



PEMODELAN INTRUSI AIR ASIN PADA AKUIFER PANTAI (STUDI KASUS: DKI JAKARTA)

SALT WATER INTRUSION MODELING IN COASTAL AQUIFERS (CASE STUDY: DKI JAKARTA)

Alan Wijaya¹⁾ Arno Adi Kuntoro¹⁾ Edy Anto Soentoro Gondodinoto¹⁾

¹⁾ Institut Teknologi Bandung
Jl. Tamansari No. 64, Tamansari 40116, Bandung, Indonesia
E-Mail: alanks3m@gmail.com

Diterima: 7 November 2018; Direvisi: 1 Juli 2019; Disetujui: 8 Juli 2019

ABSTRACT

Main issues frequently faced by communities living in the city of Jakarta is salt water intrusion. This paper analyzes the extent of the distribution of saltwater contamination to coastal aquifers in Jakarta, the method used is the open source program FREEWAT. modeling is carried out in five scenarios, namely (1) reduction of 50% of groundwater use, (2) reduction of 25% of groundwater use, (3) existing groundwater use in 2012, (4) increase of 25% of groundwater use, and (5) increase of 50% of groundwater use. From the modeling results, the distribution of saltwater contamination on each layer of the aquifer of Jakarta. In unconfined aquifer the existing condition is scenario 3 intrusion as far as 1.604 m, on scenario 1 there is an intrusion decrease of 38%, in scenario 2 there is an intrusion decrease of 13%, in scenario 4 there is an increase in intrusion by 17% and on scenario 5 increase intrusion by 25%. In upper confined aquifer, the existing condition, namely scenario 3, has occurred as much as 1.809 m intrusion, in scenario 1 there is an intrusion decrease of 23%, in scenario 2 there is an intrusion decrease of 8%, in scenario 4 there is an increase in intrusion by 19% and in scenario 5 increase intrusion by 26%. In middle confined aquifer, the existing condition is scenario 3, 1.927 m intrusion occurs, on the scenario 1 there is an intrusion decrease of 23%, in scenario 2 there is an intrusion decrease of 9%, in scenario 4 there is an increase in intrusion by 16% and in the scenario 5 increase intrusion by 22%.

Keywords: Groundwater, Intrusion, Salt Water, FREEWAT, Jakarta

ABSTRAK

Masalah yang kerap dihadapi oleh masyarakat di Kota Jakarta adalah intrusi air laut. Naskah ini menganalisis sejauh mana distribusi kontaminasi air asin terhadap akuifer pantai di Jakarta, menggunakan metode program open source FREEWAT. Pemodelan dilakukan dalam 5 skenario, yaitu: (1) Pengurangan 50% penggunaan air tanah, (2) Pengurangan 25% penggunaan air tanah, (3) Penggunaan air tanah eksisting tahun 2012, (4) Peningkatan 25% penggunaan air tanah, dan (5) Peningkatan 50% penggunaan air tanah. Hasil pemodelan diperoleh pada akuifer tidak tertekan, kondisi eksisting yaitu skenario 3 terjadi intrusi sejauh 1.604 m, skenario 1 terjadi penurunan intrusi sebesar 38%, skenario 2 terjadi penurunan intrusi sebesar 13%, skenario 4 terjadi peningkatan intrusi sebesar 17% dan skenario 5 peningkatan intrusi sebesar 25%. Pada akuifer tertekan atas, kondisi eksisting yaitu skenario 3 terjadi intrusi sejauh 1.809 m, skenario 1 terjadi penurunan intrusi sebesar 23%, skenario 2 terjadi penurunan intrusi sebesar 8%, skenario 4 terjadi peningkatan intrusi sebesar 19% dan skenario 5 peningkatan intrusi sebesar 26%. Pada akuifer tertekan tengah, kondisi eksisting yaitu skenario 3 terjadi intrusi sejauh 1.927 m, skenario 1 terjadi penurunan intrusi sebesar 23%, skenario 2 terjadi penurunan intrusi sebesar 9%, skenario 4 terjadi peningkatan intrusi sebesar 16% dan skenario 5 peningkatan intrusi sebesar 22%.

Kata Kunci: Air Tanah, Intrusi, Air asin, FREEWAT, Jakarta,

PENDAHULUAN

Ada beberapa persoalan lingkungan yang kerap dihadapi oleh masyarakat yang mendiami kawasan pesisir pantai di Indonesia khususnya di Kota Jakarta, salah satunya adalah intrusi air asin. Hal ini terjadi di mana air tanah sedang dipompa dari akuifer yang ada dalam hidrolik dengan laut, gradien diinduksi dapat menyebabkan migrasi dari air garam dari laut menuju air tawar, membuat air tawar yang tidak dapat digunakan. Eksploitasi air tanah secara berlebihan dan tidak terkontrol dapat menyebabkan turunnya permukaan tanah diakibatkan oleh hilangnya air yang mengisi rongga pada butiran tanah. Selain itu kerusakan lingkungan lain yang masih memiliki keterkaitan dengan masalah penurunan tanah adalah intrusi air asin. Intrusi air asin ini merupakan pergerakan air asin ke akuifer air tawar yang dapat mengkontaminasi sumber air minum. Penyebab terjadinya intrusi air asin ini adalah pengambilan air tanah dari akuifer pantai yang dapat meningkatkan intrusi air laut karena tekanan air tanah berkurang dan menjadi relatif lebih kecil dibandingkan tekanan dari air laut.

Berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penduduk DKI (Daerah Khusus Ibu Kota) Jakarta pada tahun 2015 mencapai 10,8 juta jiwa, kemudian meningkat menjadi 10,28 juta jiwa pada tahun 2016, dan bertambah menjadi 10,37 juta jiwa pada tahun 2017. Artinya pertumbuhan jumlah penduduk di Kota Jakarta sangat signifikan. Selama dua tahun terakhir jumlah penduduk bertambah 269 jiwa setiap hari atau 11 orang per jam (BPS, 2018).

Perkembangan penduduk dan pertumbuhan industri, bisnis, serta pemukiman yang pesat tentunya berbanding lurus dengan peningkatan jumlah kebutuhan air bersih sedangkan perubahan lahan akan mengurangi wilayah yang menjadi resapan air. Rendahnya kemampuan Perusahaan Air Minum (PAM) dalam menyediakan air bersih, yang masih berkisar 40% dan belum mengalami perkembangan yang signifikan menyebabkan penduduk dan masyarakat komersial mengambil sumber air tanah, yang mana struktur akuifer Jakarta dengan struktur lapisan akuifer relatif datar dan merupakan akuifer pesisir pantai menyebabkan wilayah Jakarta merupakan wilayah yang rawan untuk terjadinya intrusi air asin.

Berdasarkan uraian di atas, terdapat beberapa masalah pokok yang berkaitan dengan pengelolaan sumber daya air tanah di Jakarta, yaitu jumlah penduduk yang besar, pertumbuhan industri dan bisnis yang pesat, ketersediaan sumber daya air tanah dan kemampuan PAM yang

masih sangat terbatas, dan posisi Jakarta dengan sistem akuifernya berbatasan dengan pantai. Masalah-masalah pokok tersebutlah yang menyebabkan intrusi air asin di Jakarta semakin jauh masuk ke sistem akuifer air tanah tawar, sehingga diperlukannya tindakan yang tegas dari pemerintah DKI Jakarta dalam pemeliharaan lingkungan guna menjaga kualitas dan kuantitas air tanah itu sendiri dan peran serta dari masyarakat dalam pemeliharaan lingkungan tersebut.

