

## **PENENTUAN JARINGAN SUMUR PANTAU PRIMER DENGAN METODE INVERSE DISTANCE WEIGHTING DI CEKUNGAN AIR TANAH JAKARTA**

### **OPTIMIZATION OF PRIMARY MONITORING WELLS NETWORK BY INVERSE DISTANCE WEIGHTING METHOD IN JAKARTA GROUNDWATER BASIN**

**Wulan Seizarwati<sup>1)</sup>\* Derry Prasetya<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Balai Hidrologi dan Tata Air, Pusat Litbang Sumber Daya Air  
Jl. Ir. H. Juanda 193, Bandung, Indonesia

\*Corresponden author: [wulan\\_seizarwati@yahoo.com](mailto:wulan_seizarwati@yahoo.com)

Diterima: 19 Juli 2018; Direvisi: 26 Februari 2019; Disetujui: 23 Mei 2019

#### **ABSTRACT**

*The increasing demand of raw water in DKI Jakarta has caused excessive groundwater abstraction. It causes the groundwater level drop to certain level and has emerged cone of depression in some areas. Groundwater management as an effort to recover the groundwater level, requires an integrated groundwater monitoring system. Recently, there are approximately 161 groundwater monitoring wells in Jakarta groundwater basin. Those wells are generally categorized as secondary network, since determined by groundwater abstraction activity. Meanwhile, a representative primary network to monitor the natural condition of groundwater in each aquifer layer is not yet available completely. The method of Inverse Distance Weighting (IDW) spatial estimation is applied to determine the number and distribution of primary monitoring wells based on aquifer geometry using Groundwater Modeling System (GMS) software. Based on the aquifer geometry, it can be arranged monitoring zones and the number of monitoring wells in each zone. There are 9 monitoring zones in Jakarta groundwater basin consist of 1 zone with 1 monitoring well, 2 zones with 2 monitoring wells, 3 zones with 3 monitoring wells, and 3 zones with 4 monitoring wells, so that the total of primary monitoring wells for groundwater monitoring in Jakarta groundwater basin is 26 monitoring wells. This research is expected to be useful for stakeholders to optimize the representative monitoring wells network based on aquifer geometry in sustainable groundwater management.*

**Keywords:** *Aquifer geometry, groundwater, groundwater modeling system, inverse distance weighting, monitoring wells*

#### **ABSTRAK**

*Kebutuhan air baku di wilayah DKI Jakarta yang terus meningkat telah menyebabkan pengambilan air tanah yang berlebihan. Hal ini berdampak pada turunnya Muka Air Tanah (MAT) hingga level tertentu dan memunculkan kerucut penurunan MAT di sejumlah wilayah. Pengelolaan air tanah sebagai upaya memulihkan level MAT membutuhkan suatu sistem pemantauan air tanah yang terpadu. Pada saat ini terdapat sekitar 161 sumur pantau air tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta. Sumur-sumur tersebut pada umumnya dikategorikan sebagai jaringan sekunder, karena ditentukan berdasarkan aktivitas pengambilan air tanah. Sementara itu, jaringan primer yang representatif untuk memantau kondisi alamiah air tanah di tiap lapisan akuifer belum tersedia secara lengkap. Metode estimasi spasial Inverse Distance Weighting (IDW) diterapkan untuk menentukan jumlah dan distribusi sumur pantau primer berdasarkan geometri akuifer menggunakan perangkat lunak Groundwater Modeling System (GMS). Berdasarkan geometri akuifer yang dihasilkan dapat disusun zona-zona pemantauan dan jumlah sumur pantau di tiap zona. Terdapat 9 zona pemantauan di CAT Jakarta yang terdiri dari 1 zona dengan 1 sumur pantau, 2 zona dengan 2 sumur pantau, 3 zona dengan 3 sumur pantau, dan 3 zona dengan 4 sumur pantau, sehingga total sumur pantau primer untuk memantau kondisi alamiah air tanah CAT Jakarta adalah 26 sumur pantau. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pemangku kepentingan untuk menentukan jaringan sumur pantau yang representatif berdasarkan geometri akuifer dalam pengelolaan air tanah secara berkelanjutan.*

**Kata Kunci:** *Geometri akuifer, air tanah, groundwater modeling system, inverse distance weighting, sumur pantau,*

## PENDAHULUAN

Air tanah merupakan material baku yang paling banyak dikonsumsi di dunia. Permasalahan terkait air tanah seperti penurunan level muka air, penurunan kualitas air tanah, dan intrusi air laut yang disebabkan oleh arus urbanisasi, pembuangan limbah industri, dan intensifikasi pertanian menjadi perhatian utama di seluruh dunia (Eshtawi *et al.*, 2016; Pandey *et al.*, 2011; Wu & Tan, 2012; Barron *et al.*, 2013; Chaudhuri & Ale, 2014).

Pengambilan air tanah berlebihan merupakan permasalahan yang umum terjadi di kota-kota besar di Indonesia. Hal ini terjadi karena kebutuhan air baku yang terus meningkat tidak diimbangi dengan penyediaan air yang bersumber dari air permukaan. DKI Jakarta sebagai ibu kota Negara juga belum mampu mengatasi permasalahan serupa. Air tanah dipilih masyarakat setempat karena relatif lebih murah dan mudah dalam pemerolehannya. Menurut Shaad & Burlando (2018), eksploitasi air tanah dangkal merupakan strategi yang dilakukan oleh masyarakat terutama menengah ke bawah untuk memenuhi kebutuhan air akibat kurangnya akses terhadap air bersih yang berasal dari air permukaan. Jika ditinjau dari izin pengusahaan sumber daya air yang dituangkan dalam PP No 121 Tahun 2015, izin pengusahaan air tanah harus memperhatikan prinsip keterpaduan penggunaan air permukaan dan air tanah (*conjunctive use*) (Republik Indonesia, 2015). Namun, pada kenyataannya banyak ditemukan sumur-sumur yang dibangun tanpa seizin Pemerintah.

Tremayne (2010) menyebutkan bahwa pengelolaan air tanah yang buruk ditambah dengan menurunnya kapasitas imbuhan dapat menyebabkan penurunan Muka Air Tanah (MAT) secara lokal maupun regional. Imbuhan air tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta dalam 2 dekade ini mengalami penurunan dan nilainya hanya 15% dari rata-rata curah hujan tahunan (Seizarwati dkk, 2017). Dalam rangka terwujudnya pengelolaan air tanah yang efektif dan berkelanjutan, maka air tanah perlu dipantau secara periodik. Lubis dkk (2015) menekankan bahwa hal yang paling penting dalam pengelolaan air tanah adalah suatu sistem pemantauan yang ditunjang oleh pengawasan yang ketat.

Sumur pemantauan air tanah bermanfaat untuk tujuan evaluasi dan pengelolaan air tanah, estimasi jumlah pengambilan air tanah, identifikasi perilaku air tanah, dan juga kajian pengaruh cuaca dan lingkungan sekitar terhadap keberadaan air tanah. Menurut Hosseini & Kerachian (2017), pemantauan air tanah dapat membantu dalam memahami sistem hidrogeologi melalui

