

SIMULASI ALIRAN AIR TANAH JAKARTA DENGAN BEBERAPA SKENARIO MENGGUNAKAN IMOD

GROUNDWATER FLOW SIMULATION OF JAKARTA WITH SOME SCENARIOS USING IMOD

Wulan Seizarwati¹⁾ Derry Prasetya¹⁾ Muhshonati Syahidah¹⁾ Heni Rengganis¹⁾

¹⁾Balai Hidrologi dan Tata Air, Pusat Litbang Sumber Daya Air
Jl. Ir. H. Juanda 193, Bandung
E-Mail: wulan_seizarwati@yahoo.com

ABSTRAK

Ketidakeimbangan antara pengambilan air tanah berlebihan dengan kapasitas imbuhan air tanah yang mengalami penurunan di Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta telah menimbulkan kerucut penurunan Muka Air Tanah (MAT) di sejumlah wilayah. Simulasi air tanah dilakukan untuk menentukan solusi yang tepat dalam memulihkan kondisi air tanah Jakarta. Simulasi numerik aliran air tanah dilakukan pada kondisi aktual dan proyeksi hingga tahun 2080 dengan beberapa skenario antara lain penambahan ekstraksi, pengurangan ekstraksi, peningkatan kapasitas imbuhan, penambahan sumur injeksi, dan kombinasi antara penambahan ekstraksi dengan peningkatan kapasitas imbuhan. Simulasi menggunakan model aliran air tanah Interactive MODELing (IMOD) dengan menerapkan metode beda hingga. Kerucut penurunan MAT pada kondisi aktual terjadi di wilayah pemukiman penduduk dan daerah industri seperti Pulogadung, Jakarta Timur; Cengkareng dan Tambora, Jakarta Barat; serta Bekasi. Hasil proyeksi menyimpulkan bahwa kontrol pengambilan air tanah merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap pemulihan air tanah Jakarta. Pengurangan ekstraksi air tanah sebesar 10%/tahun dapat memulihkan muka air tanah sekitar 0,3 – 0,6 m/tahun. MAT akan tetap turun jika pengambilan air tanah tetap dibiarkan berlangsung, meskipun ditambah dengan sumur injeksi atau meningkatkan kapasitas imbuhan. Penyediaan air baku yang bersumber dari air permukaan perlu segera dipenuhi untuk seluruh kebutuhan air di Jakarta, sebagai upaya menghentikan penggunaan air tanah berlebihan.

Kata Kunci: Aliran air tanah, simulasi numerik, IMOD, Jakarta

ABSTRACT

The imbalance between excessive groundwater abstraction and the decreasing of groundwater recharge capacity in Jakarta Groundwater Basin has resulted groundwater cone of depression in some areas. Groundwater simulation is conducted to determine the right solution in restoring groundwater condition of Jakarta. Numerical groundwater flow simulation are performed on actual condition and projection up to 2080 with some scenarios including addition of abstraction, reduction of abstraction, recharge capacity improvement, addition of injection wells, and combination of increasing the abstraction and recharge capacity improvement. The simulation using groundwater flow model called Interactive MODELing (IMOD) by applying finite difference method. Groundwater cone of depression in actual condition occurs in residential and industrial areas, such as: Pulogadung, East Jakarta; Cengkareng and Tambora, West Jakarta; and Bekasi as well. The projection result concludes that controlling the groundwater abstraction is the most influential factor for groundwater recovery in Jakarta. Reduction of groundwater abstraction by 10%/year can recover groundwater level about 0,3 – 0,6 m/year. Groundwater level will remain decline, if groundwater abstraction remains continued, even though there are injection wells or recharge capacity improvement. Raw water supply from surface water needs to be met for all water need in Jakarta, as an effort to stop excessive groundwater abstraction.

Keywords: Groundwater flow, numerical simulation, IMOD, Jakarta

PENDAHULUAN

Air tanah hingga saat ini masih menjadi sumber air baku yang paling diminati di wilayah DKI Jakarta. Hal ini terjadi karena suplai air baku yang bersumber dari air permukaan belum mampu memenuhi seluruh kebutuhan air yang sangat tinggi, seperti untuk keperluan rumah tangga, perkotaan, industri, dan sebagainya. Sistem pelayanan air perpipaan baru mampu melayani 60% atau sekitar 8 juta masyarakat DKI Jakarta (Ardelia, 2015).

DKI Jakarta sedang menghadapi permasalahan air tanah yang begitu kompleks. Perkembangan perkotaan menyebabkan konsumsi air tanah meningkat tajam. Namun hal ini tidak diimbangi dengan kapasitas imbuhan air tanah yang mengalami penurunan secara signifikan. Penyebab utama penurunan ini adalah alih fungsi lahan menjadi area terbangun, seperti pemukiman, pusat perbelanjaan, infrastruktur, perkantoran, dan sebagainya.

Pengelolaan yang buruk dari pengambilan air tanah ditambah dengan turunnya kapasitas imbuhan dapat menyebabkan penurunan Muka Air Tanah (MAT) secara lokal maupun regional (Tremayne, 2010). Secara spasial terlihat dengan munculnya kerucut penurunan MAT (*cone of depression*). Pada tahun 1900-an banyak ditemukan sumur produksi yang bersifat artesis di wilayah DKI Jakarta. Menurut Delinom (2015), tinggi air artesis di Jalan Tongkol pada tahun 1960 mencapai lebih dari 24 meter. Akan tetapi, pada saat ini tinggi air artesis tersebut hanya mencapai 4,5 meter dari permukaan tanah.

Penurunan level MAT antara lain dapat menjadi pemicu terjadinya krisis air tanah, penurunan muka tanah (*land subsidence*), intrusi air laut, dan sebagainya. Simulasi aliran air tanah dapat dijadikan *tools* dalam menentukan pengelolaan air tanah yang tepat untuk diterapkan di suatu wilayah. Hendrayana (1994) menyatakan bahwa manfaat penting dari model hidrogeologi adalah sebagai alat bantu dalam menentukan kebijakan-kebijakan yang perlu diambil dalam rangka pengelolaan airtanah secara terpadu dengan mendasarkan hasil-hasil pemodelan dan simulasinya.

Permasalahan terkait pengambilan air tanah berlebihan umum terjadi tidak hanya di kota – kota besar di Indonesia, tetapi juga di dunia. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Onodera, et al. (2009), dengan mengambil studi kasus kota metropolitan yang terletak di pesisir yaitu Bangkok dan Jakarta. Kondisi level MAT di kedua kota tersebut saat ini berada di bawah muka laut dan aliran air tanah paling banyak

adalah menuju ke bawah. Hal ini tidak hanya menyebabkan terjadinya intrusi air laut, tetapi juga kontaminasi air tanah dalam. Penelitian ini diperkuat dengan hasil pemodelan aliran air tanah Jakarta yang dilakukan oleh Kagabu, et al. (2013) yang menunjukkan bahwa aliran air tanah mayoritas berupa aliran vertikal ke bawah. Air tanah yang lebih dangkal masuk ke dalam lapisan akuifer yang lebih dalam, akibat pengambilan air tanah berlebihan yang terjadi mulai tahun 1980-an. Hal ini menjadi pemicu terjadinya intrusi air tanah dangkal.

Selain memiliki dampak ke arah kontaminasi air tanah, pengambilan air tanah berlebihan juga erat kaitannya dengan kejadian penurunan muka tanah (*land subsidence*), seperti yang telah disimulasikan di Suzhou City, China (Chen et al., 2003) dan Tehran, Iran (Mahmoudpour et al., 2016). Selain itu, pengambilan air tanah berlebihan juga dapat memicu terjadinya pengeringan akuifer (*aquifer dewatering*) seperti yang disimulasikan oleh Hoque et al. (2007) di Kota Metropolitan Dhaka, Bangladesh.

Simulasi air tanah Jakarta telah dikembangkan dengan berbagai jenis model, umumnya menggunakan Visual MODFLOW. Salah satu simulasi yang dilakukan oleh Herlambang dan Indriatmoko (2005) menerapkan model optimasi pengelolaan air tanah (OPT-Q3D) untuk mengatur jumlah pemompaan dan menentukan level MAT yang optimal di setiap area. Kagabu et al. (2011) melakukan simulasi pergerakan air tanah Jakarta menggunakan Groundwater Vistas 5. Hasil simulasi menyimpulkan bahwa pengambilan air tanah yang sebenarnya jauh melebihi yang tercatat.