Jumlah keberlanjutan airtanah akhir-akhir ini di Jakarta masih dalam tingkat kritis. Tanpa adanya intervensi jumlah air tanah masih terus mengalami penurunan dari tahun ke tahun (Wahyudi & Moersidik, 2015). Pada hasil penelitian terdahulu (Setiawan, dkk, 2017) menunjukkan pada akuifer tertekan atas intrusi terjadi kurang dari 3.000 meter dan pada akuifer tertekan tengan sejauh kurang dari 9.000 meter dengan sifat sedikit asin.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis sejauh mana distribusi kontaminasi air asin terhadap akuifer pantai di Jakarta. Hasil akhir yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah prediksi dari pemodelan yang dilakukan dapat mendekati kondisi sebenarnya di lapangan.

METODOLOGI

Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan berupa data sekunder yang di-peroleh dari instansi terkait dan internet yang sifatnya bebas untuk digunakan.

Tabel 1 Data-data sekunder yang digunakan

No	Jenis Peta/Data	Sumber Data	Keterangan
1	Peta Geologi	DGTL Bandung	1 Peta
2	Peta Hidrogeologi	DGTL Bandung	1 Peta
3	Data Spasial Wilayah Administrasi DKI Jakarta dan Sungai.	Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) DKI Jakarta	1 Data Kecamatan dan Provinsi
4	Data Lokasi Pompa	Jakarta Open Data	-
5	Data DEM 12,5 m Alos Palsar	Alaska Satellite Facility	1 DEM Jakarta
6	Data Kualitas Air Tanah	Balai Konservasi Air Tanah	Data tahun 2017
7	Data Penggunaan Air Tanah	Geomagz, (2014)	-

Pemodelan FREEWAT

Pemodelan FREEWAT dibuat berdasarkan evaluasi dan analisis data geologi, hidrogeologi, topografi serta konfigurasi dan parameter sistem akuifer daerah penelitian. Guna memperoleh distribusi sebaran intrusi air asin, digunakan 2 modul pada FREEWAT. Modul MODFLOW-2005 untuk memodelkan aliran air tanah dan model SEAWAT untuk memodelkan Solute Transport atau intrusi air asin. Berikut persamaan diferensial parsial untuk akuifer terbatas digunakan dalam MODFLOW adalah (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots (1)$$

dimana:

- $K_{xx}, K_{yy},$ dan K_{zz} : nilai konduktivitas hidrolis sepanjang sumbu koordinat $x, y,$ dan z (L/T);
- h : nilai potensiomatik head (L);
- W : fluks volumetrik per satuan volume yang mewakili sumber dan/atau tenggelamnya air, dimana nilai negatifnya adalah ekstraksi, nilai positif adalah injeksi (T⁻¹);
- S_s : penyimpanan spesifik dari bahan berpori (L⁻¹); dan
- t : waktu (T).

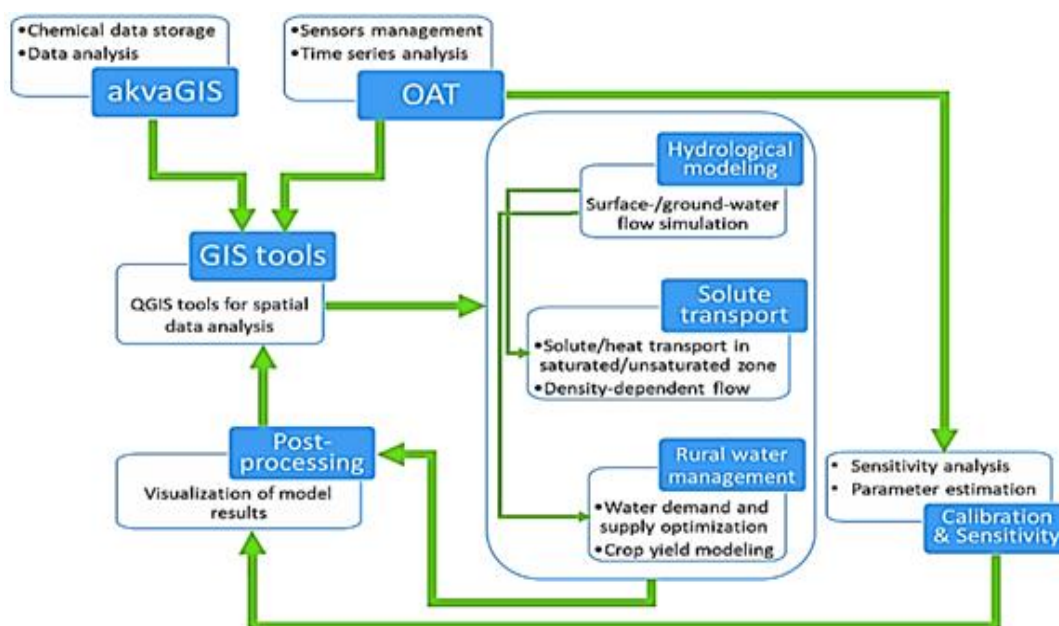
Sedangkan pada SEAWAT (Guo & Langevin, 2002), kode SEAWAT adalah MODFLOW dan

MT3DMS digabungkan menjadi satu program yang dapat menyelesaikan persamaan gabungan dan persamaan transport terlarut. Bagian dari kode MODFLOW asli dimodifikasi untuk memasukkan persyaratan perbedaan kerapatan relatif dan istilah yang mengkuantifikasi laju akumulasi massa karena perubahan konsentrasi zat terlarut, dan keseluruhan persamaan aliran dirumuskan kembali untuk menghemat massa dan bukan volume cairan. Kopling antara aliran dan transportasi dilakukan melalui pendekatan time stepping sinkron yang menghubungkan antara solusi MODFLOW dari persamaan aliran dan solusi MT3DMS dari persamaan transportasi.

Diagram pada gambar 1 menunjukkan bagaimana modul MODFLOW dan SEAWAT pada FREEWAT saling berhubungan, dengan mengambil acuan standar prosedur pemodelan.

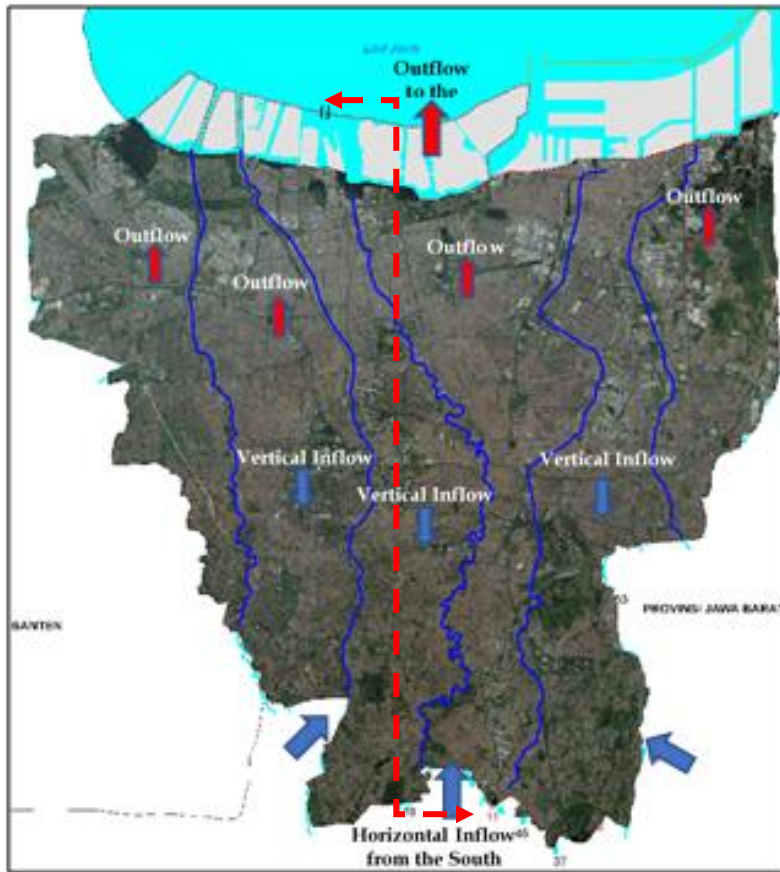
Dalam pemodelan intrusi air asin pada akuifer pantai DKI Jakarta yang dilakukan dengan 5 skenario model, yaitu : (1) Pengurangan 50% dari penggunaan air tanah, (2) Pengurangan 25% dari penggunaan air tanah, (3) Penggunaan air tanah eksisting tahun 2012, (4) Peningkatan 25% dari penggunaan air tanah, dan (5) Peningkatan 50% dari penggunaan air tanah. Adapun untuk gambaran dari skema pemodelan dapat dilihat pada gambar berikut ini.