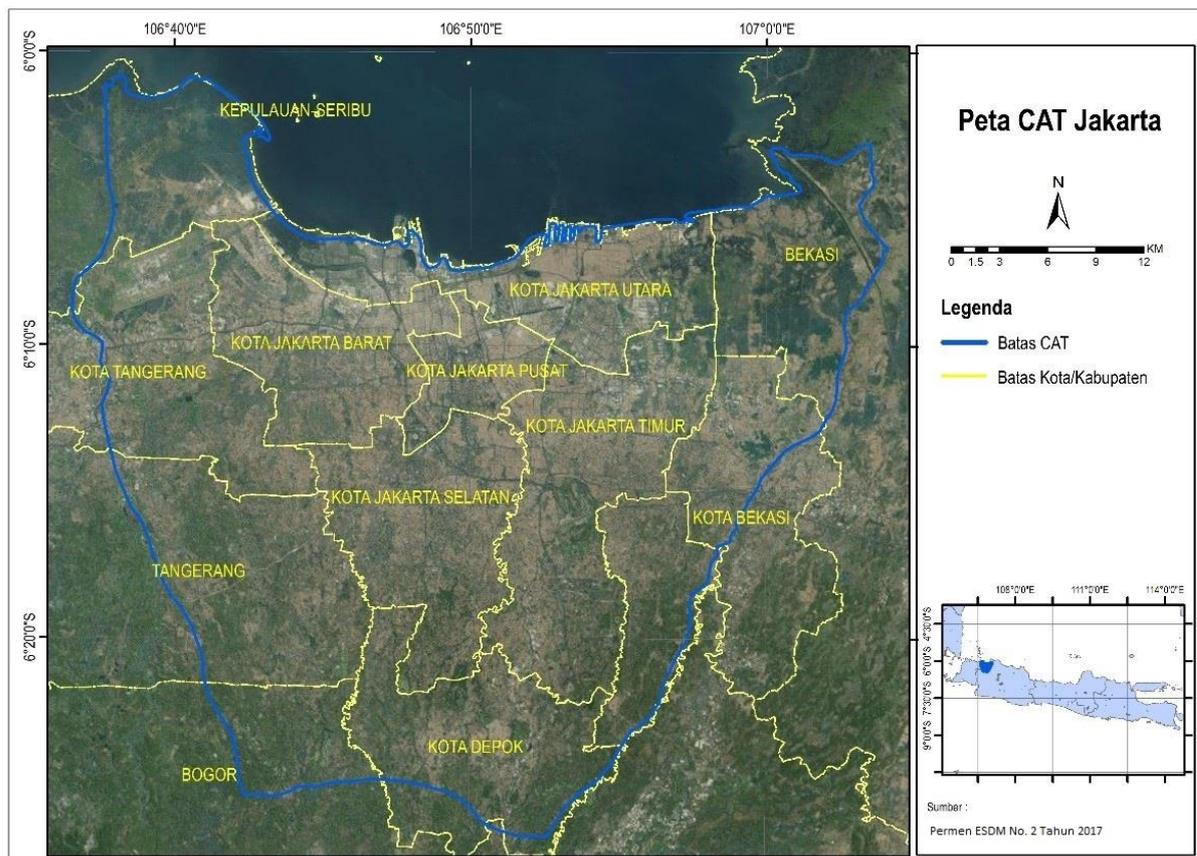
pengumpulan data level dan kualitas air tanah dalam jangka panjang. Selain itu, data MAT yang dihasilkan dari sumur pantau juga sangat berguna untuk proses kalibrasi pemodelan air tanah.

Sumur pantau di wilayah CAT Jakarta sudah cukup banyak, yaitu sekitar 161 sumur pantau. Pengelola sumur pantau tersebut antara lain Balai Konservasi Air Tanah (BKAT), dan Dinas Perindustrian dan Energi (DPE). Sumur-sumur pantau tersebut umumnya dipasang untuk memantau pengaruh aktivitas pengambilan air tanah yang tinggi (jaringan sekunder). Sementara itu, jaringan primer yang representatif untuk memantau kondisi alamiah air tanah di tiap lapisan akuifer belum tersedia secara lengkap. Jika ditinjau dari sebarannya, sumur-sumur pantau eksisting kurang terdistribusi dengan baik secara spasial maupun di tiap lapisan akuifernya.

Lokasi kegiatan meliputi wilayah Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta seluas 1439 km<sup>2</sup>. Berdasarkan Permen ESDM No. 2 Tahun 2017, CAT Jakarta mencakup seluruh wilayah Provinsi DKI Jakarta serta sebagian wilayah Provinsi Banten dan Provinsi Jawa Barat (Republik Indonesia, 2017) (Gambar 1). 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.

Penyusunan jaringan sumur pantau air tanah membutuhkan informasi mengenai hidrogeologi dan hidrostratigrafi yang baik. Hidrostratigrafi adalah model yang dapat menggambarkan stratum geologis penyusun akuifer yang berisi informasi tentang karakteristik air tanah (Santosa, 2001). Maathius *et al.* (1996) menyebutkan bahwa tatanan geologi Jakarta terdiri dari gabungan akuifer yang kompleks dengan sisipan lempung berbentuk lensa-lensa. Mengingat kondisi geologi bawah permukaan CAT Jakarta yang cukup kompleks, maka dibutuhkan simplifikasi dalam penyusunan model hidrostratigrafi tersebut.

Kajian hidrostratigrafi CAT Jakarta yang dijadikan acuan dalam penelitian ini adalah hasil studi Fachri dkk (2002). Kajian tersebut dilakukan berdasarkan analisis inti bor, evaluasi data pemboran, dan perbandingan dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Metode korelasi stratigrafi yang digunakan adalah litokorelasi, yaitu satuan-satuan batuan yang serupa dan posisi stratigrafi menjadi dasar korelasi. Kolom hidrostratigrafi yang tersusun dapat dilihat pada Gambar 2. Fachri dkk (2002) telah membuktikan bahwa batuan berumur Tersier di CAT Jakarta juga dapat bertindak sebagai akuifer, sehingga penentuan batuan dasar akuifer ditentukan murni berdasarkan permeabilitas secara umum dan posisi stratigrafi pada satuan-satuan batuan yang terdapat di CAT Jakarta.



Gambar 1 Lokasi penelitian

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

Sumber: Fachri dkk (2002)

Gambar 2 Kolom stratigrafi CAT Jakarta

Berdasarkan komposisi litologi dan posisi stratigrafinya, satuan-satuan batuan yang dapat bertindak sebagai akuifer di CAT Jakarta adalah Formasi Kaliwangu bagian tengah, Formasi Genteng, Formasi Serpong, Formasi Citalang, dan Endapan Vulkanik Kuartar. Satuan-satuan batuan yang dapat bertindak sebagai akuitar adalah Formasi Kaliwangu bagian atas dan bawah. Satuan-satuan batuan yang dapat bertindak sebagai batuan dasar CAT Jakarta adalah Formasi Bojongmanik, Formasi Jatiluhur, Formasi Parigi, Formasi Subang, dan secara lokal Basal Gunung Dago (Gambar 2).

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan jaringan sumur pantau primer untuk memantau kondisi hidrogeologi alamiah di CAT Jakarta. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan bahan rekomendasi bagi para *Stakeholder* dalam menyusun jaringan sumur pantau primer yang representatif di wilayah CAT Jakarta. Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat dipilih sumur – sumur pantau eksisting yang dapat mewakili jaringan primer dan juga mengusulkan pemasangan sumur pantau baru pada lokasi yang belum terbangun.

