sub>, serta isotop  $\delta^{18}\text{O}$  dan  $\delta^2\text{H}$  pada sistem akuifer tertekan di CAT Jakarta telah bermanfaat untuk mengidentifikasi intrusi air laut. Hasil analisis menunjukkan air tanah yang bersifat asin berasal dari sistem akuifer tertekan atas dengan jarak kurang dari 3 km dari pantai, sedangkan air tanah yang bersifat sedikit asin berasal baik dari akuifer tertekan atas maupun akuifer tertekan tengah dengan jarak kurang dari 9 km dari pantai. Air tanah yang terindikasi intrusi air laut dengan TDS > 1000 mg/L, Na/Cl < 1, dan Cl/HCO<sub>3</sub> > 0,55 ditunjukkan oleh conto dari daerah Kapuk, Tongkol, dan Sunter untuk akuifer tertekan atas, serta daerah Daan Mogot, Cakung, dan Tongkol untuk akuifer tertekan tengah. Hanya di daerah Kapuk proses intrusi air laut tersebut berhubungan dengan penurunan pisometrik yang masih berlangsung hingga saat ini. Secara kuantitatif, intrusi air laut di daerah ini telah mencapai tingkat pencampuran sekitar 11 – 21 % berdasarkan komposisi isotop  $^{18}\text{O}$  dan  $^2\text{H}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Gamal, M., Fukuda, Y. and Deguchi, T., 2009. Land subsidence and urban development in Jakarta (Indonesia), 7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity, Hanoi, Vietnam.
- Assegaf, A., 1998. Hidrodinamika Airtanah Alamiah Cekungan Jakarta, Tesis Magister, Dep. Teknik Geologi ITB.
- Clark, I., 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, US.

- Davis, S. N., dan De Wiest, R. J. M., 1967, Hydrogeology, 1<sup>st</sup> ed., John Wiley and Sons, New York
- Djaeni, A., Hobler, M., Schmidt, G., Soekardi, P. and Sofner, B., 1986. Hydrological Investigations in the Greater Jakarta Area of Indonesia. Salt Water Intrusion Meeting, Delft, The Netherlands, pp. 165-176.
- Djijono, 2002. Intrusi Air Laut Pada Air Tanah Dangkal di Wilayah DKI Jakarta. Institut Pertanian Bogor, Bogor, 115 pp.
- Fachri, M., Djuhaeni, Hutasoit, L. M., dan Ramdhan, A. M., 2002. Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Airtanah Jakarta. Buletin Geologi, 34 (3), 169-189.
- Harsolumakso, A. H., 2001. Tinjauan Struktur Geologi Terhadap Daerah Genangan, Kumpulan Makalah Seminar Sehari: Tinjauan Geologi Terhadap Daerah Genangan di Wilayah Propinsi DKI Jakarta.
- Hehanusa, P., 1979. Penyusupan air laut ke dalam cekungan artois Jakarta, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan IAGI VII, Bandung.
- Hiscok, K. M., 2005. Hydrogeology, Principles and Practice, Blackwell Publishing, USA.
- Hutasoit, L. M. and Pindratno, M. H., 1998. Groundwater salinity and its management in Jakarta. Buletin Geologi Tata Lingkungan, 22, 45-54.
- Hutasoit, L. M., Yulianto, E., dan Pindratno, M. H., 2000. Tertiary-Quaternary Boundary in Jakarta and Some of Its Implications on Environmental Geologic Management, Prosiding IAGI 29<sup>th</sup> Ann. Conv., Bandung, 3, 123 – 129.
- IWACO, Consultants, D., Hydraulics, D., TNO, Karya, P.I., Hexagon, P.K. and Associates, P.W., 1994. Jabotabek Water Resources Management Study. Final Report. Volume 7. Annex 12. Groundwater Salinity, Ministry of Public Work, Directorate General of Water Resources Development.