Berdasarkan gambar skema model pada gambar 2, potongan melintang sangat membantu dalam pembuatan suatu basis model. Adapun potongan melintang berdasarkan gambar skema di atas adalah dapat dilihat pada gambar 3.

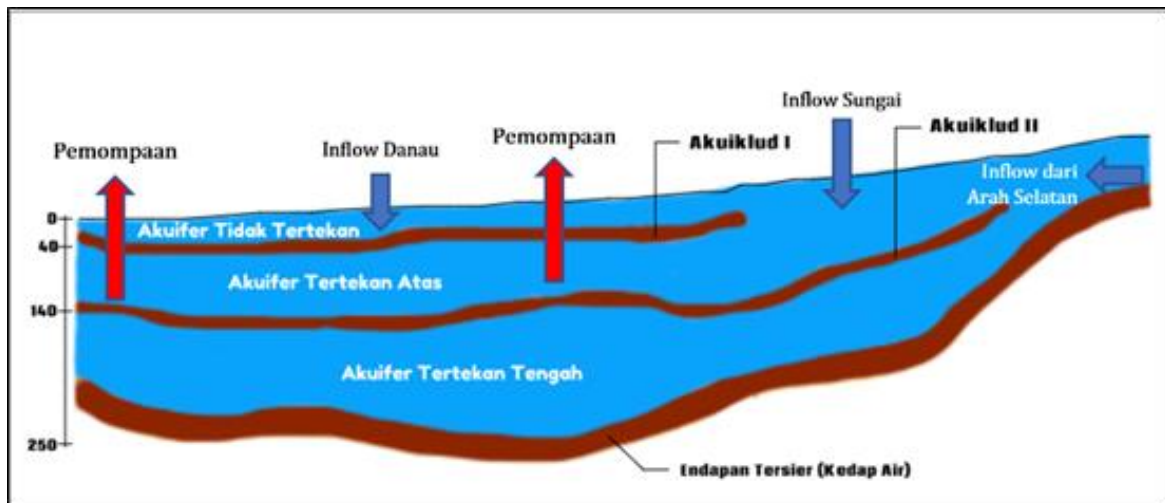


Sumber: Filippis, et al., 2017

Gambar 1 Diagram hubungan antar modul dengan menggunakan acuan standar pemodelan



Gambar 2 Skema model pada wilayah penelitian



Gambar 3 Potongan melintang skema model

Model dibuat dalam 3 lapisan dikarenakan lapisan pem-batas antara masing-masing lapisan akuifer (akuiklud) tidak sepenuhnya membatasi antar akuifer dan akuiklud ini memiliki potensi bocor karena lapisan akuiklud merupakan lempung pasir atau lempung tufaan sehingga

masih memiliki potensi untuk meloloskan air dari lapisan akuifer ke akuifer lainnya. Hal ini terjadi akibat pengendapan Jakarta tidak terjadi dalam 1 sikuen pengendapan, tetapi terjadi dari sikuen yang berulang-ulang (Mukhtar, Pranantya, &

Hadian, 2016). Adapun lapisan tersebut adalah sebagai berikut :

- 1 *Unconfined aquifer* atau akuifer tidak tertekan, dengan ketebalan 0 – 40 m dengan struktur lapisan terdiri dari lanau, pasir dan kerikil.
- 2 *Top confined aquifer* atau lapisan akuifer tertekan atas, dengan ketebalan 40 – 140 m dan struktur lapisan terdiri dari lempung dengan sisipan tipis pasir andesit.
- 3 *Middle confined aquifer* atau lapisan akuifer tertekan ten-gah, dengan ketebalan 140 – 250 m dan struktur lapisan terdiri dari lempung dengan sisipan tipis pasir andesit dan pasir kwarsa.

Kondisi awal pada pemodelan yaitu nilai *head* akan diatur berdasarkan nilai muka air tanah pada masing-masing lapisan akuifer tahun 2010. Pada akuifer tak tertekan kedalaman muka air tanah antara 0,48 dan 12,14 meter, pada akuifer tertekan atas antara 8,07 dan 54,16 meter dan pada akuifer tertekan tengah/bawah antara 0,12 – 58,8 meter (Matahelumual, 2010).

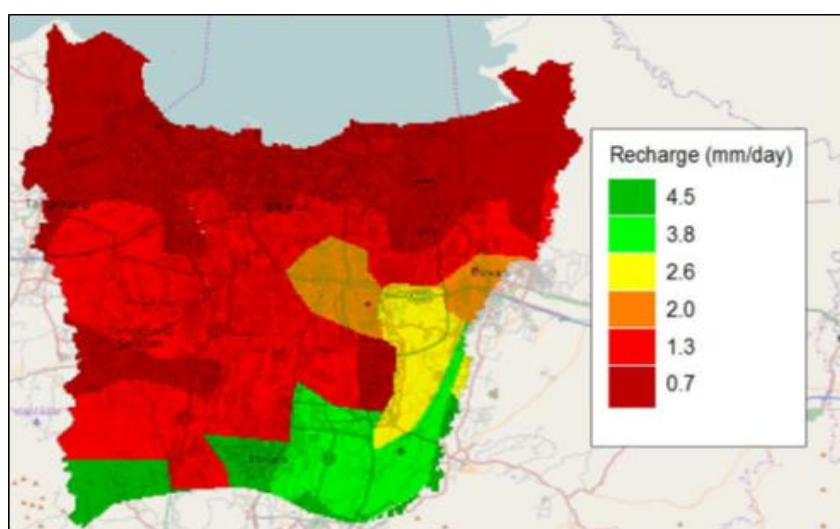
Penggunaan air tanah paling banyak dilakukan dari akuifer produktif yaitu akuifer tertekan atas (Wandowo dkk, 2001), sehingga pada pemodelan ini, sumur produksi disimulasikan pada lapisan akuifer tertekan atas.

Nilai K_x pada daerah Jakarta Utara adalah berkisar $6,5 \times 10^{-4}$ sampai dengan 2,9 m/hari, sedangkan untuk Jakarta bagian tengah berkisar $1,32 \times 10^{-4}$ sampai dengan 2,3 m/hari, serta pada daerah Jakarta Selatan berkisar antara $1,4 \times 10^{-4}$ sampai dengan 1,1 m/hari (Herlambang & Indriatmoko, 2005).

Nilai porositas berkisar 0.3 dan 0.7 dengan asumsi bahwa tanah adalah kontinum. Porositas dapat dianggap sebagai fungsi posisi (Nimmo, 2004).