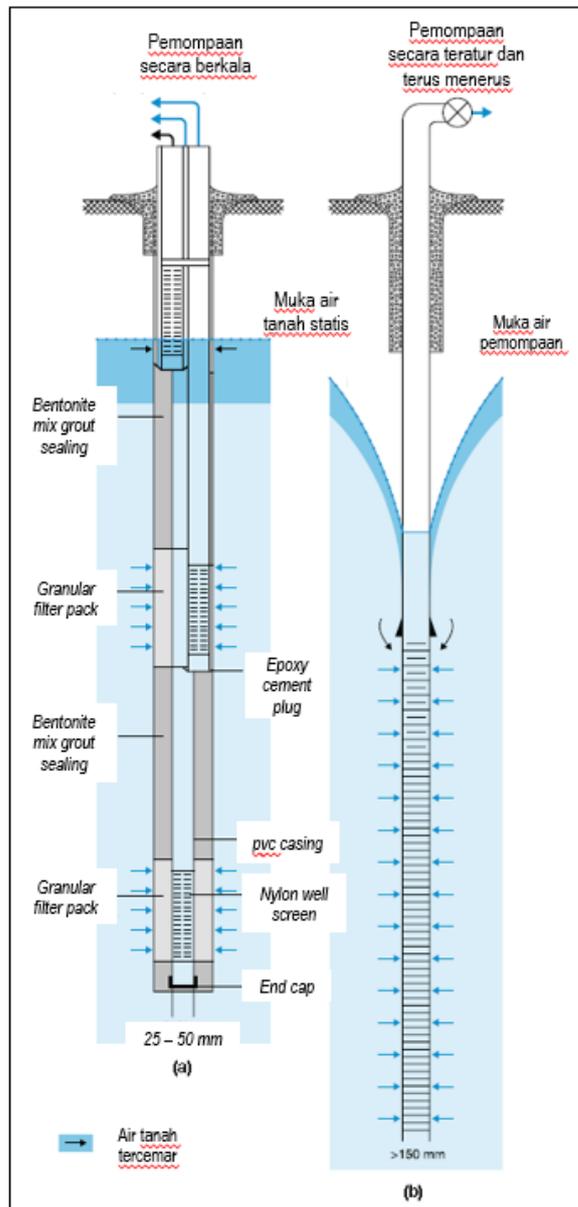
## METODOLOGI

### Sistem Pemantauan Air Tanah

Perilaku air tanah tidak dapat ditentukan hanya dengan melakukan survei dan pengukuran langsung ke lapangan. Dibutuhkan jaringan pemantauan dan interpretasi data secara kontinu. Sumur pantau adalah sumur pada lokasi terpilih yang dibangun untuk mengumpulkan data air tanah seperti muka air, kualitas air, pemanfaatan, dan sebagainya dalam periode waktu tertentu (Fourier *et al.*, 2011). Sumur monitoring didesain untuk mendeteksi perubahan pada aliran dan kualitas air tanah (Gambar 3). Hendrayana & Aprimanto (2015) juga menyebutkan bahwa jaringan sumur pantau berguna untuk mengetahui perubahan kondisi dan lingkungan air tanah pada suatu CAT. Sementara itu, menurut Sreekanth *et al.* (2017) jaringan sumur pantau air tanah adalah lokasi pemantauan yang paling optimal untuk memprediksi kondisi spasial air tanah dari data yang berasal dari titik - titik pemantauan yang jumlahnya terbatas dalam domain spasial.

Rosen (2004) dalam studinya, membagi jaringan sumur pantau menjadi 3 kelompok, yaitu:

- 1) *Diffuse-source water quality networks* merupakan tipe jaringan sumur pantau yang digunakan untuk memantau kualitas air secara regional seperti area pertanian. Sumur-sumur pantau ini diletakkan pada lokasi zat-zat pencemar yang sudah mulai mengalami penyebaran.
- 2) *Point-source water quality networks* merupakan tipe jaringan sumur pantau untuk mengetahui seberapa besar kandungan zat pencemar di suatu titik yang diakibatkan oleh suatu sumber pencemaran di titik tertentu. Metode pemantauan seperti ini pada umumnya bersifat lokal dan sangat tergantung dengan arah aliran air tanah.
- 3) *Groundwater resources (groundwater level) networks* merupakan tipe jaringan sumur pantau yang digunakan untuk melakukan pemantauan secara lokal maupun regional. Pemantauan secara lokal dilakukan pada akuifer yang sama dengan tujuan mengetahui dampak yang diakibatkan oleh pemompaan pada suatu sumur produksi. Sementara itu, tipe jaringan sumur pantau pada skala regional bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari aktivitas pengambilan air tanah yang berlebihan pada suatu CAT, sehingga ditempatkan pada akuifer - akuifer yang berbeda dalam suatu CAT.



Sumber: Tuinhof, *et al.*, 2006

**Gambar 3** Konstruksi detail (a) sumur monitoring dan (b) sumur produksi

Pengukuran MAT secara sistematis untuk periode waktu yang panjang dapat menghasilkan data penting untuk mengevaluasi perubahan kondisi air tanah sepanjang waktu, mengembangkan model air tanah dan prediksinya, serta memantau efektivitas program pengelolaan dan perlindungan air tanah (Taylor & Alley, 2001). Sistem jaringan sumur pantau yang ideal dan terpelihara dengan baik dibutuhkan untuk dapat menghasilkan data MAT yang kontinu dan terdistribusi dalam suatu CAT. Tuinhof *et al.* (2006) membagi sistem dan jaringan pemantauan air tanah menjadi 3 jenis sebagai berikut:

- 1) Sistem pemantauan air tanah primer, berfungsi untuk memantau dan mengevaluasi kondisi air tanah yang dipengaruhi oleh perubahan tata guna lahan atau perubahan iklim, serta memahami proses imbuhan, aliran air tanah, dan pencemaran regional pada air tanah. Penempatan sumur ditentukan pada area yang seragam dengan mempertimbangkan kondisi hidrogeologi dan tata guna lahan.
- 2) Sistem pemantauan air tanah sekunder bertujuan untuk perlindungan air tanah. Sistem pemantauan jenis ini berfungsi untuk memantau atau menjaga dampak potensial dari sebaran sumur bor atau pengambilan air tanah untuk memenuhi kebutuhan air baku, infrastruktur perkotaan, serta ekosistem yang bergantung pada suplai air tanah. Penempatan sumur pada area atau fasilitas yang perlu dijaga.
- 3) Sistem pemantauan air tanah tersier berfungsi sebagai peringatan dini bahaya air tanah akibat aktivitas manusia, misalnya pertanian yang intensif, pengambilan air tanah oleh industri, pencemaran air tanah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), aktivitas pertambangan, dan sebagainya. Penempatan sumur pantau pada area lokal untuk memantau naik turunnya gradien hidraulik akibat dari aktivitas tersebut.

Metode penentuan jumlah dan distribusi sumur pantau cukup banyak dikembangkan oleh peneliti dari dalam maupun luar negeri. Hendrayana & Aprimanto (2015) menentukan jaringan sumur pantau berdasarkan penilaian risiko lingkungan air tanah terhadap pemompaan. Metode yang dikembangkan adalah dengan teknik penampalan peta kerentanan air tanah dengan peta tata guna lahan dan peta pola ruang (RTRW). Peta tersebut digunakan untuk menentukan jaringan sumur pantau sekunder.

Swain & Sonenshein (1994) melakukan studi analisis statistik spasial dan temporal untuk jaringan sumur pantau muka air tanah di Florida. Dalam studi ini, desain jaringan sumur pantau dilakukan berdasarkan sebaran nilai informasi yang diambil dari sumur pantau itu sendiri, seperti intrusi air laut, kualitas air tanah, dan muka air tanah. Studi lainnya dilakukan oleh Yang *et al.* (2008) yang membuat desain monitoring muka air tanah dengan metode *ordinary kriging*. Kajian ini dilakukan di CAT Chaiwopu, Cina. Keterbatasan dari kajian ini adalah hanya dapat diterapkan untuk akuifer bebas.

Selain untuk menentukan jumlah dan sebaran sumur pantau, metode geostatistik juga dapat digunakan untuk mengefisiensikan jaringan sumur

pantau eksisting, seperti yang dilakukan oleh Olea, (1984). Dalam studi ini reduksi sumur dilakukan dengan menggunakan jaring - jaring heksagon.

Cieniawski *et al.* (1995) menerapkan metode optimisasi *Genetic Algorithms (GAs)* untuk menentukan lokasi yang optimal dari suatu jaringan sumur pemantauan air tanah di bawah kondisi yang tidak menentu. Tujuan penelitian tersebut mengarah pada memaksimalkan keandalan jaringan serta meminimalisasi daerah terkontaminasi dari pendeteksian awal. Studi penentuan jumlah dan distribusi sumur pantau dapat juga menerapkan metode estimasi spasial *Inverse Distance Weighting (IDW)*, seperti yang diterapkan oleh Riawan (2012) di CAT Bandung. Metode IDW dalam studi tersebut diterapkan dalam menyusun geometri akuifer untuk menentukan zona pemantauan air tanah. Sementara itu, metode IDW dalam riset terkait air tanah lainnya juga dapat digunakan untuk menyusun kontur MAT dalam menentukan arah aliran air tanah (Mito *et al.*, 2011).

DKI Jakarta termasuk wilayah di Indonesia yang memiliki banyak sumur pantau, yaitu 161 sumur pantau. Sumur-sumur tersebut tersebar di wilayah Jakarta Timur sebanyak 30 sumur, serta Jakarta Utara dan Jakarta Selatan masing-masing 28 sumur. Jika ditinjau dari kedalaman saringannya, terdapat 7 sumur pantau dengan kedalaman saringan <40 m bmt, 73 sumur pantau dengan kedalaman saringan antara 40-140 m bmt, 73 sumur pantau dengan kedalaman saringan antara 140-250 m bmt, dan 8 sumur pantau dengan kedalaman saringan >250 m bmt. Berdasarkan analisis kondisi eksisting jaringan sumur pantau CAT Jakarta, dapat diketahui bahwa sumur pantau di wilayah tersebut belum terdistribusi secara spasial dan lateral.