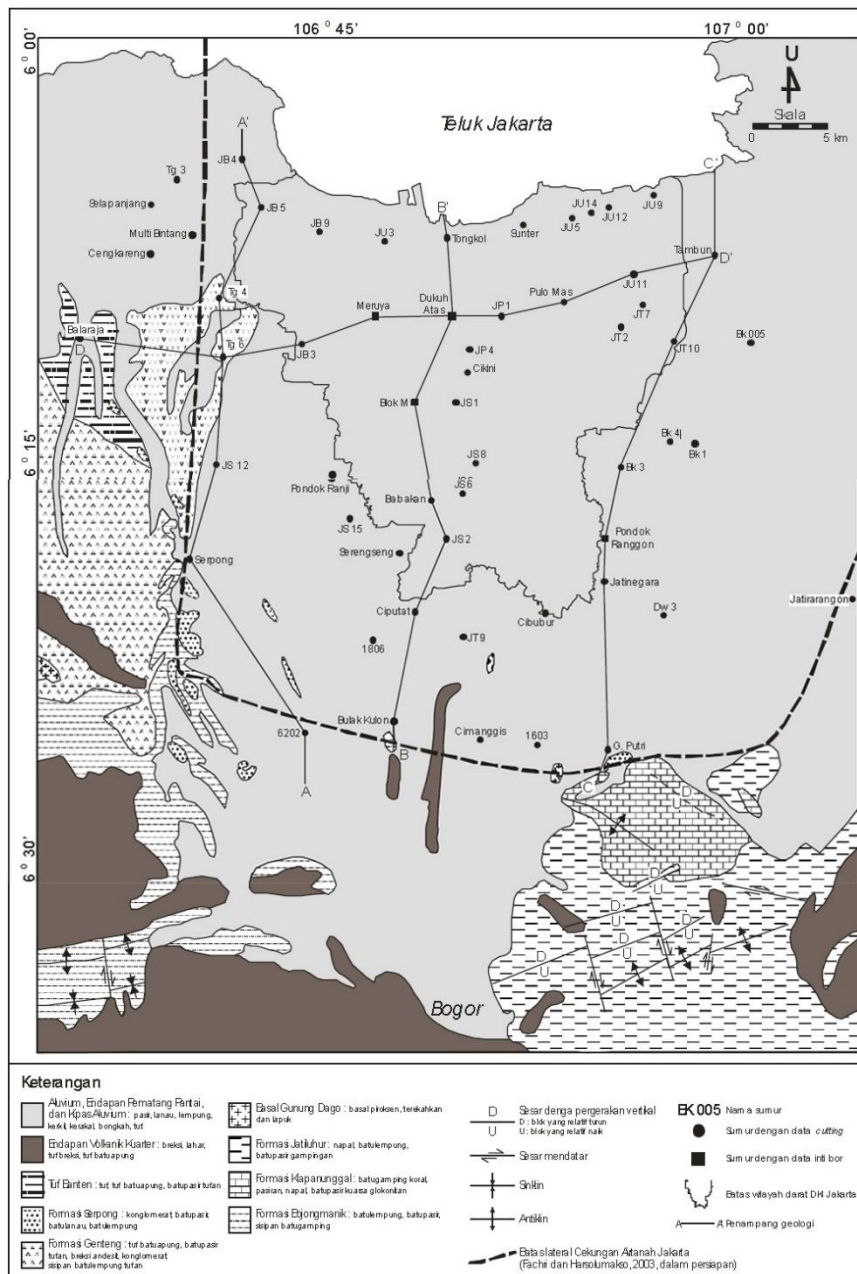
Pemodelan air tanah menggunakan IMOD belum banyak dikembangkan di Indonesia. Salah satu penerapan IMOD adalah dalam pemodelan air tanah di Delta Mekong, Vietnam. IMOD dapat dijadikan *tools* untuk mempermudah pengelolaan air tanah secara interaktif. Dalam penelitian tersebut, IMOD secara fleksibel mampu menaikkan ataupun menurunkan skala (*up and downscaling*) ke area lokal yaitu Kota Ho Chi Minh dan Can Tho (Vermuelen et al., 2013).

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh faktor yang paling efektif dalam memulihkan level MAT. Pada penelitian ini, simulasi numerik aliran air tanah dilakukan pada kondisi aktual dan proyeksi hingga tahun 2080 dengan beberapa skenario antara lain penambahan ekstraksi, pengurangan ekstraksi, peningkatan kapasitas imbuhan, penambahan sumur injeksi, dan kombinasi antara penambahan ekstraksi dengan peningkatan kapasitas imbuhan.

Daerah penelitian dibatasi oleh batas hidrogeologis berupa Cekungan Air Tanah (CAT), yaitu CAT Jakarta seluas 1439 km². Area ini meliputi seluruh wilayah Provinsi DKI, serta sebagian wilayah Provinsi Banten dan Jawa Barat. Secara geografis, CAT Jakarta terletak pada 106°36'32,54" - 107°04'04,78" BT dan 6°00'43,50" - 6°26'58,23" LS. Batas horizontal CAT Jakarta antara lain di bagian Utara dibatasi oleh Laut Jawa, bagian Barat dibatasi oleh Sungai Cisadane, bagian Timur dibatasi oleh Sungai Bekasi, dan bagian Selatan dibatasi oleh Antiklinorium Bogor.

KAJIAN PUSTAKA

Secara fisiografi, wilayah DKI Jakarta terdiri dari zona dataran rendah pantai Utara, Antiklinorium Bogor, dan Gunungapi Kuarter (Van Bemmelen, 1949). Geologi daerah penelitian didominasi oleh endapan Kuarter dengan batuan dasar berumur Tersier yang dibatasi oleh Tinggian Tangerang di bagian Barat dan Tinggian Rengasdengklok di bagian Timur. Satuan batuan dari tua ke muda dituangkan dalam peta geologi yang merupakan hasil kompilasi oleh Fachri, dkk (2002) (Gambar 1).



Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 1 Kolom stratigrafi CAT Jakarta

Satuan batuan tersusun dalam beberapa formasi, antara lain Formasi Bojongmanik dan Formasi Jatiluhur (Cibulakan), Formasi Parigi (Klapanunggal), Formasi Subang, Basal Gunung Dago, Formasi Genteng, Formasi Kaliwangu, Formasi Serpong, Formasi Citalang, Tuf Banten, dan Endapan Vulkanik Kuerter. Jika ditinjau dari kondisi hidrogeologisnya, akuifer di wilayah DKI Jakarta umumnya berupa media antar butir (Poespowardoyo, 1992). Akuifer tersebut terbentuk dari hasil endapan kipas aluvium, endapan gunungapi, dan endapan pantai. Sehingga secara hidrogeologis, wilayah DKI Jakarta memiliki lapisan pembawa air yang cukup potensial.

Kendala dalam menyusun model konseptual hidrogeologi CAT Jakarta adalah sistem bawah permukaan yang begitu kompleks. Sementara itu, untuk menghasilkan simulasi aliran air tanah yang baik, perlu disusun model konseptual yang representatif dalam menggambarkan kondisi air tanah yang sebenarnya. Maathius et al. (1996) menyebutkan bahwa tatanan geologi Jakarta terdiri dari gabungan akuifer yang kompleks dengan sisipan lempung berbentuk lensa – lensa. Fachri, dkk (2002) melakukan kajian hidrostratigrafi CAT Jakarta melalui pengelompokan sistem akuifer. Zona akuifer didominasi oleh batupasir dengan nilai konduktivitas hidraulik yang tinggi, sedangkan zona akuitar didominasi oleh batulempung dengan nilai konduktivitas hidraulik yang rendah. Komposisi litologi dan posisi stratigrafi dapat dilihat pada Gambar 2.

UMUR	STRATIGRAFI	HIDROSTRATIGRAFI
Kuartar	Plistosen Endapan Vulkanik Kuarter	Zona Akifer 1
	Pliosen Fm. Serpong	Zona Akifer 2
Tengah	Fm. Genteng	Zona Akifer 1
	Fm. Kaliwangu	Zona Akifer 2
	Fm. Subang	Batuan Dasar Cekungan Airtanah
Akhir	Fm. Parigi	
	Fm. Bojongmanik	
	Fm. Cibulakan	

Sumber: Fachri dkk, 2002

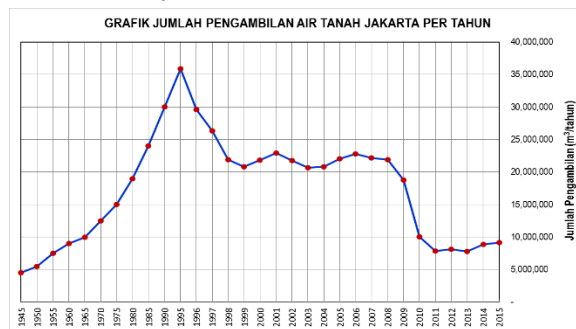
Gambar 2 Kolom stratigrafi CAT Jakarta

Fachri dkk (2002) membagi sistem akuifer CAT Jakarta berdasarkan litokorelasi. Pembagian sistem akuifer ini dilihat dari pola umum secara vertikal dan sebaran satuan batuan pembentuknya sebagai berikut.

- 1) Zona I (kelompok akuifer), disusun oleh Formasi Citalang dan Endapan Vulkanik Kuarter. Zona ini diidentifikasi sebagai akuifer karena didominasi oleh litologi yang lulus air. Litologi penyusunnya antara lain batupasir, konglomerat, breksi, dan sisipan batulempung. Zona ini menebal ke arah Utara dan menipis ke arah Barat dengan ketebalan antara 20 – 110 m.