Setelah skema dari model dibuat, kemudian menentukan *Boundary Conditions* atau kondisi batas pada model tersebut. Adapun kondisi batas untuk mensimulasikan aliran air tanah dan intrusi air asin adalah sebagai berikut :

- 1 *Inflow* dari arah selatan, yaitu dari arah Depok dan Bogor yang didefinisikan sebagai *Well* (WEL) pada FREEWAT yang merupakan debit positif.
- 2 *Inflow* dari kali Pesanggrahan, kali Krukut, kali Cili-wung, kali Cipinang, dan kali Kramat Jati yang didefin-iskan sebagai *River* (RIV) pada FREEWAT.
- 3 Pemompaan air tanah untuk kebutuhan air baku masyarakat maupun industri dan bisnis didefinisikan sebagai *Well* (WEL) pada FREEWAT yang merupakan debit negatif.
- 4 *Recharge* (RCH) dari waduk-waduk yang ada di Jakarta dengan besarnya sebaran nilai recharge dapat dilihat pada gambar 4. Pada point ini, recharge bukan berasal dari hujan. Pada model ini recharge dari hujan dia-baikan karena mengingat tataguna lahan pada DKI Jakarta sebagian besar adalah pemukiman, yang berarti daerah resapan air sangat sedikit. Pertimbangan lain adalah bahwa proses masuknya air hujan kedalam lapisan akuifer membutuhkan waktu yang lama dan adanya kejadian evaporasi sehingga diabaikan.
- 5 *Outflow* berada pada daerah Jakarta Utara yang mengarah ke Laut Jawa didefinisikan sebagai *Con-stant-head* (CHD).



Gambar 4 Nilai *recharge* (RCH) (Roover, 2015)

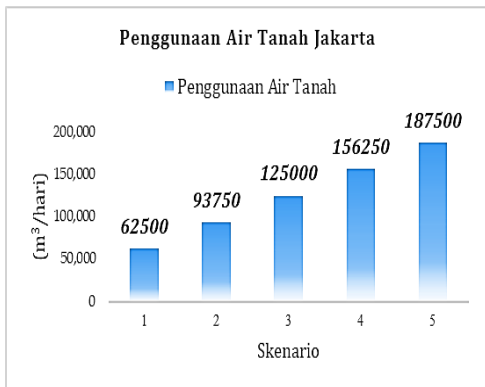
Kalibrasi Model

Kalibrasi model dilakukan untuk memvalidasi hasil model agar saling berkesesuaian antar keduanya. Data yang digunakan untuk memvalidasi model adalah dengan menggunakan data kualitas air tanah yang diperoleh dari Balai Konservasi Air Tanah. Pada data tersebut, yang digunakan adalah data pada sumur produksi dan sumur pantau yang mana sumur-sumur tersebut merupakan sumur pada akuifer tertekan dengan membandingkan nilai natrium klorida atau kadar garamnya.

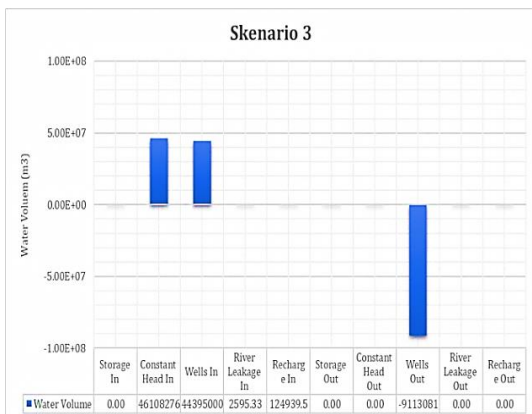
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan Air Tanah

Penggunaan air tanah di DKI Jakarta sesuai dengan skenario yang disebutkan pada Metode Penelitian dapat dilihat pada grafik di bawah ini. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa penggunaan air tanah pada skenarion 1 yaitu sebesar 62.500 m³/hari, skenarion 2 yaitu sebesar 93.750 m³/hari, skenarion 3 yang merupakan kondisi eksisting tahun 2012 yaitu sebesar 125.000 m³/hari, skenarion 4 yaitu sebesar 156.250 m³/hari, dan skenarion 5 yaitu sebesar 187.500 m³/hari yang ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 5 Penggunaan air tanah Jakarta dari 5 skenario



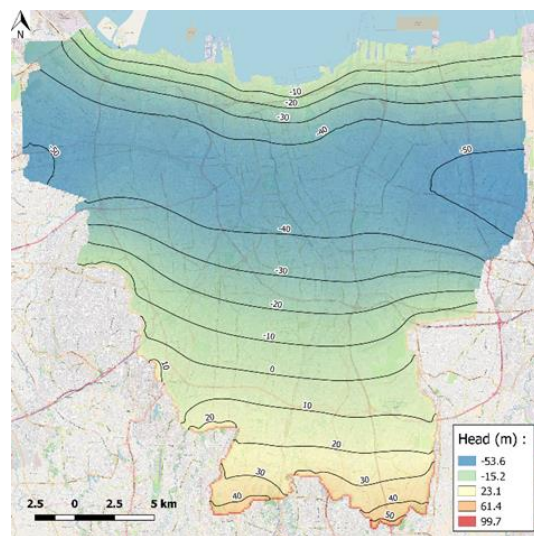
Gambar 6 Output volumetric budget skenario 3

Output Model FREEWAT

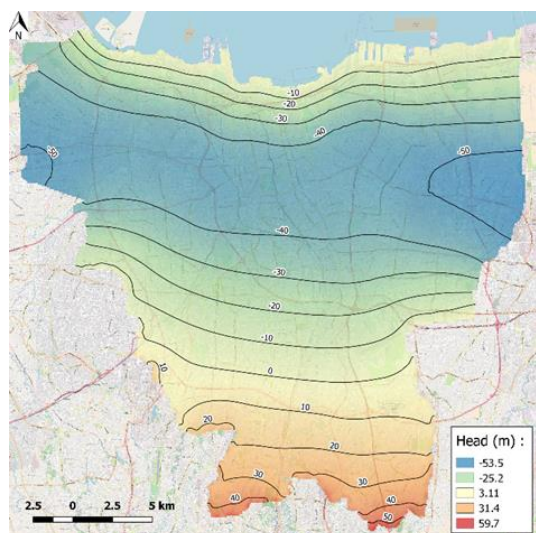
a. Pemodelan Air Tanah

Tabel 2 Output aliran air tanah skenario 3

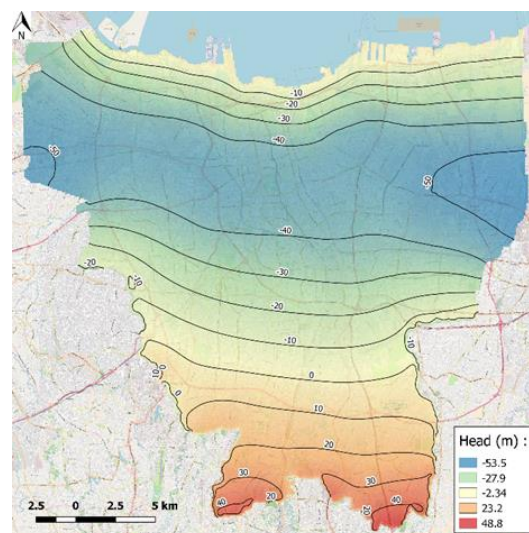
Cumulative Volumes	L**3	Rates For This Time Step	L**3/T
In :		In :	
Storage =	0.00	Storage =	0.00
Constant Head =	46108276.00	Constant Head =	126324.05
Wells =	44395000.00	Wells =	123000.00
River Leakage =	2595.33	River Leakage =	7.11
Recharge =	124939.51	Recharge =	342.30
Total In =	91130816.00	Total In =	249673.47
Out :		Out :	
Storage =	0.00	Storage =	0.00
Constant Head =	0.00	Constant Head =	0.00
Wells =	91130816.00	Wells =	249673.47
River Leakage =	0.00	River Leakage =	0.00
Recharge =	0.00	Recharge =	0.00
Total In =	91130316.00	Total In =	249673.47
In - Out =	0.0000	In - Out =	0.0000
Percent Discrepancy =	0.00	Percent Discrepancy =	0.00