Optimasi sumur pantau dalam studi ini mengacu pada konsep penentuan sistem dan jaringan sumur pantau air tanah yang disusun oleh Tuinhof *et al.* (2006) dan hanya fokus pada penentuan jaringan primer saja dengan menerapkan metode IDW yang dikembangkan oleh Riawan (2012). Tahapan pelaksanaan penelitian ini dituangkan dalam diagram alir pada Gambar 4. Perangkat lunak yang dipergunakan antara lain GMS (*Groundwater Modeling System*) untuk pemodelan geometri akuifer dan ArcGIS untuk menyusun zona pemantauan dan distribusi jaringan sumur pantau yang dihasilkan.

GMS adalah perangkat lunak berbasis Sistem Informasi Geografi (SIG) yang menyediakan berbagai fasilitas terkait seluruh aspek dalam proses pemodelan aliran air tanah (Owen *et al.*, 1996). GMS berinteraksi dengan MODFLOW dan beberapa model air tanah standar lainnya dan

menyediakan tampilan grafis untuk menampilkan dan melakukan kalibrasi hasil model. Fasilitas yang disediakan antara lain pemodelan geometri untuk hidrostratigrafi, formulasi menggunakan metode elemen hingga (*finite element*) atau beda hingga (*finite difference*), dapat menjadi input model untuk aliran air tanah spesifik, proses interpolasi dan analisis geostatistik, serta visualisasi dalam 3 dimensi. Dalam penelitian ini, perangkat lunak GIS tidak digunakan untuk pemodelan aliran air tanah tetapi hanya dimanfaatkan salah satu fungsinya saja yaitu menyusun model geometri akuifer. GIS digunakan untuk merekonstruksi model hidrostratigrafi yang disusun oleh Fachri dkk (2002), sehingga tidak ada proses kalibrasi di dalamnya. Adapun data yang dipersiapkan dalam penyusunan jaringan sumur pantau ini antara lain: peta geologi; batas Cekungan Air Tanah (CAT); hidrostratigrafi yang terdiri dari formasi batuan pembentuk batuan dasar, akuifer, dan akuitar; data *log bor*; dan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI).

Metode ini terdiri dari beberapa tahapan yang perlu dijalankan sebagai berikut.

- 1) Digitasi data *log bor* pada penampang hidrostratigrafi (akuifer dan akuitar)

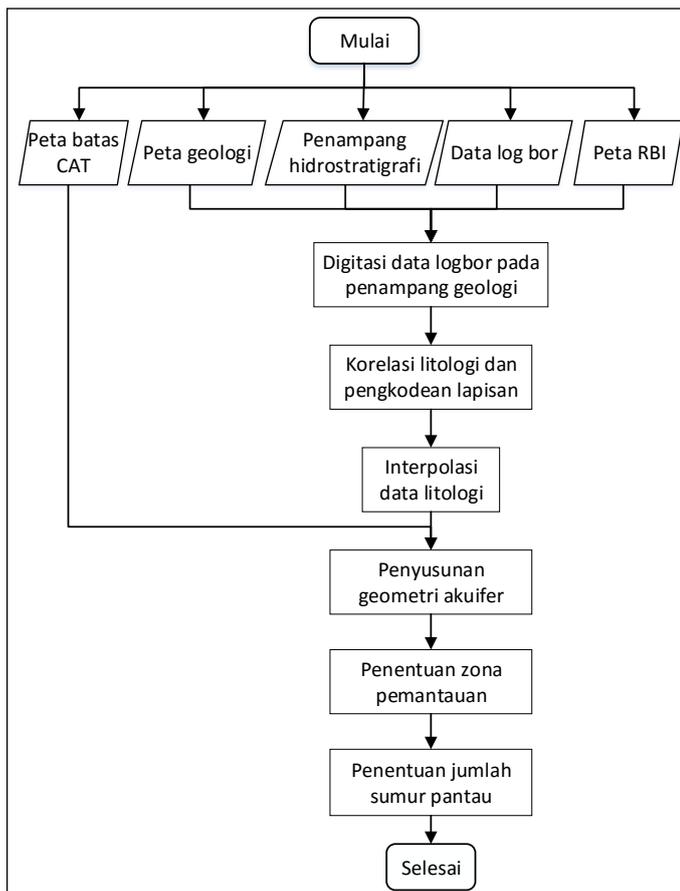
- a) Pemberian nomor identitas data *log bor*
  - b) Digitasi pada penampang sehingga memiliki atribut x (meter), y (meter), z (mdpl), dan karakteristik batuan
  - c) Digitasi data *log bor* tambahan untuk memudahkan proses interpolasi
- 2) Korelasi litologi dan pengkodean lapisan
  - 3) Interpolasi data litologi dengan metode IDW (*Inverse Distance Weighting*) untuk menghasilkan lapisan akuifer dengan formulasi berikut.

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-n}} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- Z<sub>0</sub> = nilai elevasi lapisan yang diperkirakan
- Z<sub>1</sub> = nilai elevasi lapisan pada sumur bor
- d<sub>1</sub> = jarak antar sumur bor ke titik yang diperkirakan nilainya
- d<sub>i</sub> = jarak antara sumur bor dengan sumur bor terdekat
- n = koefisien yang menggambarkan bobot dari jarak antar titiknya

- 4) Penyusunan geometri akuifer
- 5) Penentuan zona pemantauan dan jumlah sumur pantau di setiap zona pemantauan



Gambar 4 Diagram alir penentuan jaringan sumur pantau

## PEMBAHASAN

Penelitian ini mengacu pada klasifikasi sistem pemantauan air tanah oleh Tuinhof *et al.* (2006) yang terbagi menjadi 3 kelompok, yaitu sistem primer untuk mendeteksi perubahan umum dan kondisi alamiah aliran air tanah, sistem sekunder untuk mengontrol perlindungan air tanah dari pengambilan yang berlebihan, dan sistem tersier untuk peringatan dini dampak lingkungan terhadap air tanah secara lokal. Jaringan sumur pantau yang dibangun di CAT Jakarta pada saat ini umumnya dapat dikategorikan sebagai jaringan sekunder, karena penentuan jumlah dan lokasi sumur pantau ditentukan berdasarkan aktivitas pemompaan air tanah. Dalam rangka mendukung sistem monitoring jangka panjang dan kepentingan riset air tanah Jakarta, maka dibutuhkan pula jaringan pemantauan air tanah primer yang dapat mewakili kondisi alamiah air tanah Jakarta.

Sistem air tanah Jakarta terbentuk dari lapisan batuan berumur Kuartar dengan ketebalan berkisar antara 200 – 300 m. Model akuifer yang dibangun dalam penelitian ini, mengacu pada hasil studi hidrostratigrafi yang dilakukan oleh Fachri dkk (2002) yang membagi sistem akuifer CAT Jakarta menjadi 4 zona sebagai berikut.

- 1) Zona I (kelompok akuifer), disusun oleh Formasi Citalang dan Endapan Vulkanik Kuartar. Zona ini diidentifikasi sebagai akuifer karena didominasi oleh litologi yang lulus air, 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, sedangkan ke arah Barat-Timur ketebalannya relatif seragam, dengan ketebalan 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 yaitu batupasir, breksi, konglomerat, dan sisipan batulempung. Zona ini menebal ke arah Utara, sedangkan ke arah Barat-Timur menebal di bagian tengah. Di bagian Selatan, zona ini kontak dengan batupasir dan konglomerat dari Formasi Citalang di atasnya, sehingga diperkirakan daerah tersebut merupakan daerah resapan untuk Zona III melalui aliran