- 2) Zona II (kelompok akuitar), disusun oleh Formasi Kaliwangu bagian atas. Zona ini diidentifikasi sebagai akuitar karena didominasi oleh litologi yang kedap air yaitu batulempung sisipan batupasir. Zona ini menebal ke Utara dengan ketebalan berkisar antara 5 – 110 m.
- 3) Zona III (kelompok akuifer), disusun oleh Formasi Genteng, Formasi Kaliwangu bagian tengah, dan Formasi Serpong. Zona ini diidentifikasi sebagai akuifer karena didominasi oleh litologi yang lulus air. Litologi penyusunnya yaitu batupasir, breksi, konglomerat, dan sisipan batulempung. Zona ini menebal ke arah Utara, sedangkan ke arah Barat – Timur menebal di bagian tengah.
- 4) Zona IV (kelompok akuitar), disusun oleh Formasi Kaliwangu bagian bawah. Zona ini diidentifikasi sebagai akuitar karena didominasi oleh litologi yang kedap air, yaitu batupasir sisipan batulempung. Zona ini menebal ke Utara, sedangkan ke arah Barat – Timur ketebalannya relatif seragam.

Selain konseptual hidrogeologi, data yang penting sebagai input pemodelan air tanah adalah jumlah pengambilan air tanah (Gambar 3). Pada tahun 1945, pengambilan air tanah Jakarta masih sangat kecil yaitu sekitar 5 juta m³/tahun. Seiring dengan pertumbuhan industri, perkembangan perkotaan, serta arus urbanisasi yang tinggi, pemakaian air tanah naik secara signifikan. Tahun 1995 merupakan puncak pengambilan air tanah tertinggi hingga mencapai 35 juta m³/tahun. Pada era krisis moneter sekitar tahun 2000, banyak pabrik atau industri yang tutup atau tidak beroperasi. Hal ini diduga telah memicu turunnya pemakaian air tanah hingga mencapai 20 juta m³/tahun (Dinas Tata Air Jakarta, 2015).



Sumber: Data Dinas Tata Air Jakarta, 2015

Gambar 3 Data pengambilan air tanah Jakarta

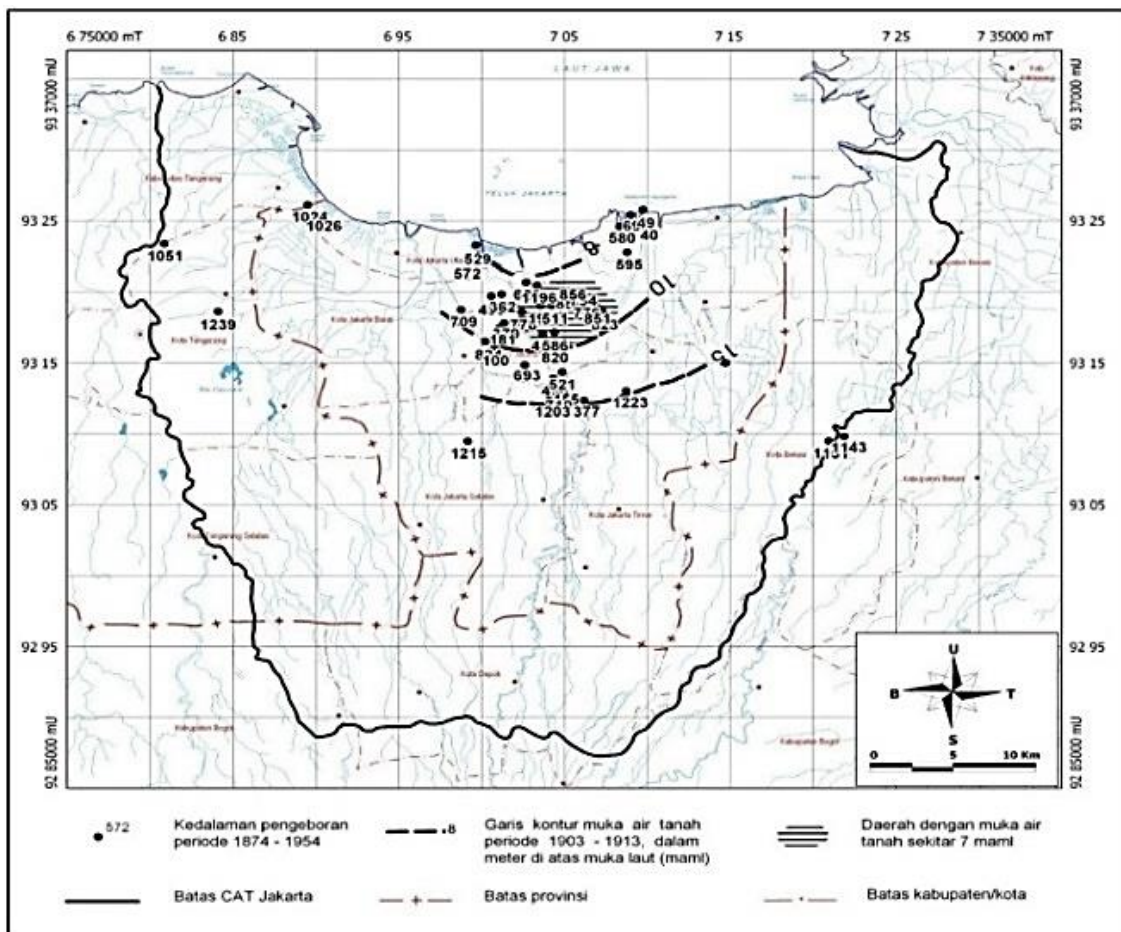
Selanjutnya pada tahun 2009, pemerintah mulai membatasi pemakaian air tanah untuk keperluan komersial. Upaya pemerintah antara lain melalui peningkatan suplai PDAM dan

penyusunan aturan baru tarif pemakaian air tanah. Aturan tersebut diatur dalam SK Gubernur No. 37 Tahun 2009 yang berisi aturan tarif sebesar Rp. 5.366 – Rp. 23.333 per m³/tahun. Kenaikan ini mencapai 5 kali lipat dari aturan sebelumnya, yaitu Rp. 650 – Rp. 4.400 per m³/tahun. Aturan baru tersebut terbukti menurunkan jumlah pengambilan dari 18 juta m³/tahun pada tahun 2009 menjadi 7 juta m³/tahun pada tahun 2011.

Kota Jakarta merupakan dataran rendah dengan ketinggian rata – rata ±7 meter di atas permukaan laut (m dpl). Ditinjau dari kondisi iklimnya, curah hujan rata – rata di wilayah Jakarta berkisar antara 2000 – 2700 mm/ tahun. Dengan temperatur berkisar antara 23,4 – 35,2 °C dan kelembaban udara berkisar antara 59 – 93 % (BPS, 2017). Curah hujan yang jatuh di wilayah DKI Jakarta, sebagian besar melimpas di permukaan. Hanya sebagian kecil saja yang

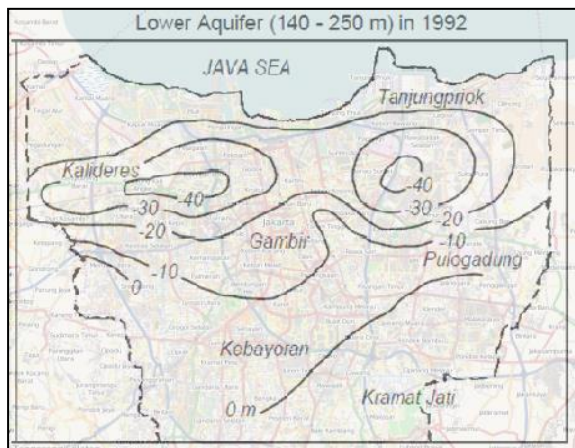
mengimbu ke dalam tanah. Imbuhan air tanah di CAT Jakarta dengan luas 1439 km² dalam 2 dekade ini mengalami penurunan dan nilainya hanya 15% dari rata – rata curah hujan tahunan (Seizarwati dkk, 2017)

Kondisi air tanah Jakarta tahun 1900-an masih sangat potensial. Hal ini dapat dilihat dengan kontur MAT yang bernilai positif terutama di bagian Utara (garis hitam) menunjukkan kisaran kontur MAT antara 5 – 15 m dpl. (Gambar 4). Sementara itu, pada era tahun 1990-an pemakaian air tanah mulai tidak terkendali. Jumlah pengambilan mencapai 30 juta m³/tahun (Maathius, 1996). Kontur MAT Jakarta pada tahun 1992 yang disusun oleh Murdohardono dan Tirtomihardjo (1993) dapat dilihat pada Gambar 5. Peta tersebut menunjukkan adanya kerucut – kerucut penurunan MAT terutama di wilayah Kalideres dan Sunter.