Gambar 7 Head akuifer tak tertekan skenario 3



Gambar 8 Head akuifer tertekan atas skenario 3



Gambar 9 Head akuifer tertekan tengah skenario 3

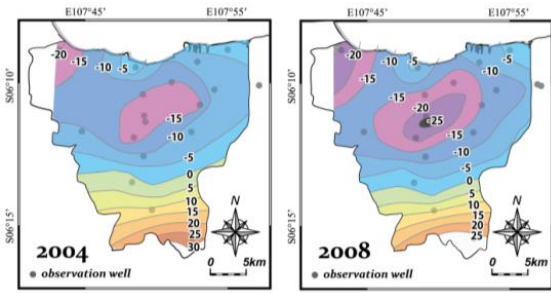
Tabel 3 Volumetric budget dari 5 skenario model

Budget Term	Skenario 1 (m ³ /hari)	Skenario 2 (m ³ /hari)	Skenario 3 (m ³ /hari)	Skenario 4 (m ³ /hari)	Skenario 5 (m ³ /hari)
Constant Head In	6.598,97	64.023,86	126.324,05	188.740,56	251.164,64
Wells In	123.000,00	123.000,00	123.000,00	123.000,00	123.000,00
River Leakage In	1,82	5,25	7,11	7,11	7,11
Recharge In	342,30	342,30	342,30	342,30	342,30
Total In	129.943,09	187.371,41	249.673,47	312.089,97	374.514,06
Constant Head Out	-4.839,32	0	0	0	0
Wells Out	-125.052,93	-187.363,36	-249.673,47	-312.090,03	-374.514,16
River Leakage Out	-51,05	-8,29	0	0	0
Total Out	129.943,30	187.371,64	249.673,47	312.090,03	374.514,16
In-Out	-0,20	-0,23	0,00	-0,06	-0,09

Berdasarkan hasil dari pemodelan di atas, dapat dilihat bahwa pada setiap lapis akuifer yaitu akuifer tidak tertekan, akuifer tertekan atas, dan akuifer tertekan tengah dari masing-masing skenario memiliki head yang relatif sama. Dimana pada model dibuat kondisi awal head pada masing-masing lapis akuifer berbeda-beda yang sesuai dengan kondisi awal dari head pada Metode Penelitian. Ini disebabkan karena model dibangun dengan mengabaikan akuiklud. Lapisan akuiklud diabaikan dikarenakan lapisan akuiklud pada wilayah penelitian tidak sepenuhnya membatasi antar akuifer, akuiklud pada wilayah penelitian ini memiliki potensi bocor karena merupakan lempung pasir sehingga masih ada potensi untuk meloloskan air ke akuifer lainnya. Hal tersebutlah yang membuat hasil head dari pemodelan dari setiap lapis akuifer pada setiap

scenario memiliki head yang sama (Mukhtar, Pranantya, & Hadian, 2016).

Untuk sebagai perbandingan head air tanah hasil simulasi dengan histori data head pada akuifer dalam yaitu tahun 2004 dan 2008 dimana terjadi depresi muka air tanah yaitu -15 meter dan -25 meter. Sedangkan pada pemodelan yaitu pada kondisi eksisting (skenario 3) terjadi depresi muka air tanah -50 meter. Apabila histori head dan head hasil pemodelan dibandingkan maka akan nampak perbedaan pola dari head. Perbedaan pola ini diakibatkan tidak seragamnya data sebaran dan debit pengambilan air tanah dari sumur pompa, sehingga menyebabkan perbedaan pola antara head histori dan head dari pemodelan.

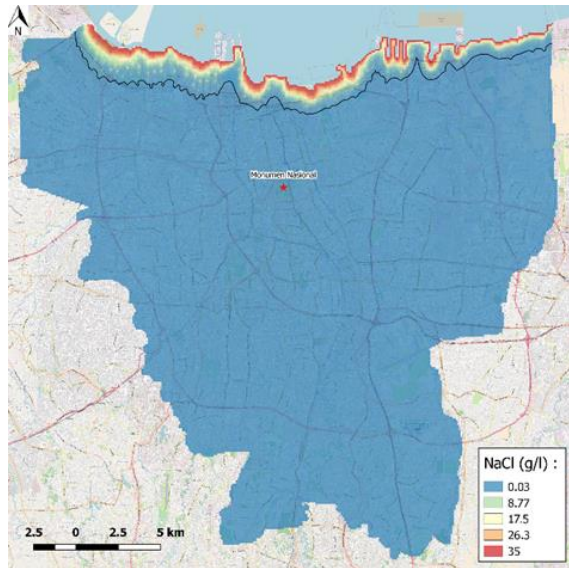


Gambar 10 Perubahan historis muka air tanah (mdpl) (Delinom, *et al*, 2010)

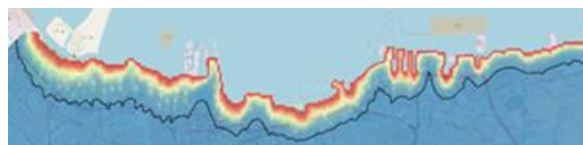
b. Pemodelan Intrusi Air Asin

Batasan distribusi intrusi air asin pada pemodelan ini ber-pedoman pada PERATURAN MENTERI KESEHATAN Nomor : 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang Syarat-syarat dan Pengawasan Kualitas Air Asin, bahwa standar kualitas air minum salah satunya memiliki kadar Klorida maksimum 250 mg/l.

Hasil-hasil distribusi sebaran intrusi air asin dari setiap lapisan akuifer pada pada kondisi eksistng (skenario 3) dapat dilihat pada gambar-gambar berikut ini.



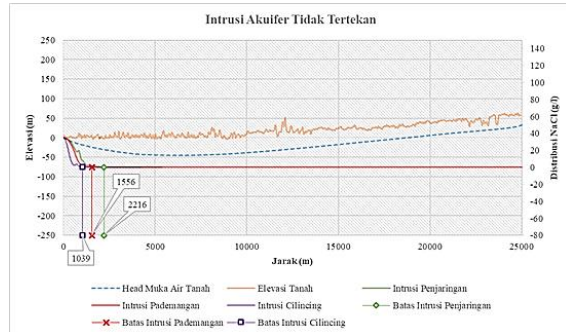
Gambar 11 Intrusi air asin akuifer tak tertekan skenario 3



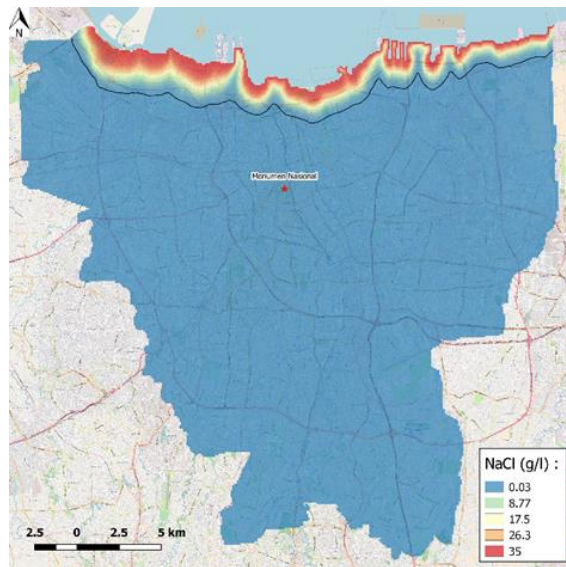
Gambar 12 Intrusi area Jakarta Utara pada akuifer tak tertekan skenario 3