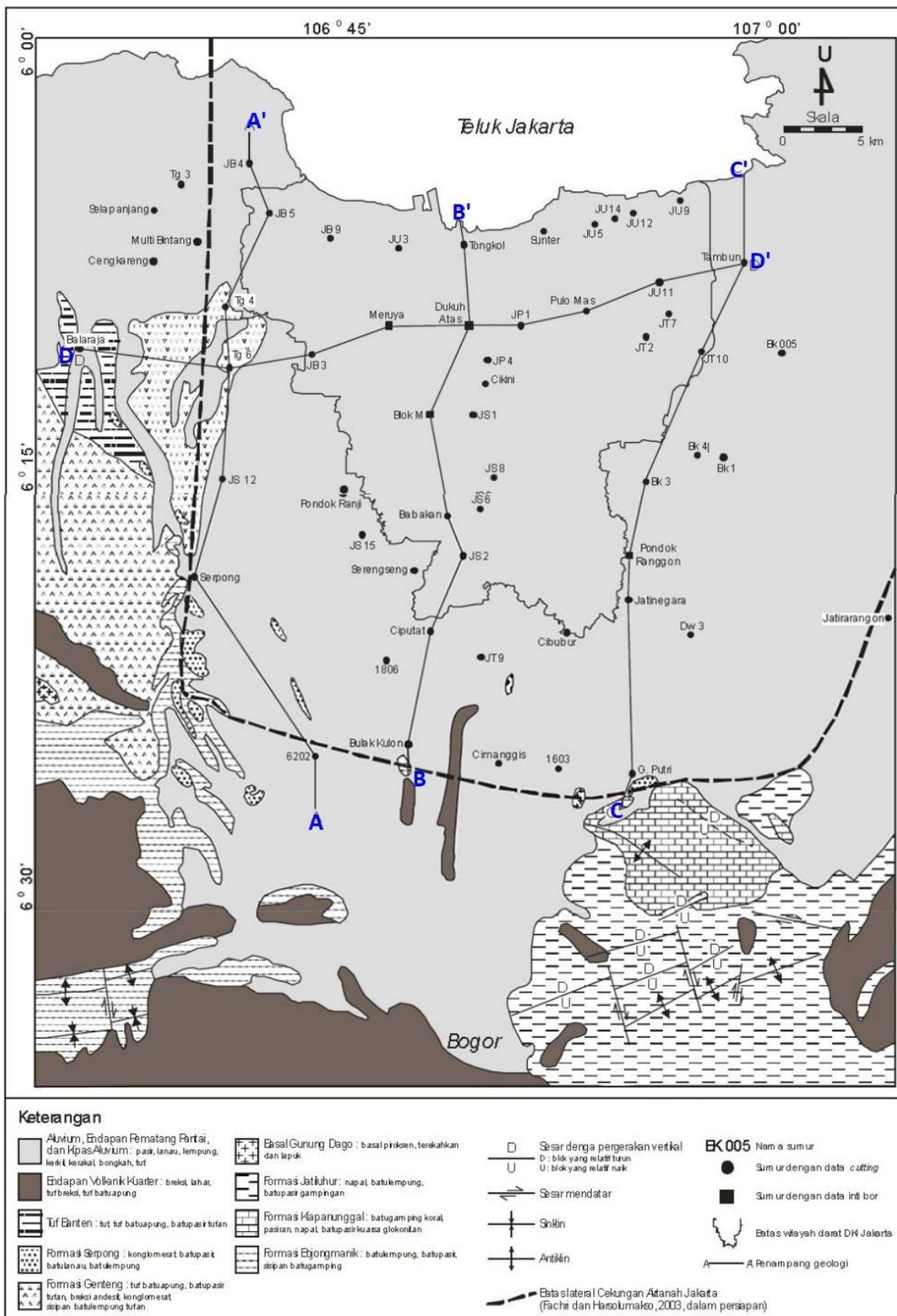
air tanah vertikal. Ketebalan zona ini antara 5-120 m.

- 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.

Menurut Fachri dkk (2002), pembagian sistem akuifer berdasarkan konsep litokorelasi relatif lebih konsisten dalam menggambarkan perubahan permeabilitas sistem akuifer secara vertikal. Zona akuifer memiliki komposisi pasir lebih banyak daripada lempung, sedangkan zona akuitar didominasi oleh lempung. Sumur pantau idealnya dipasang pada lapisan akuifer. Akan tetapi, dengan pertimbangan sistem akuifer CAT Jakarta yang kompleks dan berbentuk *multilayer* serta banyak pula sumur produksi yang memompa air tanah pada zona akuitar, maka dalam studi ini zona akuitar juga perlu dipantau.

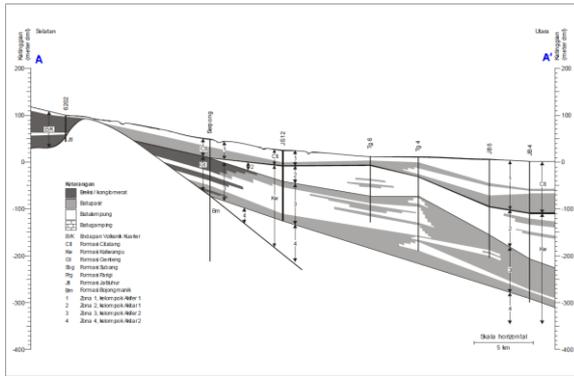
Penelitian ini terbagi menjadi 2 tahap, yaitu penyusunan model geometri akuifer dan penentuan jaringan sumur pantau. Penyusunan model geometri akuifer menjadi sangat penting karena jaringan sumur pantau ditentukan berdasarkan zona - zona pemantauan yang dihasilkan dari *overlay* masing - masing lapisan akuifer dan akuitar dalam model geometri tersebut. Semakin detail model yang dihasilkan, maka akan semakin baik. Akan tetapi, dengan jenis sistem akuifer Jakarta yang rumit, maka model akuifer yang dihasilkan membutuhkan penyederhanaan atau simplifikasi.

Geometri akuifer disusun dengan teknik interpolasi menggunakan metode IDW dengan menggunakan perangkat lunak GMS. Peta dasar yang digunakan dalam penyusunan geometri akuifer adalah peta geologi yang memberikan informasi mengenai litologi dan formasi batuan di CAT Jakarta secara spasial (Gambar 5). Peta geologi yang digunakan merupakan hasil kompilasi Fachri dkk (2002). Dalam peta tersebut ditunjukkan pula lokasi penampang hidrostratigrafi sebagai acuan yang juga disusun oleh Fachri dkk (2002). Penampang tersebut terdiri dari 3 penampang Utara - Selatan yaitu penampang A-A' di bagian Barat, penampang B-B' di bagian tengah, dan penampang C-C' di bagian Timur serta 1 penampang Barat - Timur yaitu penampang D-D' yang membentang di bagian Utara. Seluruh penampang dapat dilihat pada Gambar 6 s.d Gambar 9. Penampang hidrostratigrafi dijadikan acuan dalam proses digitasi data *log bor* untuk memperoleh informasi karakteristik batuan.



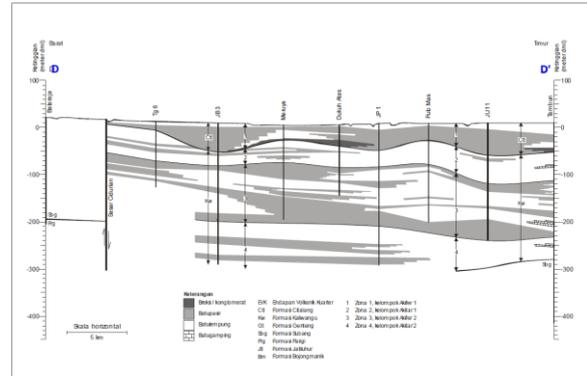
Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 5 Peta geologi CAT Jakarta



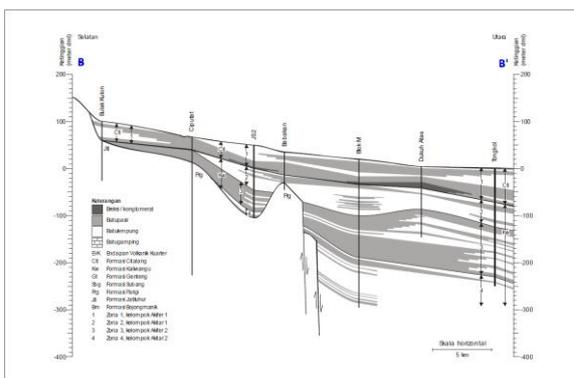
Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 6 Penampang hidrostratigrafi A-A'



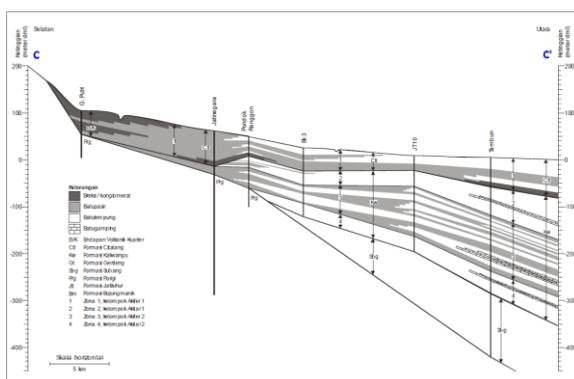
Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 9 Penampang hidrostratigrafi D-D'



Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 7 Penampang hidrostratigrafi B-B'



Sumber: Fachri dkk, 2002

Gambar 8 Penampang hidrostratigrafi C-C'

Data *log bor* merupakan input utama yang paling penting dalam membangun geometri akuifer. Data ini diperoleh dari data pemboran wilayah DKI Jakarta dan sekitarnya serta analisis inti bor. Informasi lainnya yang dibutuhkan antara lain peta topografi dan titik tinggi untuk membangun DEM. Peta dasar yang digunakan adalah peta Rupa Bumi Indonesia (RBI). Peta ini digunakan untuk memberikan informasi ketinggian terhadap muka laut pada data *log bor* saat proses digitasi penampang.