Sumber: Schmidt et al., 1985

Gambar 4 Kontur MAT Jakarta tahun 1916

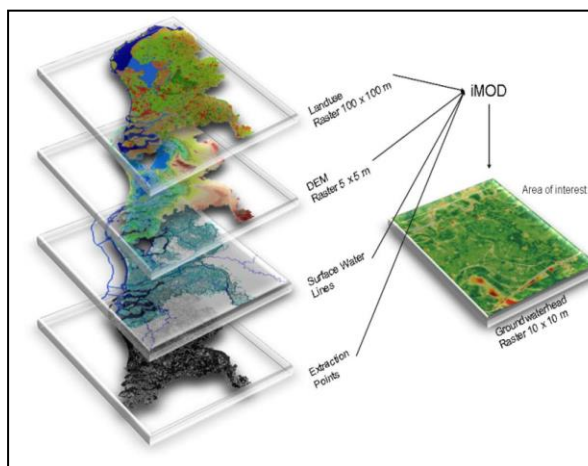


Sumber: Murdohardono dan Tirtomihardjo, 1993

Gambar 5 Kontur MAT Jakarta tahun 1992

METODOLOGI

Simulasi dilakukan dengan menggunakan model aliran air tanah numerik IMOD (*Interactive MODelling*) yang merupakan pengembangan dari MODFLOW (Vermeulen et al., 2014). IMOD 3.2 adalah *software open source* yang sudah dibangun sejak tahun 2014. *Source code*-nya memiliki beberapa kelebihan antara lain memiliki resolusi tinggi, fleksibel, serta dapat melakukan visualisasi 2D dan 3D dari data logbor. Selain itu model ini dapat melakukan *geoediting* model bawah permukaan secara interaktif. IMOD dapat memproses file raster pada orientasi dan resolusi yang berbeda (Vermeulen et al., 2014). Data input tidak harus memiliki resolusi yang sama, karena IMOD akan secara otomatis memilih resolusi yang paling baik untuk output muka air tanah yang dihasilkan pada daerah kajian (Gambar 6).



Sumber: Vermeulen, 2014

Gambar 6 Set input data dalam model IMOD

Model ini menerapkan persamaan diferensial parsial 3D (*finite difference method*) dalam perhitungannya. Persamaan ini dapat menggambarkan kondisi muka air

potensiometrik (h) dan aliran air tanah dalam sistem akuifer. Persamaan ini merupakan gabungan dari Hukum Kestimbangan Massa dan Hukum Darcy yang dapat dinyatakan sebagai persamaan (1).

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

dimana:

- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} = nilai konduktivitas hidraulik sepanjang koordinat x, y, dan z (m/s)
- h = muka air potensiometrik (m)
- W = fluks volumetrik per unit volume yang menggambarkan masuk dan keluarnya air (s⁻¹)
- S_s = simpanan spesifik (*specific storage*) dari material pori (m⁻¹)
- t = waktu (s)

Proses kalibrasi model telah dilakukan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh de Roover (2015) melalui proses *sensitivity analysis*, yaitu pemilihan parameter yang paling sensitif dan berpengaruh besar terhadap model. Parameter tersebut antara lain konduktivitas hidraulik (K_{HV} dan K_{VA}), ekstraksi air tanah (WEL), dan imbuhan air tanah (RCH). Proses penyetelan parameter (*parameter adjustment*) dilakukan dengan membandingkan peta dan grafik MAT hasil simulasi terhadap data pengamatan dengan menerapkan metode *one-at-a-time* (OAT method) (de Roover, 2015). Perubahan level MAT di setiap grid mengikuti persamaan (2).

$$h_{i,j,diff} = h_{i,j,adj} - h_{i,j,ref} \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- h_{diff} = perubahan muka air
- h_{adj} = muka air hasil penyetelan parameter
- h_{ref} = muka air acuan
- i, j = koordinat grid

Kondisi batas (*boundary condition*) pemodelan berupa Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta yang dibatasi secara vertikal di bagian atas oleh muka air tanah bebas (*freatic water level*) dan di bagian bawah dibatasi oleh batuan dasar berumur tersier yang bersifat kedap air. Sementara itu, batas horizontal menggunakan tipe - tipe batas yang didasarkan pada sifat hidraulika, yaitu:

- 1) Bagian Utara dibatasi oleh Laut Jawa (*constant head boundary*)
- 2) Bagian Barat dibatasi oleh Sungai Cisadane (*constant head boundary*)

- 3) Bagian Timur dibatasi oleh Sungai Bekasi (*constant head boundary*)
- 4) Bagian Selatan dibatasi oleh Antiklinorium Bogor (*no-flow boundary*)

Data yang digunakan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung di lapangan yaitu melalui pengukuran level muka air tanah pada sumur – sumur pantau. Data ini digunakan untuk kalibrasi pemodelan. Data sekunder diperoleh dari berbagai instansi dan hasil studi literatur. Ditinjau dari jenisnya, data yang digunakan untuk pemodelan air tanah terdiri dari data statis dan data dinamis. Data statis terdiri dari peta topografi (*Digital Elevation Model* atau DEM), peta drainase, peta jaringan sungai, dan parameter sungai. Sementara itu, data dinamis terdiri dari data jumlah pengambilan air tanah, kontur muka air tanah, serta data untuk menghitung imbuhan air tanah antara lain curah hujan, peta tata guna lahan, dan kepadatan penduduk.

Peta topografi disusun dari data LIDAR Jakarta yang dilengkapi dengan peta SRTM 90m. Peta drainase dan jaringan sungai diperoleh dari model SOBEK yang dilengkapi dengan data dari Badan Informasi Geospasial (BIG). SOBEK adalah model hidrodinamik yang dikembangkan oleh Deltares untuk simulasi genangan atau banjir (Deltares, 2017). Parameter hidraulik akuifer yang digunakan dalam pemodelan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai parameter model MOD CAT Jakarta

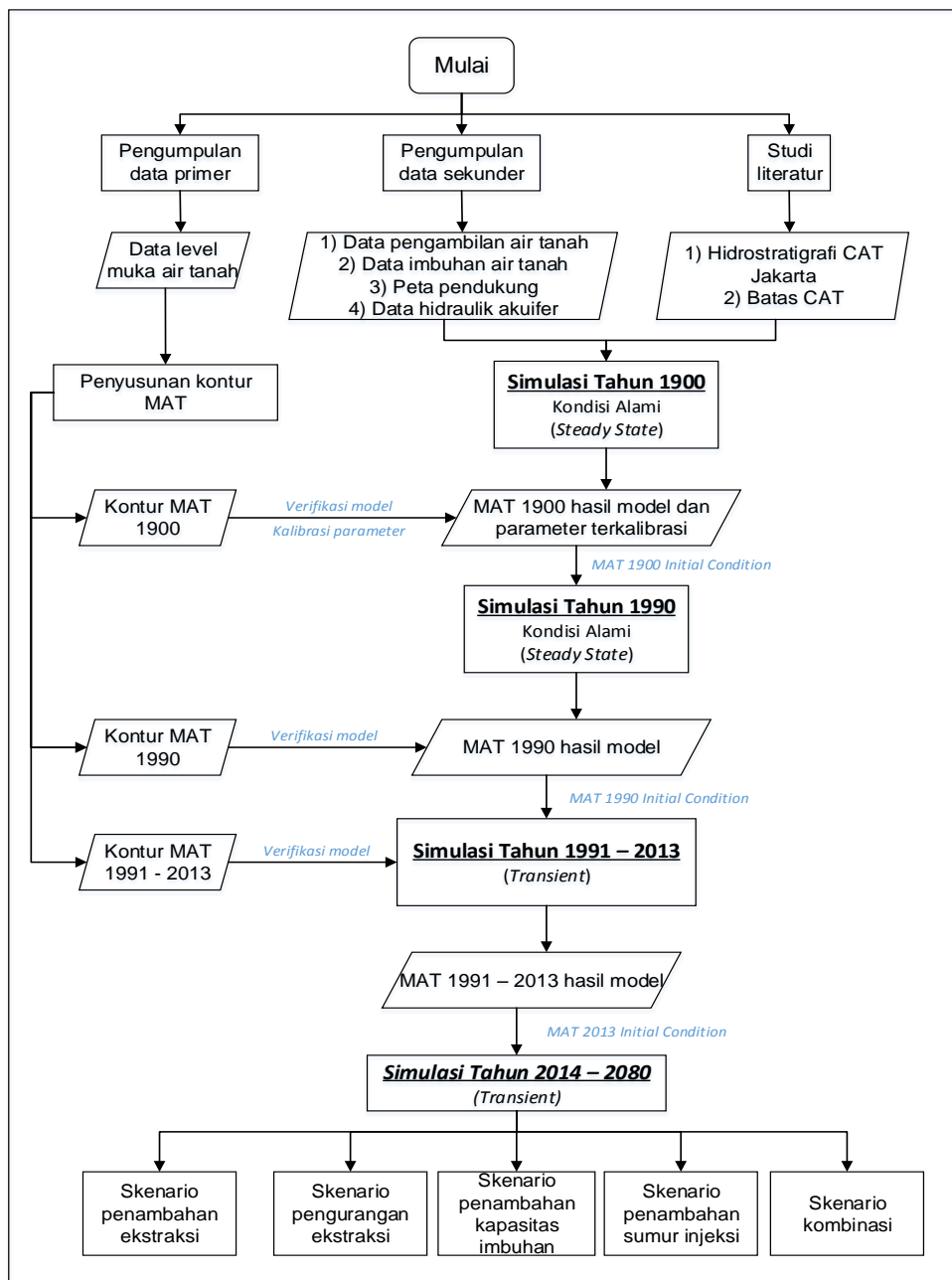
Parameter	Nilai Parameter
Konduktivitas hidraulik horizontal (KHV)	1 m/hari di utara, 1.5 m/hari di tengah, 2 m/hari di selatan (Soefner dkk, 1986)
Konduktivitas hidraulik vertikal (KVA)	KHV/833 (layer 1), KHV/1250 (layer 2 and 3) and KHV/1000 m/hari (layer 4) (Sumber : Soefner dkk, 1986)
Storativitas (STO)	$10^{-8} - 10^{-1}$ (Sumber: Dinas Tata Air, 2015)
Drainase	500 m ² /hari