Tabel 4 Jarak intrusi air asin pada akuifer tak tertekan sekanario 3

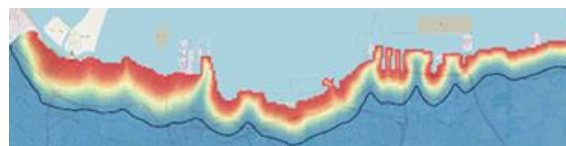
Wilayah	Jauh Intrusi (m)
Kecamatan Penjaringan	2,216
Kecamatan Pademangan	1,556
Kecamatan Cilicing	1,039



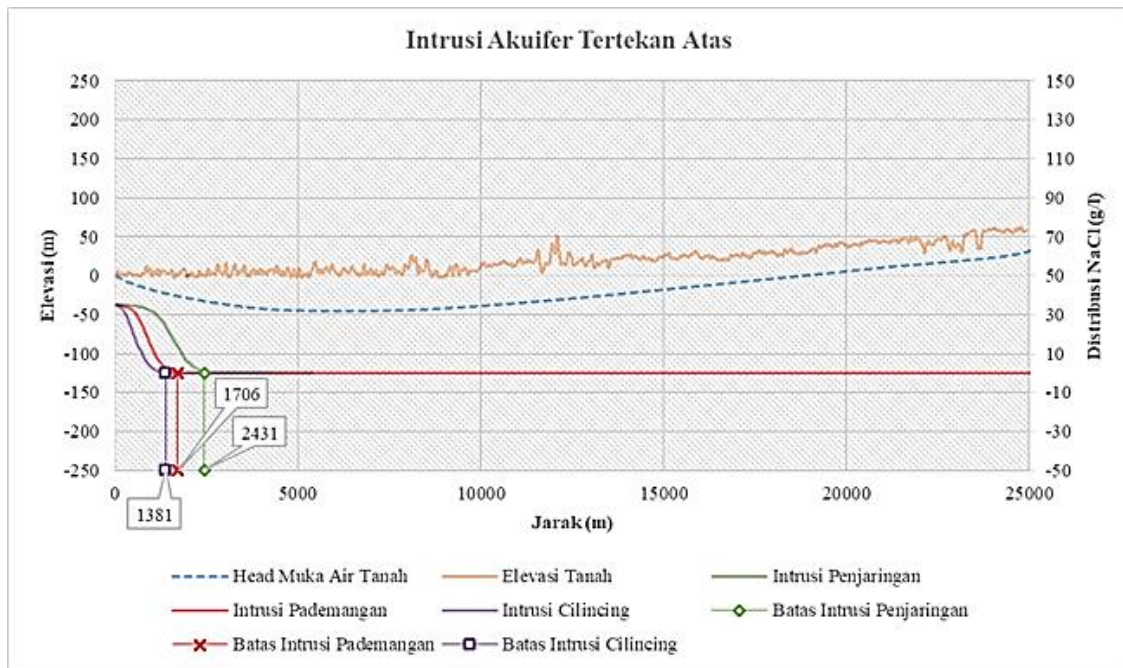
Gambar 13 Potongan melintang intrusi akuifer tak tertekan skenario 3



Gambar 14 Intrusi air asin akuifer tertekan atas pada skenario 3



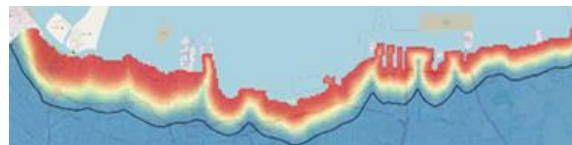
Gambar 15 Intrusi area Jakarta Utara pada akuifer tertekan atas skenario 3



Gambar 16 Potongan melintang intrusi akuifer tertekan atas skenario 3

Tabel 5 Jarak intrusi air asin pada akuifer tertekan atas skenario 3

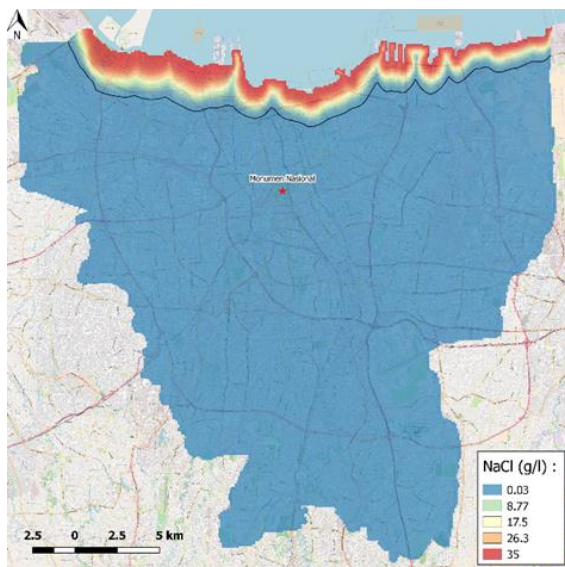
Wilayah	Jauh Intrusi (m)
Kecamatan Penjaringan	2,341
Kecamatan Pademangan	1,706
Kecamatan Cilicing	1,381



Gambar 18 Intrusi area Jakarta Utara pada akuifer tertekan tengah skenario 3

Tabel 6 Jarak intrusi air asin pada akuifer tertekan tengah skenario 3

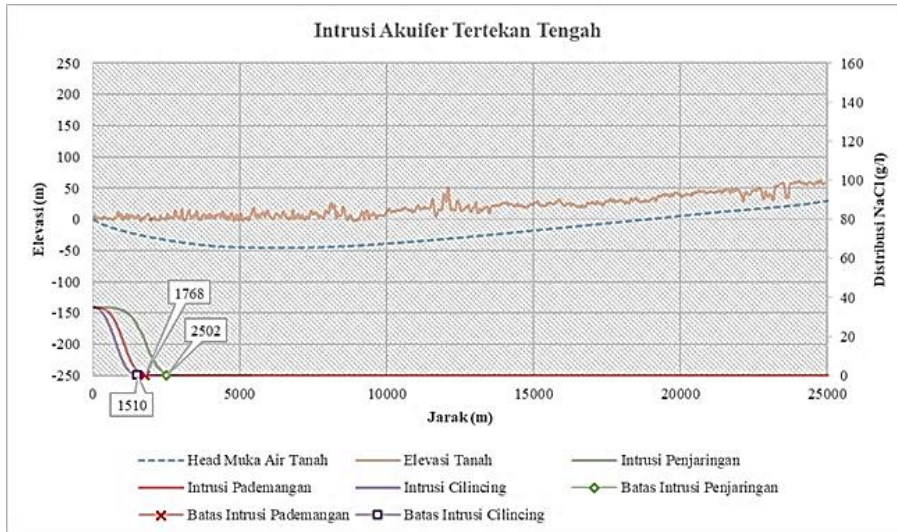
Wilayah	Jauh Intrusi (m)
Kecamatan Penjaringan	2,502
Kecamatan Pademangan	1,768
Kecamatan Cilicing	1,510



Gambar 17 Intrusi air asin akuifer tertekan tengah pada skenario 3

Secara keseluruhan pada akuifer tidak tertekan, dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 1 dapat mengurangi intrusi yang masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 38%, penurunan intrusi ini sangat signifikan, ini diakibatkan pada akuifer tidak tertekan mendapat inflow langsung dari waduk dan sungai sehingga dapat mengurangi intrusi. Sedangkan dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 2 dapat mengurangi intrusi sebesar 13%.