Seluruh proses penyusunan geometri akuifer dan jaringan sumur pantau dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Groundwater Modeling System* (GMS) dan ArcGIS. Berikut ini penjelasan masing – masing tahap pengerjaannya.

1) Digitasi data *log bor* pada penampang hidrostratigrafi

Data *log bor* selain diperoleh dari studi Fachri dkk (2002), juga diperoleh dari berbagai instansi dan studi literatur lainnya. Tahap awal yang dilakukan adalah pemilihan data *log bor* yang digunakan. Pada penelitian ini terpilih sebanyak 27 data *log bor* dengan kualitas data yang baik. Kemudian dilakukan digitasi data *log bor* tersebut terhadap penampang hidrostratigrafi. Setelah dilakukan pengecekan, ternyata dibutuhkan data *log bor* tambahan (*dummy*) untuk mempermudah proses interpolasi. Data *log bor* tambahan ini dihasilkan dari penampang hidrostratigrafi yang digunakan, sehingga jumlah data *log bor* yang dihasilkan dari proses digitasi penampang sebanyak 58 *log bor*.

Jika ditinjau secara spasial, sebanyak 46 data *log bor* termasuk ke dalam wilayah CAT Jakarta, sedangkan data lainnya terletak di luar batas cekungan (Gambar 10). Garis merah merupakan batas CAT Jakarta, sedangkan titik-titik berwarna hitam merupakan sebaran data *log bor* yang digunakan dalam penelitian. Data *log bor* yang terletak di luar area CAT tetap dipergunakan untuk melengkapi informasi akibat kurangnya data *log bor* yang tersedia di bagian Selatan CAT Jakarta.

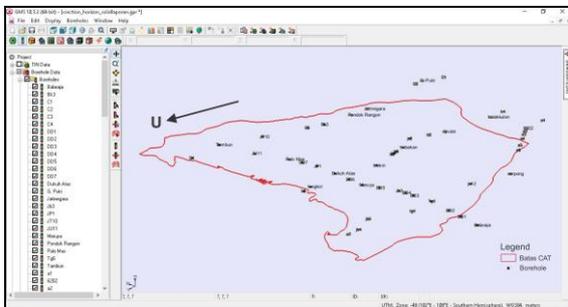
Informasi yang dibutuhkan dari data *log bor* antara lain koordinat, elevasi tiap kedalaman litologi, litologi, dan HGU (*Hydrogeology Unit*). HGU merupakan pengklasifikasian litologi menjadi akuifer atau akuitar berdasarkan karakteristik porositas dan permeabilitasnya. Klasifikasi HGU dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan klasifikasi HGU, terdapat 7 satuan batuan yang menyusun CAT Jakarta antara lain breksi/konglomerat, pasir, batugamping, lempung, tuff, litologi lainnya, dan

lava. Berdasarkan sifat batuan, litologi penyusun akuifer antara lain pasir, batugamping, dan tuff, sedangkan litologi penyusun akuitar antara lain breksi/konglomerat, lempung, lava, dan litologi batuan lainnya.

**Tabel 1** Klasifikasi jenis litologi berdasarkan HGU

No	Litologi	HGU (Hydrogeology Unit)
1	Breksi/ konglomerat	Akuitar
2	Pasir	Akuifer
3	batugamping	Akuifer
4	Lempung	Akuitar
5	Tuf	Akuifer
6	Lainnya	Akuitar
7	Lava	Akuitar

Data *log bor* yang telah melalui proses digitasi, kemudian diplot ke dalam perangkat lunak GMS seperti terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Hal ini dilakukan untuk mengetahui sebaran spasial data *log bor*.



**Gambar 10** Sebaran data *log bor* pada wilayah penelitian

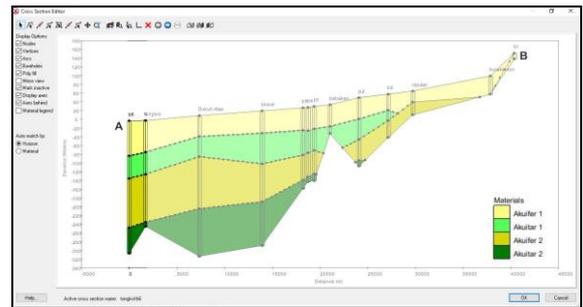


**Gambar 11** Hasil klasifikasi data *log bor* sesuai HGU

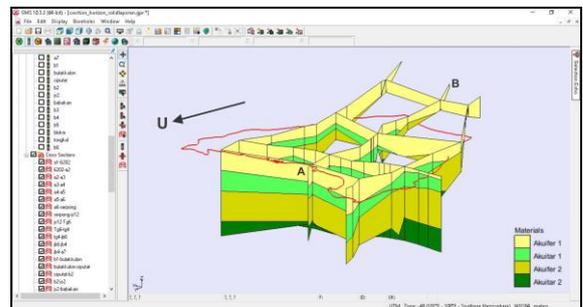
2) Korelasi litologi dan pengkodean lapisan

Pada Gambar 11, data *log bor* sudah diklasifikasikan berdasarkan HGU sesuai dengan Tabel 1. Korelasi litologi berdasarkan HGU dilakukan pada setiap data *log bor* terhadap data *log bor* lainnya untuk memperoleh gambaran spasial penyebaran HGU. Data *log bor* yang berdekatan dikorelasikan dalam penampang 2D berdasarkan sifat fisik HGU (Gambar 12),

kemudian dikorelasikan lagi dengan data *log bor* lainnya hingga membentuk korelasi HGU dalam bentuk 3D (Gambar 13). Penampang A-B pada Gambar 12 merupakan salah satu penampang hidrostratigrafi yang dihasilkan dari model GMS berarah Utara – Selatan. Jika ditinjau dalam bentuk 3D (Gambar 13), penampang tersebut terletak di bagian tengah CAT Jakarta. Pada prinsipnya, semakin banyak data *log bor* yang digunakan, maka akan semakin baik dan detail model geometri akuifer yang dihasilkan. Pada proses korelasi ini dilakukan simplifikasi sehingga terbentuk 4 kelompok, yaitu 2 kelompok akuifer dan 2 kelompok akuitar.