Sungai (<i>river conductance</i>)	100 – 700 m ² /hari
--	--------------------------------

Metode untuk mengestimasi jumlah imbuhan air tanah mengacu pada studi yang dilaksanakan oleh Directorate General Water Resources (1994) dalam *Jabotabek Water Resources Management Study*. Metode tersebut merupakan modifikasi metode neraca air untuk daerah perkotaan (*urban*). Faktor yang dipertimbangkan antara lain tata guna lahan, drainase perkotaan, dan jumlah penduduk. Perhitungan imbuhan air tanah dengan metode tersebut secara *series* telah dilakukan oleh Seizarwati dkk (2017) untuk tahun 1991 – 2014 dan dijadikan sebagai salah satu input pemodelan. Nilai imbuhan di CAT Jakarta yang pada tahun 1900an berkisar antara 500 – 1500 mm/tahun, saat ini turun menjadi kurang dari 250 mm/tahun. Nilai rata – rata imbuhan air tanah CAT Jakarta dengan area seluas 1439 km² adalah 15% dari rata – rata curah hujan yang jatuh (Seizarwati dkk., 2017).

Tahapan penelitian dituangkan dalam diagram alir pada Gambar 7. Simulasi dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*) dan tidak tunak (*transient*). Kondisi tunak adalah ketika sistem tidak berubah terhadap waktu atau konstan. Kondisi ini digunakan pada simulasi tahun 1900 dan 1991 yang merupakan tahap kalibrasi parameter. Kondisi tidak tunak (*unsteady state* atau *transient*) adalah ketika sistem berubah setiap waktu, salah satunya akibat pengambilan air tanah. Kondisi ini digunakan pada simulasi kondisi aktual tahun 1991 – 2013 dan proyeksi hingga tahun 2080. Proyeksi dilakukan dengan beberapa skenario sebagai berikut.

- 1) Penambahan ekstraksi
- 2) Pengurangan ekstraksi
- 3) Peningkatan kapasitas imbuhan
- 4) Penambahan sumur injeksi
- 5) Kombinasi antara penambahan ekstraksi dengan peningkatan kapasitas imbuhan.



Gambar 7 Diagram alir pemodelan air tanah Jakarta

Skenario – skenario tersebut dipilih dengan segala pertimbangan dan kemungkinan yang akan terjadi hingga tahun 2080. Khusus untuk skenario pengurangan ekstraksi diasumsikan mengikuti target MDG 2015 DKI Jakarta tentang kebutuhan dan ketersediaan air tahun 2015 – 2030 (Tabel 2). Target pasokan layanan Pamjaya sebesar 100% di tahun 2025 (Ali, 2016). Dengan tercapainya target pasokan air Pamjaya, maka diharapkan pemakaian air tanah dapat dihentikan. Target tersebut dijadikan dasar untuk menentukan skenario pengurangan ekstraksi air tanah sebesar 10% per tahun.

Tabel 2 Target kebutuhan dan ketersediaan air Jakarta 2015 – 2030

No	Parameter Perencanaan		Unit	Tahun		
				2010	2020	2030
1	Total	Populasi	Jiwa	11.437	13.404	14.807
2	Target	Cakupan	%	70	85	100
	Layanan	Batas Maksimum	%	30	15	0
3	Pengambilan Air Tanah Dalam					
4	Total	Populasi Terlayani	Jiwa	8.006	11.394	14.807
5	Total	Kebutuhan Air Bersih	L/det	26.938	39.001	40.102

Sumber: Ali, 2016

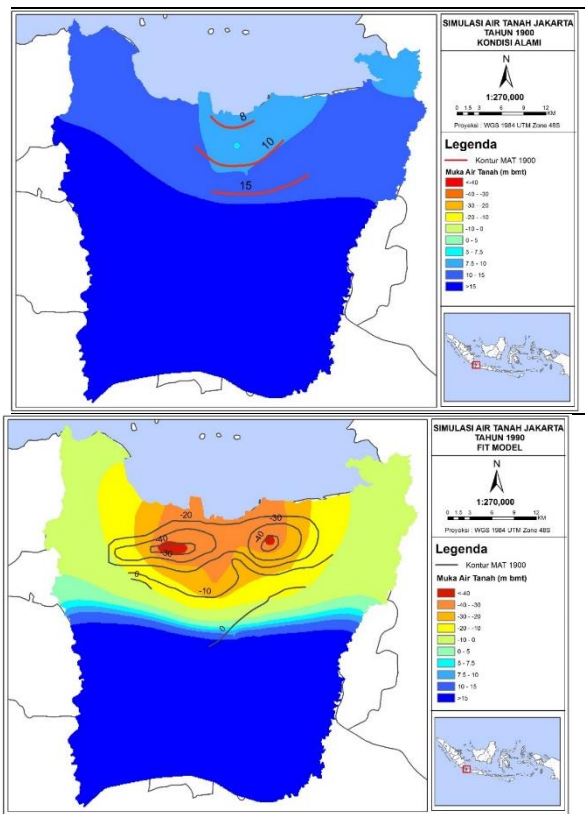
Kagabu et al. (2011) melakukan simulasi air tanah Jakarta hingga tahun 2025 dengan 2 skenario, yaitu dengan membiarkan dan melakukan usaha penyelamatan. Model tersebut menunjukkan hasil yang optimistis, yaitu dengan skenario penyelamatan, MAT Jakarta mengalami pemulihan dan pada tahun 2025 kembali seperti kondisi MAT tahun 1985. Sementara itu, jika dilakukan skenario pembiaran maka MAT Jakarta akan turun hingga mencapai -60 di bawah permukaan tanah (m bmt).

PEMBAHASAN

Simulasi Air Tanah pada Kondisi Aktual

Simulasi aliran air tanah Jakarta dibuat secara bertahap (Gambar 7). Tahap pertama adalah simulasi aliran air tanah pada kondisi alami (1900) yang bertujuan untuk proses kalibrasi parameter hidraulik akuifer. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa proses kalibrasi parameter telah dilakukan oleh de Roover (2015) melalui analisis *sensitivity analysis* dan *parameter adjustment* dengan variansi faktor pengali 0,5 dan 2. Dengan nilai parameter tersebut, hasil simulasi tahun 1900 cukup baik setelah dibandingkan dengan data pengamatan (Gambar 8).

Tahap selanjutnya adalah simulasi pada saat ekstraksi air tanah Jakarta mulai terjadi secara intensif. Tahun yang dipilih adalah kondisi tahun 1990, karena pada waktu tersebut tersedia data kontur MAT hasil pengamatan yang dapat digunakan sebagai pembanding. Pada awalnya, hasil simulasi tidak menunjukkan kesesuaian dengan kontur MAT hasil pengamatan. Hal ini terjadi karena banyak sumur – sumur produksi yang tidak tercatat, oleh karena itu dilakukan *model fitting*, yaitu dengan menambah atau mengurangi jumlah ekstraksi air tanah hingga memperoleh hasil simulasi yang sesuai dengan kontur MAT yang dijadikan acuan. Berdasarkan hasil *model fitting* tersebut, jumlah pengambilan air tanah pada tahun 1990 perlu dikalikan faktor 3, sehingga dapat diketahui bahwa ada sebanyak 26 juta m³/detik jumlah ekstraksi air tanah yang tidak tercatat. Proses *model fitting* dalam penelitian ini dilakukan secara visual (*rough fitting*) (Gambar 8). Kagabu et al. (2011) dalam simulasinya juga menyimpulkan bahwa terdapat sumur – sumur produksi yang tidak tercatat dengan jumlah jauh melebihi pengambilan dari sumur – sumur yang tercatat.