- Murdohardono, D. and Sudarsono, U., 1998. Land Subsidence Monitoring System In Jakarta, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project: Volcanology, Tectonics, Flood and Sediment Hazard, Bandung, pp. 243-256.
- Onodera, S., Saito, M., Sawano, M., Hosono, T., Taniguchi, M., Shimada, J., Umezawa, Y., Lubis, R.F., Buapeng, S. and Delinom, R., 2008. Effects Of Intensive Urbanization on the Intrusion of Shallow Groundwater Into Deep Groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta. Science of The Total Environment, 404, 401-410.
- Poespowardoyo, S. dan Purbohadiwidjoyo, M.M., 1975. Cekungan Artosis Jakarta, Jurnal Geologi Indonesia, 2 (1), 25-28.
- Poespowardoyo, S., 1986a. Peta Hidrogeologi Indonesia Lembar Jakarta, Jawa, Skala 1 : 250.000, Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Poespowardoyo, S., 1986b. Geological Aspect of The Aquifer System and The Groundwater Situation of The Jakarta Artesian Basin, Seminar of Geological Mapping in The Urban Development Economic and Social Commission for Asia and The Pacific, Bangkok.
- Pujiindiyati, E. R., Adi, N. S., dan Rustam, A., 2012. Studi Isotop Oksigen-18 dan Deuterium Pada Air Laut di Teluk Banten, Jurnal Teknologi Lingkungan, Edisi Khusus "Hari Bumi", 123-131.
- Pratikno, B., Abidin, Z., Sidauruk, P., dan Satrio, 2009. Aplikasi Isotop Alam <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, dan <sup>14</sup>C Untuk Studi Air Tanah di Kepulauan Seribu, Jurnal Ilmiah Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, 5 (1), 68-82.
- Revelle, R., 1941. Criteria for Recognition of Sea Water in Groundwater, Trans. Am. Geophys. Union, 22, 593–597.
- Richter, B. C. and Kreitler, C. W., 1991. Identification of Sources of Groundwater Salinization Using Geochemical Techniques: U.S. Environmental Protection Agency

- document number 600/2-91/064, 259 pp.
- Sammas, M. I., dan Jacks, G., 2007. Sea Water Intrusion in the Salalah Plain Aquifer, Oman. *Journal of Environmental Hydrology*, 15, 1-14.
- Soefner, B., Hobler, M. and Schmidt, G., 1986. Jakarta groundwater study, Directorate of Environmental Geology, Bandung & Federal Institute of Geosciences and Natural Resources, Hannover, Bandung.
- Soenarto, B. and Widjaya, J.M., 1985. Salt water intrusion in Jakarta groundwater basin, Regional Workshop on Salt Water Intrusion in Large Coastal Cities, UNESCO, Manila, The Philippines.
- Thangarajan, M., 2007. *Groundwater : Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management*, Springer, New Delhi, India.
- Tjahjadi, B., 1991. Indonesia: The impact of abstraction on groundwater quality and monitoring in the Jakarta region, *Groundwater Quality and Monitoring in Asia and the Pacific*, Water Resources Series, ESCAP, Bangkok, Thailand.
- Tirtomihardjo, H., 1994. Intrusi air laut/asin di Jakarta, Simposium Air Jakarta, Pusat Kajian Perkotaan, Universitas Tarumanegara, Jakarta.
- Tirtomihardjo, H. and Setiawan, T., 2013. Penyelidikan konservasi (konfigurasi-potensi-zona konservasi) air tanah CAT Jakarta, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, Bandung.
- Turkandi, T., Sidarto, dan Agustiyanto, D.A., 1992. Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Sekala 1 : 100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Wandowo, Abidin, Z., Alip, dan Djiono, 2001. Daerah Resapan Air Tanah Cekungan Jakarta, Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi, Jakarta.
- Yang He-Hai dan Li Xu-Guang, 2013. Hydrochemical Characteristics and Evolution Laws of Shallow Groundwater in Shuangliao City, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5 (11), 283 – 288.