**Gambar 12** Hasil korelasi HGU dalam bentuk 2D

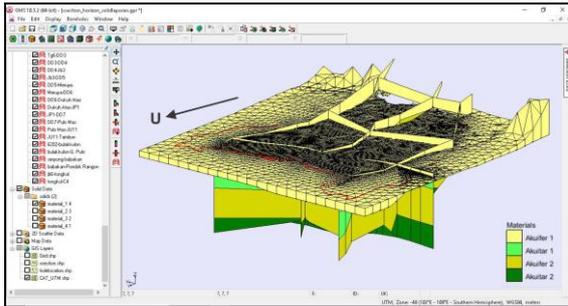


**Gambar 13** Hasil korelasi HGU dalam bentuk 3D

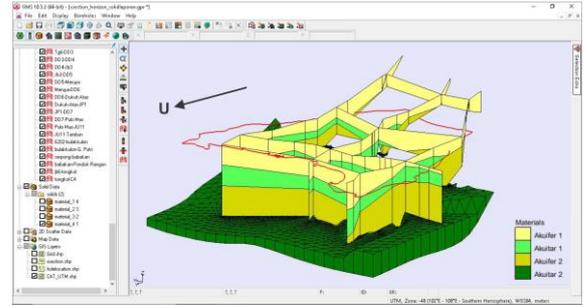
3) Interpolasi data litologi dengan metode IDW

Korelasi litologi yang telah dihasilkan, kemudian diinterpolasikan dengan metode IDW menggunakan persamaan 1 untuk keempat lapisan. Proses interpolasi ini menghasilkan lapisan-lapisan yang berupa kelompok akuifer (kuning) dan kelompok akuitar (hijau). Hasil interpolasi digambarkan dalam bentuk lapisan – lapisan seperti terlihat pada Gambar 14 yang merupakan lapisan untuk kelompok akuifer 1, Gambar 15 untuk kelompok akuifer 2, dan Gambar 16 untuk kelompok akuitar 1, Gambar 17 untuk kelompok akuitar 2. Setiap lapisan perlu dipotong dengan batas CAT, yaitu garis merah yang terlihat pada setiap gambar. Setelah masing – masing lapisan memiliki batas tepi yang sama, baru kemudian dapat disusun menjadi 1 model geometri akuifer.

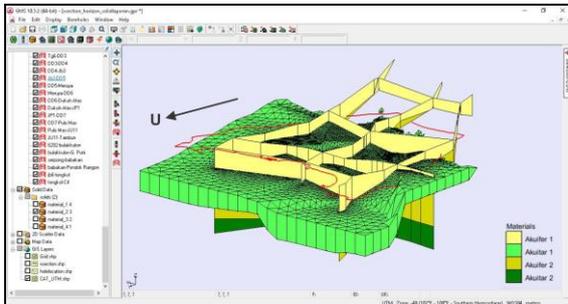
Penentuan Jaringan Sumur Pantau Primer... (Wulan Seizarwati, dkk)



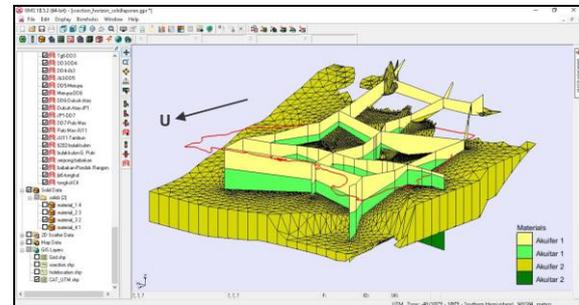
Gambar 14 Interpolasi pada kelompok akuifer 1



Gambar 17 Interpolasi pada kelompok akuiter 2



Gambar 15 Interpolasi pada kelompok akuiter 1



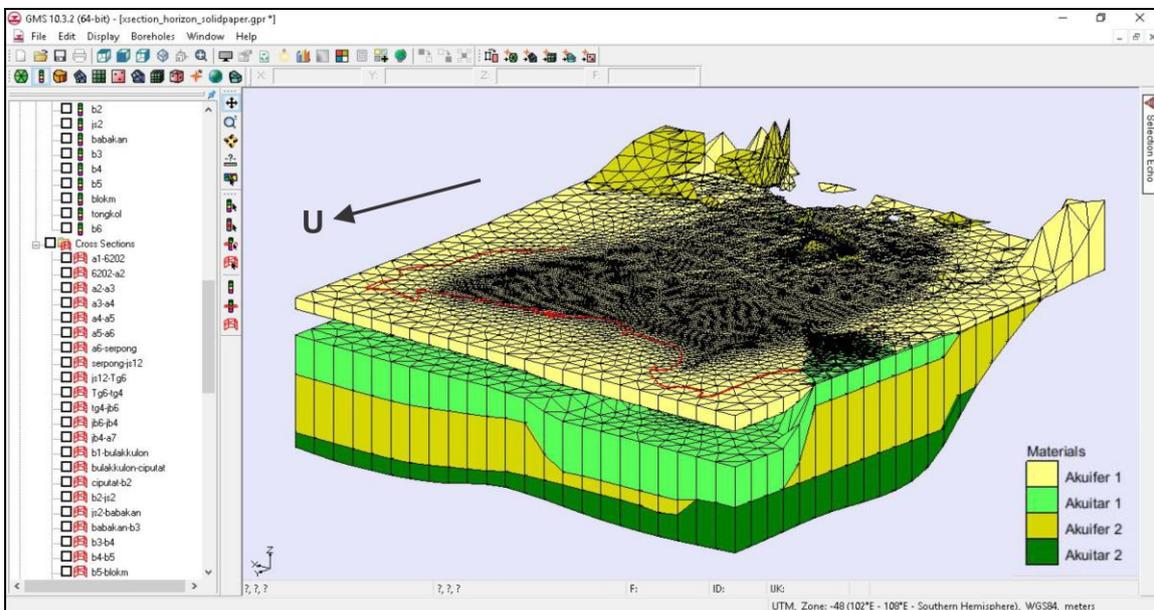
Gambar 16 Interpolasi pada kelompok akuifer 2

4) Penyusunan geometri akuifer 3D

Geometri akuifer terbentuk dari 2 kelompok akuifer dan 2 kelompok akuiter. Bentuk geometri akuifer CAT Jakarta dapat dilihat pada Gambar 18. Luas masing – masing kelompok akuifer dan akuiter tercantum pada Tabel 2. Bentuk dan luas masing-masing kelompok cukup berbeda. Kelompok yang paling luas adalah kelompok akuifer 1 karena memenuhi seluruh wilayah CAT Jakarta. Sementara kelompok lainnya memiliki perbedaan terutama di bagian Selatan CAT Jakarta. Hal ini terjadi karena batuan dasar dari CAT Jakarta menebal ke arah Selatan.

Tabel 2 Luas kelompok akuifer/akuiter CAT Jakarta

Kelompok	Luas (km <sup>2</sup> )
Akuifer 1	1436,64
Akuiter 1	1235,93
Akuifer 2	1353,56
Akuiter 2	998,04



Gambar 18 Geometri akuifer

5) Penentuan zona pemantauan

Tahap selanjutnya adalah penentuan unit terkecil yang perlu dipantau dalam suatu cekungan air tanah. Dengan pemantauan pada unit terkecil diharapkan dapat mengetahui kondisi air tanah aktual dan pengaruh pengambilan air tanah. Unit terkecil tersebut diperoleh dengan cara meng-*overlay* kelompok akuifer/akuitar yang ada, sehingga menghasilkan daerah-daerah irisan. Selanjutnya unit terkecil ini disebut sebagai zona pemantauan. Berdasarkan jumlah akuifer/akuitarnya, zona pemantauan dibagi menjadi 4 seperti tercantum pada Tabel 3.

**Tabel 3** Kategori zona pemantauan

Zona Kelas	Jumlah akuifer/akuitar	Jumlah Sumur Pantau
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4