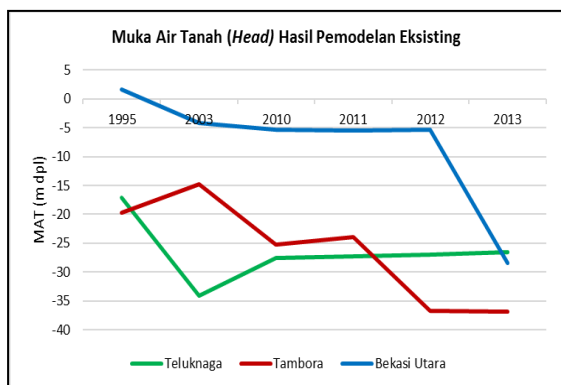


Gambar 8 Hasil simulasi air tanah Jakarta tahun 1900 (atas) dan tahun 1990 (bawah)

Tahap selanjutnya adalah simulasi aliran air tanah pada kondisi aktual tahun 1991 s.d 2013 dengan menggunakan hasil simulasi tahun 1990 sebagai kondisi awal (*initial condition*). Secara spasial, muka air tanah CAT Jakarta bagian Barat, Timur, dan Selatan mengalami penurunan yang cukup signifikan. Pada tahun 1995, kerucut penurunan MAT hanya terdapat di wilayah Tangerang Utara (Teluknaga) dan Jakarta Utara (Penjaringan). Sementara itu, pada tahun 2013 lokasi kerucut penurunan bertambah ke wilayah Jakarta Timur (Pulogadung), Jakarta Barat (Cengkareng dan Tambora), dan Bekasi Utara. Hutasoit (2006) juga melakukan simulasi air tanah Jakarta tahun 1995 dan 2005 menggunakan Visual MODFLOW. Hasilnya menunjukkan bahwa pada tahun 2005 kerucut penurunan MAT meluas hingga meliputi seluruh bagian Utara DKI Jakarta.

Penurunan MAT tertinggi di beberapa tempat dituangkan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 9. MAT di Teluknaga pada tahun 1995 adalah sekitar -17 m dpl, kemudian turun hingga -33 m dpl pada tahun 2003, kemudian sejak tahun 2010 s.d 2013 nilai MAT stabil di angka -27 m dpl. MAT di Tambora pada tahun 1995 adalah -20 m dpl, sempat naik pada tahun 2003 menjadi -15 m dpl, namun setelah itu terus mengalami penurunan hingga mencapai -37 m

dpl. MAT di Bekasi Utara pada tahun 1995 berada di atas permukaan laut, namun mengalami penurunan yang cukup tinggi yaitu sekitar 30 meter sampai dengan tahun 2013.



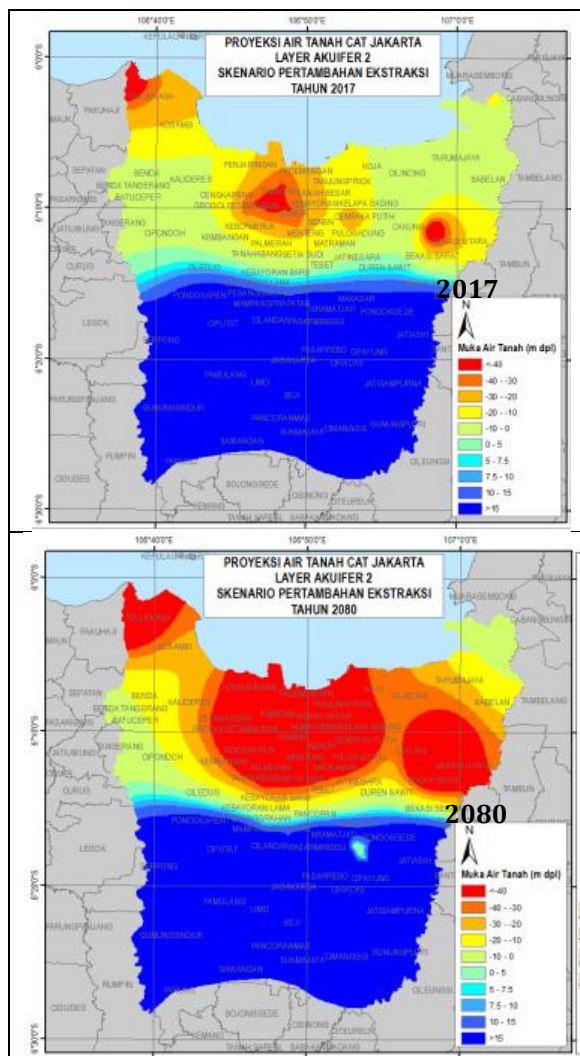
Gambar 9 Grafik penurunan MAT hasil simulasi

Proyeksi Air Tanah Hingga Tahun 2080

1) Skenario penambahan ekstraksi

Pengambilan air tanah dalam skenario ini diasumsikan bertambah sebesar 9% per tahun. Skenario ini dibuat berdasarkan kenaikan jumlah ekstraksi yang tercatat oleh Dinas Tata Air Jakarta selama kurun waktu 3 tahun terakhir yaitu sekitar 9% per tahun. Hasil simulasi secara spasial dapat dilihat pada Gambar 10. Pada gambar tersebut kondisi MAT tahun 2017 (atas) dibandingkan dengan tahun 2080 (bawah). Pada tahun 2080 diperkirakan kerucut penurunan dengan kedalaman MAT lebih dari 40 meter semakin banyak bahkan hingga meliputi seluruh wilayah bagian Utara CAT Jakarta. Selain itu, skenario ini dapat menyebabkan kerucut penurunan MAT semakin dalam bahkan hingga mencapai -200 m dpl pada tahun 2080. Kagabu et al. (2011) pada simulasinya dalam skenario pembiaran menyebabkan penurunan MAT pada tahun 2025 mencapai -60 m bmt. Wilayah yang mengalami penurunan level MAT melebihi 40 m dpl berdasarkan skenario penambahan ekstraksi dapat dilihat pada Tabel 3.

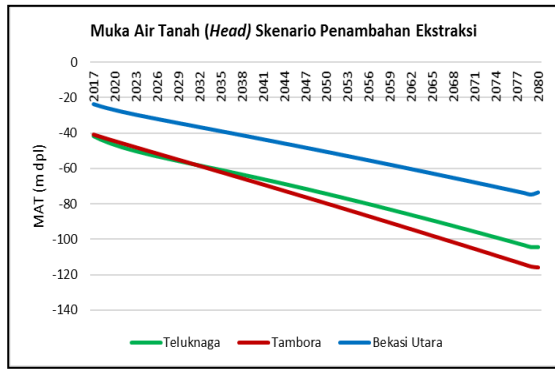
Grafik penurunan MAT pada 3 lokasi yang sama, yaitu Teluknaga, Tambora, dan Bekasi Utara memberikan hasil grafik yang berbentuk linier (Gambar 11). Rata – rata penurunan MAT di Teluknaga diperkirakan mencapai -1 m/tahun, di wilayah Tambora sebesar -1,2 m/tahun, dan di wilayah Bekasi Utara sebesar -0,8 m/tahun.



Gambar 10 Hasil simulasi secara spasial dengan skenario penambahan ekstraksi

Tabel 3 Wilayah penurunan MAT dengan skenario penambahan ekstraksi

Tahun	Lokasi
2020	Teluknaga, Tambora, Bekasi Utara, Petamburan
2040	Teluknaga, Tambora, Bekasi Utara, Penjaringan, Pademangan, Kemayoran, Gambir, Petamburan, Menteng, Kebonjeruk, Cengkareng, Bekasi Barat
2060	Teluknaga, Tambora, Bekasi Utara, Penjaringan, Pademangan, Kemayoran, Gambir, Petamburan, Menteng, Kebonjeruk, Cengkareng, Bekasi Barat, Sawah Besar, Senen, Cempaka Putih, Palmerah, Pulogadung, Tanjungpriok, Kelapa Gading, Matraman, Setiabudi, Tanah Abang, Cakung
2080	Teluknaga, Tambora, Bekasi Utara, Penjaringan, Pademangan, Kemayoran, Gambir, Petamburan, Menteng, Kebonjeruk, Cengkareng, Bekasi Barat, Sawah Besar, Senen, Cempaka Putih, Palmerah, Pulogadung, Tanjungpriok, Kelapa Gading, Matraman, Setiabudi, Tanah Abang, Cakung, Koja

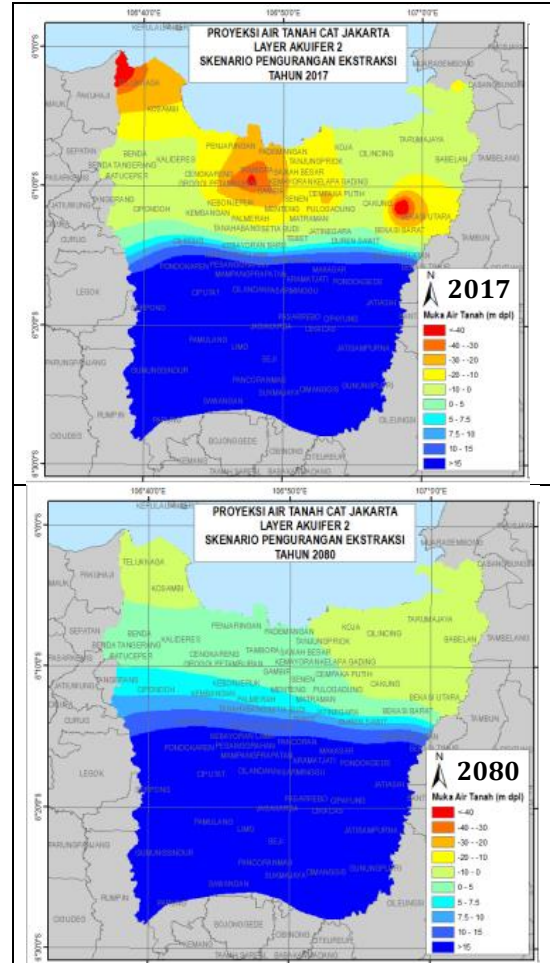


Gambar 11 Grafik MAT skenario penambahan ekstraksi

2) Skenario pengurangan ekstraksi.