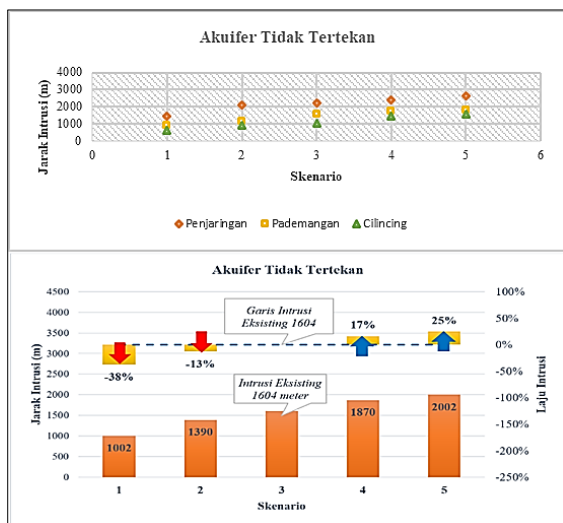
Peningkatan penggunaan air tanah seperti pada skenario 4 dapat mendorong intrusi air asin semakin masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 17%. Sedangkan dengan peningkatan penggunaan air tanah seperti pada skenario 5 dapat mendorong intrusi sebesar 25%.



Gambar 19 Potongan melintang intrusi akuifer tertekan tengah skenario 3

Berikut adalah gambar-gambar grafik dari laju intrusi air asin yang terjadi pada setiap lapis akuifer tidak tertekan dari setiap skenario. Grafik-grafik berikut ini adalah rekapitulasi dari hasil pemodelan.

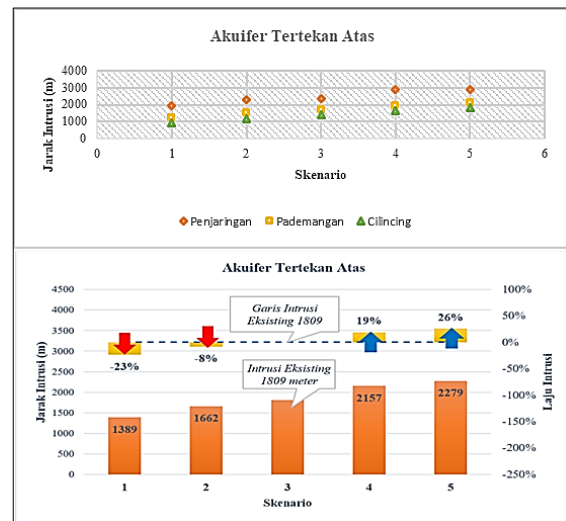
Pada akuifer tertekan atas, dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 1 dapat mengurangi intrusi yang masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 23%, penurunan intrusi ini sangat signifikan. Sedangkan dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 2 dapat mengurangi intrusi sebesar 8%.



Gambar 20 Laju intrusi air asin pada akuifer tak tertekan

Peningkatan penggunaan air tanah seperti pada skenario 4 dapat mendorong intrusi air asin semakin masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 19%. Sedangkan dengan peningkatan

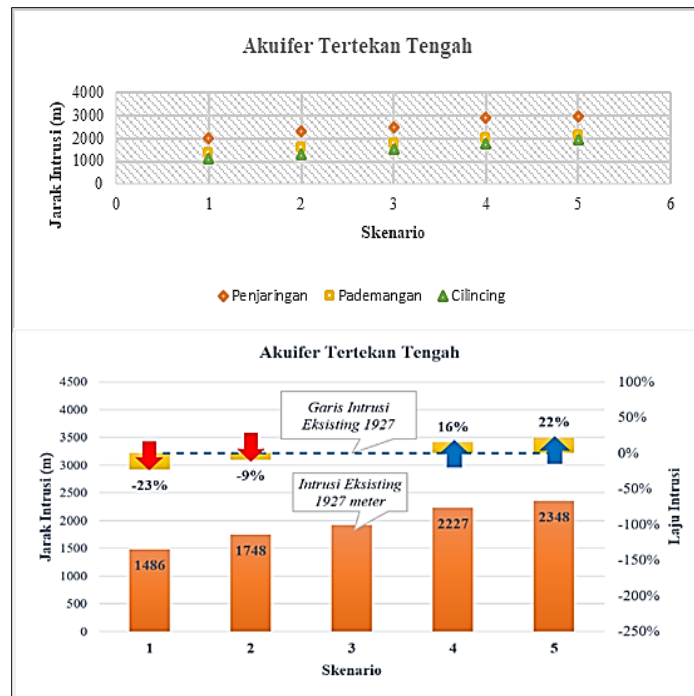
penggunaan air tanah seperti pada skenario 5 dapat mendorong intrusi sebesar 26%.



Gambar 21 Laju intrusi air asin pada akuifer tertekan atas

Pada akuifer tertekan tengah, dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 1 dapat mengurangi intrusi yang masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 23%, penurunan intrusi ini sangat signifikan. Sedangkan dengan pengurangan penggunaan air tanah seperti pada skenario 2 dapat mengurangi intrusi sebesar 9%.

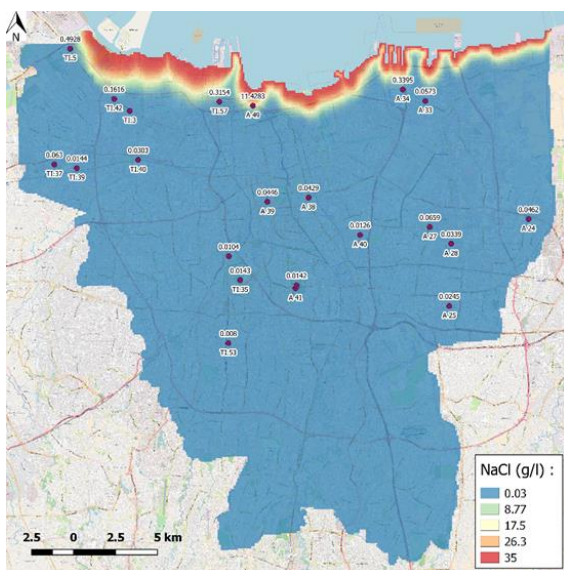
Peningkatan penggunaan air tanah seperti pada skenario 4 dapat mendorong intrusi air asin semakin masuk ke sistem air tanah tawar sebesar 16%. Sedangkan dengan peningkatan penggunaan air tanah seperti pada skenario 5 dapat mendorong intrusi sebesar 22%.



Gambar 22 Laju intrusi air asin pada akuifer tertekan tengah

c. Kalibrasi Pemodelan FREEWAT

Pada pemodelan dengan menggunakan FREEWAT digunakan kondisi awal untuk kadar garam minimum yaitu 30 mg/l dan maksimum 35000 mg/l. Untuk mengetahui kesesuaian kadar garam di lapangan dan model digunakan metode Chi-Square, dengan membagi kelas data untuk analisis lebih lanjut yaitu sebagai berikut.



Gambar 23 Lokasi sumur untuk kalibrasi pada akuifer tertekan

Tabel 7 Pembagian kelas data untuk analisis Chi-Square

Jenis Air	Cl ⁻ (mg/l)	Kelas
Segar	30 - 150	1
Segar-Payau	150 - 300	2
Payau	300 - 1.000	3
Payau-Asin	1.000 - 10.000	4
Asin	10.000 - 20.000	5
Sangat Asin	> 20.000	6

Tabel 8 Cross Tabulation

		Model				Total
		1	2	3	5	
Lapa ngan	Segar	18	0	0	0	18
	Segar- Payau	0	1	0	0	1
	Payau	0	0	3	0	3
	Asin	0	0	0	1	1
Total		18	1	3	1	23

Setelah dianalisis dengan menggunakan metode Chi-Square diperoleh nilai Asymp. Sig lebih kecil dari batas kritis yaitu $0.00 < 0.05$ maka dapat disimpulkan hasil dari pemodelan memiliki kesesuaian dengan data di lapangan.