Berdasarkan asumsi bahwa pasokan air dari Pamjaya akan memenuhi seluruh kebutuhan air baku di wilayah DKI Jakarta pada tahun 2025 (Tabel 2), maka dibuat skenario pengurangan ekstraksi. Jumlah pengurangan ekstraksi sebesar 10% tiap tahun hingga tahun 2050.

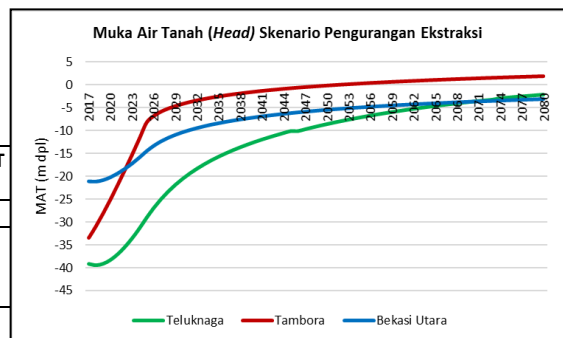
Hasil simulasi menunjukkan adanya pemulihan adanya (Gambar 12). Pada tahun 2050 tidak ada kedalaman MAT yang lebih dari minus 10 m dpl. Bahkan pada tahun 2080 tidak ditemukan lagi kerucut penurunan. Berdasarkan penelitian oleh Kagabu et al. (2011), dengan skenario penyelamatan air tanah, maka kondisi MAT Jakarta tahun 2025 mengalami pemulihan bahkan bisa mencapai kondisi seperti tahun 1985. Wilayah yang masih mengalami kerucut penurunan muka air tanah berdasarkan skenario pengurangan ekstraksi dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 12 Hasil simulasi secara spasial dengan skenario pengurangan ekstraksi

Tabel 4 Wilayah kerucut MAT dengan skenario pengurangan ekstraksi

Tahun	Lokasi	Level MAT (m dpl)
2020	▪ Teluknaga, Tambora, Bekasi Utara	> -40
	▪ Kosambi, Penjaringan, Pademangan, Kemayoran, Gambir, Petamburan, Cengkareng, Cakung, Bekasi Barat	-30
2030	▪ Tanjungpriok, Kelapa Gading, Pulogadung, Senen, Matraman, Menteng, Palmerah, Sawah Besar, Kebon Jeruk	-20
	▪ Teluknaga	-30
2040	▪ Kosambi, Bekasi Utara	-20
	▪ Teluknaga, Kosambi	-20



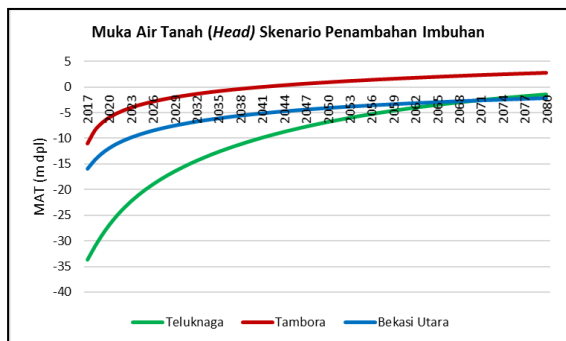
Gambar 13 Grafik MAT skenario pengurangan ekstraksi

3) Skenario peningkatan kapasitas imbuhan

Proyeksi ketiga dibuat dengan skenario peningkatan kapasitas imbuhan 10% tiap tahun. Simulasi ini dibuat dengan asumsi bahwa kondisi imbuhan air tanah DKI Jakarta pada tahun 2080 akan mengalami pemulihan seperti kondisinya pada tahun 1900. Akan tetapi pada skenario ini jumlah pengambilan ikut dihentikan, untuk

Pemulihan yang terjadi dapat dilihat pada grafik MAT series tahun 2017 - 2080 pada 3 lokasi yang sama dengan skenario sebelumnya (Gambar 13). Rata - rata pemulihan MAT di Teluknaga dan Tambora diperkirakan mencapai 0,6 m/tahun, sedangkan di wilayah Bekasi Utara sebesar 0,3 m/tahun.

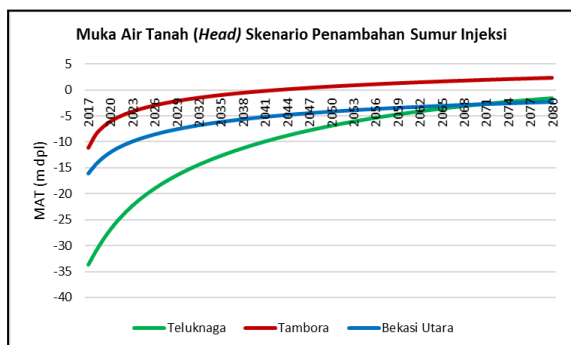
mengetahui efektifitas dari penambahan imbuhan. Pada skenario ini, kondisi MAT mengalami pemulihan, sehingga pada tahun 2080 tidak terdapat lagi kerucut penurunan MAT. Rata – rata pemulihan MAT di Teluknaga diperkirakan mencapai 0,5 m/tahun, sedangkan di wilayah Tambora dan Bekasi Utara sebesar 0,2 m/tahun (Gambar 14).



Gambar 14 Grafik MAT skenario peningkatan kapasitas imbuhan

4) Skenario penambahan sumur injeksi

Proyeksi keempat dibuat dengan skenario penambahan sumur injeksi. Diasumsikan terdapat sumur injeksi pada akuifer dalam sebanyak 58 sumur di 28 wilayah yang mengalami penurunan MAT cukup tinggi. Jumlah air yang diinjeksikan sekitar 10 juta m³/tahun. Akan tetapi pada skenario ini jumlah pengambilan juga ikut dihentikan, untuk mengetahui efektifitas dari penambahan sumur injeksi. Skenario ini juga memberikan hasil yang sama, yaitu terjadi pemulihan MAT sehingga pada tahun 2080 tidak terdapat lagi kerucut penurunan. Rata – rata pemulihan MAT di Teluknaga diperkirakan mencapai 0,5 m/tahun, sedangkan di wilayah Tambora dan Bekasi Utara sebesar 0,2 m/tahun (Gambar 15).

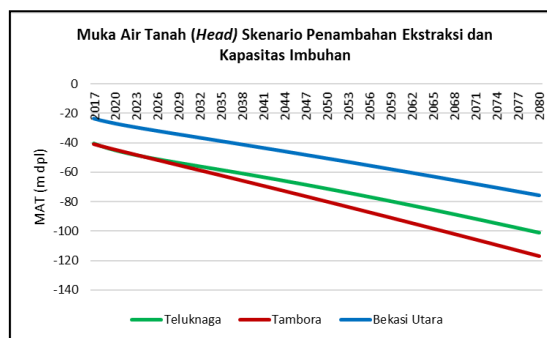


Gambar 15 Grafik MAT skenario penambahan sumur injeksi

5) Skenario kombinasi

Skenario ini dibuat dengan 2 asumsi, yaitu ekstraksi dibiarkan bertambah sebesar 9% per

tahun dan kapasitas imbuhan ditingkatkan 10% tiap tahun. Hasil simulasi ini menunjukkan munculnya kerucut penurunan semakin dalam pada tahun 2080 hingga mencapai -200 m dpl, sama seperti pada skenario 1. Rata – rata penurunan MAT di Teluknaga diperkirakan mencapai -1 m/tahun, di wilayah Tambora sebesar -1,2 m/tahun, dan di wilayah Bekasi Utara sebesar -0,8 m/tahun (Gambar 16). Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat diketahui bahwa ekstraksi air tanah memberikan pengaruh yang lebih besar, dibandingkan dengan penambahan kapasitas imbuhan.



Gambar 16 Grafik MAT skenario kombinasi

Berdasarkan hasil simulasi air tanah yang telah dilakukan dengan beberapa skenario tersebut, dapat diketahui bahwa pengambilan air tanah merupakan faktor yang paling kuat dalam mempengaruhi fluktuasi muka air tanah Jakarta. Jika pengambilan air tanah dapat dikontrol yaitu dengan dilakukan pengurangan secara bertahap bahkan hingga tidak ada lagi pengambilan air tanah (seperti pada skenario 2), maka muka air tanah mengalami pemulihan (*recovery*) secara signifikan, tanpa harus meningkatkan kapasitas imbuhan ataupun menambah sumur injeksi. Sementara itu, jika pengambilan air tanah terus berlanjut bahkan terus meningkat, meskipun ditambah dengan sumur injeksi ataupun dengan meningkatkan kapasitas imbuhan, muka air tanah Jakarta tetap akan mengalami penurunan. Bahkan kerucut penurunan MAT semakin dalam dan luas.

KESIMPULAN

Pemodelan air tanah dengan IMOD dapat memberikan hasil yang cukup baik untuk simulasi aliran air tanah Jakarta, baik kondisi aktual maupun proyeksi ke depan. Hasil simulasi pada kondisi aktual menunjukkan bahwa kerucut penurunan MAT semula hanya terdapat di wilayah Teluknaga dan Penjaringan pada tahun 1995, sedangkan pada tahun 2013 meluas hingga ke wilayah Pulogadung, Cengkareng, dan Tambora. Penurunan MAT tertinggi terjadi di

wilayah Bekasi Utara hingga mencapai 30 meter selama kurun waktu 18 tahun. Proyeksi air tanah dengan skenario penambahan ekstraksi menyebabkan penurunan MAT sebesar 0,8 – 1,2 m/tahun. Skenario pengurangan ekstraksi menyebabkan pemulihan MAT sekitar 0,3 – 0,6 m/ tahun.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa faktor utama yang mempengaruhi fluktuasi muka air tanah Jakarta adalah ekstraksi air tanah. Faktor lainnya seperti peningkatan kapasitas imbuhan atau penambahan sumur injeksi tidak akan efektif, jika pengambilan air tanah tetap berlangsung. Pemulihan air tanah Jakarta hanya akan terjadi jika pengambilan air tanah dapat dikurangi atau bahkan dihentikan hingga 100% (*zero groundwater abstraction*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Karya tulis ilmiah ini merupakan bagian dari hasil kegiatan Dukungan Pengembangan Kawasan Terpadu Pesisir Ibu Kota Negara atau *National Capital Integrated Coastal Development (NCICD)*. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Puslitbang SDA, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang telah memberikan kesempatan untuk dapat melaksanakan penelitian terkait simulasi air tanah Jakarta serta kepada Deltares (Belanda) yang telah berbagi pengetahuan tentang pemodelan air tanah dengan *software* IMOD.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardelia, M.N. 2015. Analisis Akses Masyarakat DKI Jakarta Terhadap Air Bersih Pasca Privatisasi Air Tahun 2009-2014. *Journal of Politic and Government Studies* Vol. 5 (4).
- Ali, F. 2016. Jakarta Water Supply for Zero Groundwater Policy. *Disampaikan pada High Level Meeting on Land Subsidence* (3 Maret 2016).
- Badan Pusat Statistik Provinsi DKI Jakarta. 2017. Jakarta Dalam Angka 2017. *Database Dinas Tata Air Jakarta 2015*. Jakarta: BPS Provinsi DKI Jakarta
- Chen, C., S. Pei, J. Jiao. 2003. Land Subsidence Caused by Groundwater Exploitation in Suzhou City, China. *Hydrogeology Journal* Vol. 11: 275-287.
- Delinom, R.M. 2015. Ancaman Bawah Permukaan Jakarta Tak Terlihat, Tak Terpikirkan, dan Tak Terduga. Jakarta: LIPI Press.
- Deltares. 2017. SOBEK Hydrodynamic, Rainfall Runoff and Real Time Control User Manual. Deltares, the Netherlands.
- de Roover, S. 2015. Modelling the Jakarta Groundwater System: A Sensitivity Analysis. Bachelor Thesis University of Twente.
- Dinas Tata Air Jakarta. 2015. Data Jumlah Pemakaian Air Tanah Wilayah DKI Jakarta 1945 - 2015. *Database Dinas Tata Air Jakarta 2015*.
- Dinas Tata Air. 2015. Data Hasil Uji Pemompaan. *Pilot Project Pengurangan Ekstraksi Air Tanah DKI Jakarta*. Jakarta: Dinas Tata Air.
- Directorate General Water Resources. 1994. Jabotabek Water Resources Management Study. *Final Report*, Volume 6. Jakarta: Directorate General of Water Resources Development, Ministry of Public Works
- Fachri, M., Djuhaeni, L.M. Hutasoit, A.M. Ramdhan. 2002. Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Airtanah Jakarta. *Buletin Geologi* Vol. 34 (3).
- Hutasoit, L.M. 2006. Pemodelan Air Tanah Jakarta dan Bandung. *Lokakarya Rekayasa Konservasi Air Tanah Nasional LIPI*. Bandung, Desember 2006.
- Kagabu, M., J. Shimada, R. Delinom, T. Nakamura, M. Taniguchi. 2013. Groundwater Age Rejuvenation Caused by Excessive Urban Pumping in Jakarta Area, Indonesia. *Journal of Hydrological Processes* Vol. 27 (18).
- Kagabu, M., J. Shimada, R. Delinom, M. Tsujimura, M. Taniguchi. 2011. Groundwater Flow System under a Rapidly Urbanizing Coastal City Asmined by Hydrogeochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences* Vol. 40: 226 - 2390.
- Herlambang, A. dan R.H. Indriatmoko. 2005. Pengelolaan Air Tanah dan Intrusi Air Laut. *JAI* Vol. 1 (2).
- Hendrayana, H. 1994. *Pengantar Model Air Tanah*. Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Hoque, M.A., M.M. Hoque, K.M. Ahmed. 2007. Declining Groundwater Level and Aquifer Dewatering in Dhaka Metropolitan Area, Bangladesh: Causes and Quantification. *Hydrogeology Journal* Vol 15: 1523-1534.
- Maathius, H., R.N. Young, S. Adi, S. Prawiradisastra. 1996. Final Report : Development of Groundwater Management Srategis in the Coastal Region of Jakarta. *SRC Publication No. R-1250-I-E-96*

- Mahmoudpour, M., M. Khomehchiyan, M.R. Nikudel, M.R. Ghassemi. 2016. Numerical Simulation and Prediction Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology* Vol. 201: 6-28.
- Murdohardono, D. dan H. Tirtomihardjo. 1993. Penurunan Tanah di Jakarta dan Rencana Pemantauannya. *Proceedings of the 22nd Annual Convention of the Indonesian Association of Geologist*. Bandung: 346 – 354
- Onodera, S., M. Saito, M. Sawano, T. Hosono, M. Taniguchi, J. Shimada, Y. Umezawa, R.F. Lubis, S. Buapeng, R. Delinom. 2009. Effects of Intensive Urbanization on the Intrusion of Shallow Groundwater into Deep Groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta. *Journal Science of The Total Environment* Vol. 407: 3208
- Poespowardoyo, R.S. 1992. Peta Hidrogeologi Lembar Jakarta. Direktorat Geologi Tata Lingkungan : Bandung
- Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. 2009. Peraturan Gubernur Provinsi DKI Jakarta Nomor 37 Tahun 2009 Tentang Nilai Perolehan Air Sebagai Dasar Pengenaan Pajak Pengambilan dan Pemanfaatan Air Bawah Tanah. Sekretaris Daerah Provinsi DKI Jakarta.
- Seizarwati, W., M. Syahidah, dan H. Rengganis. 2017. Penurunan Kapasitas Imbuan Air Tanah CAT Jakarta Menggunakan Metode Neraca Air untuk Daerah Urban. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan* Vol.27(1): 27 – 37.
- Schmidt, G., H. Tirtomihardjo, and G. Koehler. 1985. Groundwater Modelling. *Jakarta Groundwater Study*, Working Paper (HAG 116)
- Soefner, B., M. Hobler, and G. Schmidt. 1986. Jakarta Groundwater Study. Final Report. Hannover & Bandung: Federal Institute of Geosciences & Directorate of Environmental Geology
- Tremayne, A. 2010. Changes to Water Balance due to Urbanization. *University of Western Australia*.
- Van Bemmelen. 1949. The Geology of Indonesia. Government Printing Office, The Hague.
- Vermuelen, P., N.H. Quan, N.D.G. Nam, P.V. Hung, N.T. Tung, T.V. Thanh, R. Dam. 2013. Groundwater Modeling for the Mekong Delta using IMOD. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, Adelaide, Australia, 2013
- Vermeulen, P.T.M., W. van der Linden, B. Minnema. 2014. IMOD User Manual Version 3.0.36988. Delft: Deltares