Tabel 9 Hasil uji Chi-Square

	Value	df	Asymp. Sig. (2-sided)
<i>Pearson Chi-Square</i>	69.000 ^a	9	.000
<i>Likelihood Ratio</i>	33.588	9	.000
<i>Linear-by-Linear Association</i>	22.000	1	.000
<i>N of Valid Cases</i>	23		

Tabel 10 Kadar garam (Klorida) model dan lapangan

No.	Kode Contoh	Jenis Sumur	NaCl ⁻ (mg/l)		Klasifikasi
			Lapangan	Model	
1	A 24	Pantau	46.200	30.000	Segar
2	A 25	Pantau	24.500	30.000	Segar
3	A 27	Pantau	65.900	30.000	Segar
4	A 28	Pantau	33.900	30.000	Segar
5	A 33	Pantau	57.300	30.000	Segar
6	A 34	Pantau	339.500	366.407	Payau
7	A 38	Pantau	42.900	30.000	Segar
8	A 39	Pantau	44.600	30.000	Segar
9	A 40	Pantau	12.600	30.000	Segar
10	A 41	Pantau	30.000	30.000	Segar
11	A 42	Pantau	14.200	30.000	Segar
12	A 49	Pantau	11428.300	11345.228	Asin
13	TI.3	Pantau	12.500	30.000	Segar
14	TI.5	Pantau	492.800	466.630	Payau
15	TI.35	Pantau	16.000	30.000	Segar
16	TI.36	Pantau	14.300	30.000	Segar
17	TI.37	Produksi	63.000	30.000	Segar
18	TI.39	Produksi	14.400	30.000	Segar
19	TI.40	Produksi	30.300	30.000	Segar
20	TI.42	Produksi	161.600	144.126	Segar-Payau
21	TI.51	Pantau	10.400	30.000	Segar
22	TI.53	Pantau	8.000	30.000	Segar
23	TI.57	Pantau	315.400	397.309	Payau

Berdasarkan data di atas dapat dilihat bahwa terdapat 18 sumur yang memiliki air segar, 1 sumur memiliki air segar-payau, 3 sumur memiliki air payau, dan 1 sumur memiliki air asin.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi aliran air tanah dan intrusi air asin pada wilayah Jakarta dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya

pengambilan air tanah dan pengurangan pengambilan air tanah sangat berpengaruh pada muka air tanah dan penyusupan air laut ke sistem akuifer air tanah tawar. Hasil simulasi aliran air tanah pada skenario 1, skenario 2, skenario 3, skenario 4, dan skenario 5 mengalami depresi pada daerah Jakarta Barat dan Jakarta Timur. Hasil simulasi memang tidak 100% akurat dikarenakan keterbatasan data, dikarenakan pemodelan dilakukan dengan menggunakan data-data yang tidak seragam. Akan tetapi hal yang

menjadi perhatian utama pada pemodelan ini adalah metode yang digunakan untuk mengetahui bahwa dengan meningkatnya pengambilan air tanah terutama air tanah dalam melalui pemompaan mengakibatkan penurunan muka air tanah secara signifikan dan secara langsung membuat penyusupan air laut yang semakin jauh ke arah daratan karena berkurangnya tinggi tekan air tawar. Begitu pula dengan pengurangan penggunaan air tanah dapat meredam intrusi air asin ke dalam sistem akuifer air tanah tawar.

Hal tersebut dapat terlihat pada hasil pemodelan yang dilakukan pada 5 skenario. Dari 5 skenario pemodelan tersebut menunjukkan bahwa begitu besarnya pengaruh pengurangan dan peningkatan penggunaan air tanah terhadap laju intrusi, terutama pada akuifer tak tertekan.

Pemodelan yang dilakukan pada FREEWAT parameter yang digunakan adalah NaCl dari air laut, sehingga sifat asin pada pemodelan FREEWAT hanya berdasarkan parameter NaCl saja. Distribusi sebaran intrusi air asin yang terjadi pada pemodelan FREEWAT dikarenakan berkurangnya tekanan air tanah tawar akibat dari pemompaan sehingga mengganggu tekanan air tanah tawar dan membuat parameter NaCl masuk kedalam sistem akuifer air tanah tawar yang menyebabkan intrusi air asin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami tuju kepada Pimpinan dan Staf dari Balai Konservasi Air Tanah atas kerja sama dan bantuannya dalam menyediakan data sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS. (2018). *Berapa Jumlah Penduduk Jakarta?* Retrieved, 2018, from Katadata: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2018/01/24/berapa-jumlah-penduduk-jakarta>
- Delinom, R., Lubis, R. F., Shimada, J., & Taniguchi, M. (2010). Groundwater Characteristic in Jakarta Area, Indonesia. *ResearchGate*. <http://DOI:10.14203/risetgeotam2010.v20.35>
- Filippis, G. D., Ghetta, M., Neumann, J., Cardoso, M., Cannata, M., Borsi, I., & Rossetto, R. (2017). *FREEWAT User Manual* (Vol. 1). Retrieved from http://www.freewat.eu/sites/default/files/FREEWAT_vol1.pdf
- Geomagz. (2014). *Air Tanah dan Pembangunan Bawah Tanah Jakarta*. Retrieved 2018, from <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/air-tanah-dan-pembangunan-bawah-tanah-jakarta/>
- Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow*. Florida: U.S. Geological Survey. Retrieved from https://fl.water.usgs.gov/PDF_files/twri_6_A7_guo_langevin.pdf
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process*. Virginia: U.S. Geological Survey. Retrieved from http://inside.mines.edu/~epoeter/583CSM/DO_C4_MODFLOW2005-TM6A16.pdf
- Herlambang, A., & Indriatmoko, R. H. (2005). Pengelolaan Air Tanah dan Intrusi Air Laut. *Jurnal Air Indonesia*, 1. Retrieved from <http://ejurnal.bppt.go.id/ejurnal2011/index.php/JAI/article/view/42/43>
- Indriatmoko, R. H. (2012). *Kajian Intrusi Air Asin pada Sistem Akuifer Jakarta*. Institut Pertanian Bogor, Magister Sains pada Program Studi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS). Bogor: Institut Pertanian Bogor. Retrieved from <http://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/61513/1/2012rhi.pdf>
- Matahelumual, B. C. (2010). Kajian Kondisi Air Tanah Jakarta Tahun 2010. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 1, 131- 149. Retrieved from http://www.bgl.esdm.go.id/publication/index.php/dir/article_download/288
- Mukhtar, O., Pranantya, P. A., & Hadian, S. D. (2016). Manajemen Air Tanah Di Cekungan Air Tanah DKI Jakarta. In Seminar Nasional ke-III Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran. Retrieved from <http://seminar.ftgeologi.unpad.ac.id/wp-content/uploads/2016/07/2.15.pdf>
- Nimmo, J. R. (2004). Porosity and Pore Size Distribution. *Encyclopedia of Soils in the*, 3, 295 - 303. Retrieved from https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs_pubs/papers/nimmo.04.encyc.por.esse.pdf
- Roover, S. d. (2015). *Modeling the Jakarta Groundwater System : A Sensitivity Analysis*. Universiteit Twente, Civi Engineering. Twente: Universiteit Twente. Retrieved from <http://essay.utwente.nl/68510/1/Roover-Sam-de.pdf>

- Setiawan, T., Yermia, E., Purnomo, B. J., & Tirtomihardjo, H. (2017). Intrusi Air Lut pada Sistem Akuifer Tertekan Cekungan Air Tanah Jakarta Berdasarkan Analisis Hidrokimia dan Hidroisotop. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 27, 1 - 14. <http://doi:10.4203/risetgeotam.2017.v27.430>
- Wahyudi, F. R., & Moersidik, S. S. (2015). The Analysis of Groundwater Availability and Utility in DKI Jakarta. *ScienceDirect*, 799 - 807. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.148>
- Wandowo, dkk. (2001). Daerah Resapan Air Tanah Cekungan Jakarta. In *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Retrieved from <https://ansn.bapeten.go.id/files/41301/2312.pdf>