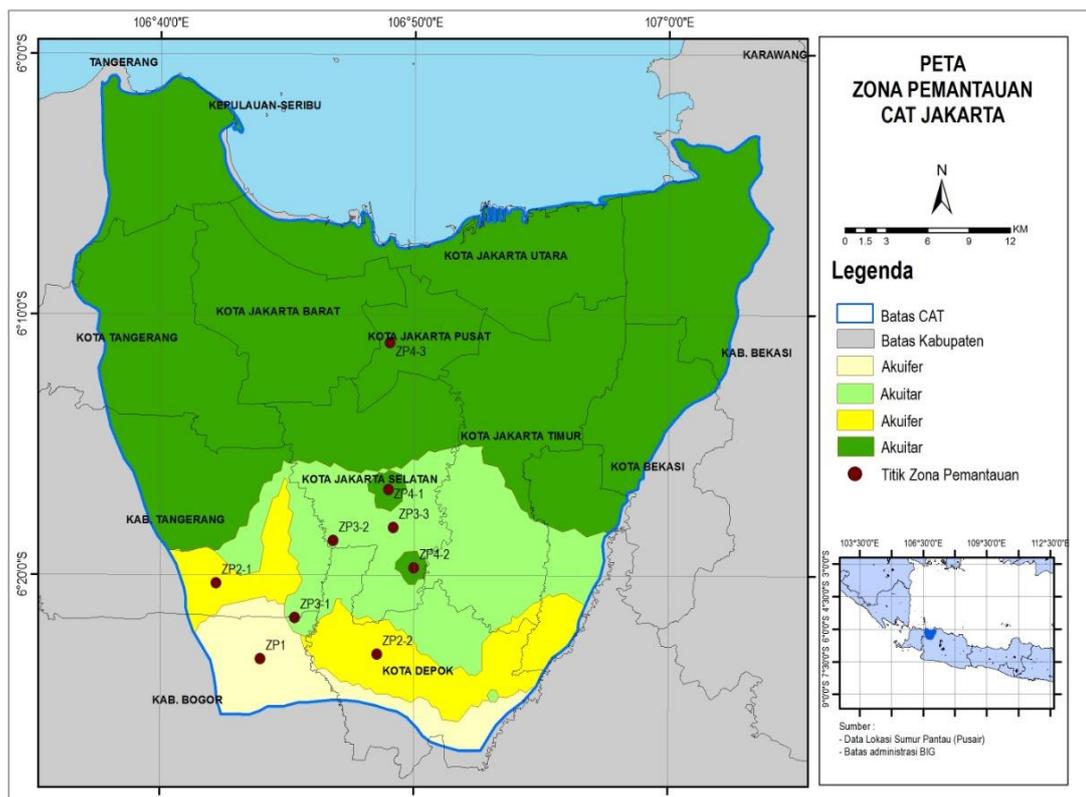
Peta zona pemantauan dapat dilihat pada Gambar 19. Berdasarkan penentuan zona tersebut, CAT Jakarta membutuhkan 9 zona pemantauan seperti dapat dilihat pada Tabel 4. Sehingga total sumur pantau yang dibutuhkan untuk menyusun

sistem jaringan sumur pantau primer di CAT Jakarta adalah sebanyak 26 sumur pantau.

Jika dibandingkan dengan hasil penyusunan jaringan sumur pantau primer di CAT Bandung dengan menerapkan metode yang sama (Riawan 2012), jumlah sumur pantau yang dibutuhkan adalah sebanyak 119 sumur pantau. Perbedaan jumlah yang cukup jauh terjadi karena pada penelitian tersebut CAT Bandung diklasifikasikan menjadi 5 akuifer. CAT Bandung memiliki kompleksitas yang tinggi karena lapisan akuifer yang tersusun dari breksi, konglomerat, batupasir, dan tufa memiliki hubungan jari menjari dengan akuitar yang tersusun dari batu lempung dan batu lanau. Cekungan air tanah tersebut dikelilingi banyak endapan vulkanik dari 3 arah. Selain itu, data input yang digunakan dalam penelitian tersebut juga lebih lengkap terdiri dari 72 sumur bor dan 10 penampang geologi.

**Tabel 4** Zona pemantauan CAT Jakarta

Zona Kelas	Jumlah Zona	Total Sumur Pantau
1	1	1
2	2	4
3	3	9
4	3	12



**Gambar 19** Peta zona pemantauan air tanah primer CAT Jakarta

## KESIMPULAN

Penentuan jaringan sumur pantau primer dengan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dapat diterapkan cukup baik untuk wilayah CAT Jakarta. Berdasarkan geometri akuifer yang disusun, dihasilkan 9 zona pemantauan air tanah di wilayah CAT Jakarta, terdiri dari 1 zona dengan 1 sumur pantau, 2 zona dengan 2 sumur pantau, 3 zona dengan 3 sumur pantau, dan 3 zona dengan 4 sumur pantau. Sehingga total sumur pantau primer yang dibutuhkan untuk memantau air tanah CAT Jakarta sebanyak 26 sumur pantau.

Penyusunan jaringan sumur pantau air tanah ini dapat dijadikan acuan dalam pemilihan sumur-sumur pantau eksisting di CAT Jakarta yang dapat dikelompokkan menjadi jaringan pantau primer serta mengusulkan pemasangan sumur pantau baru untuk melengkapi jaringan yang sudah terbentuk. Studi penentuan jaringan sumur pantau ini baru sampai pada tahap penentuan zona pemantauan dan jumlah sumur pantau primer pada tiap zona tersebut. Evaluasi sistem jaringan sumur pantau eksisting terhadap hasil penelitian ini dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Metode IDW yang diterapkan untuk menentukan jaringan sumur pantau primer memang masih memiliki banyak keterbatasan, mengingat semakin terbatas data yang digunakan maka hasilnya pun menjadi kurang akurat. Penentuan jaringan sumur pantau primer juga dapat dikembangkan dengan metoda lain seperti metode *ordinary krigging* atau *Genetic Algorithms (GAs)*. Penelitian terkait jaringan sumur pantau di DKI Jakarta harus terus dikembangkan. Dengan jumlah pemompaan air tanah yang sangat tinggi, maka jaringan sumur pantau primer ini tetap harus dilengkapi jaringan sumur pantau sekunder yang secara khusus memantau dampak pemompaan air tanah. Selain itu, jaringan sumur pantau primer dapat diterapkan di wilayah lain dengan kondisi air tanah yang dapat dikategorikan masih alami dan jumlah pengambilan air tanah masih sedikit.

## 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)* Tahun 2017. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Puslitbang SDA, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. William M. Putuhena, M.Eng yang memberikan kesempatan kepada tim air tanah Balai Hidrologi dan Tata Air untuk melaksanakan penelitian terkait sistem monitoring air tanah Jakarta dan

Bapak Edi Riawan, S.Si, MT yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan dan bimbingan selama pelaksanaan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barron, O. V., Barr, A. D., & Donn, M. J. (2013). Effect of Urbanization on the Water Balance of a Catchment with Shallow Groundwater. *Journal of Hydrology*, 485, 162–176. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.027>
- Chaudhuri, S., & Ale, S. (2014). Long-Term (1930–2010) Trends in Groundwater Levels in Texas: Influences of Soils, Landcover and Water Use. *Science of the Total Environment*, 490, 379–390. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.013>
- Cieniawski, S. E., Eheart, J. W., & Ranjithan, S. (1995). Using Genetic Algorithms to Solve a Multiobjective Groundwater Monitoring Problem. *Water Resources Research*, 31(2), 399–409.
- Eshtawi, T., Evers, M., Tischbein, B., & Diekkrüger, B. (2016). Integrated Hydrologic Modeling as a Key for Sustainable Urban Water Resources Planning. *Water Research*, 101, 411–428. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.061>
- Fachri, M., Djuhaeni, Hutasoit, L. M., & Ramdhan, A. M. (2002). Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan Airtanah Jakarta. *Buletin Geologi*, 34 (3).
- Fourier, F., Dennis, I., Dennis, R., Veltman, S., Titus, R., & Parsons, R. (2011). *The Groundwater Dictionary*. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry, Republic of South Africa.
- Hendrayana, H., & Aprimanto, B. (2015). Penentuan Jaringan Sumur Pantau Berdasarkan Penilaian Risiko Terhadap Pemompaan Air Tanah di CAT Yogyakarta-Sleman. *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan Ke-8*, 790–802.
- Hosseini, M., & Kerachian, R. (2017). A Data Fusion-based Methodology for Optimal Redesign of Groundwater Monitoring Networks. *Journal of Hydrology*, 552, 267–282. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.046>
- Lubis, R. F., Assegaf, A., & Kagabu, M. (2015). Fluktuasi Air Tanah Jakarta. In R. M. Delinom (Ed.), *Ancaman Bawah Permukaan Jakarta: Tak Terlihat, Tak Terpikirkan, dan Tak Terduga* (p. 132). Jakarta: LIPI Press.

- Maathius, H., Young, R. ., Adi, S., & Prawiradisastra, S. (1996). *Final Report: Development of Groundwater Management Strategies in the Coastal Region of Jakarta*.
- Mito, Y., Ismail, M. A. M., & Yamamoto, T. (2011). Multidimensional Scaling and Inverse Distance Weighting Transform for Image Processing of Hydrogeological Structure in Rock Mass. *Journal of Hydrology*, 411, 25–36. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.018>
- Olea, R. A. (1984). Sampling Design Optimization for Spatial Functions. *Mathematical Geology*, 16(4), 369–392.
- Owen, S. J., Jones, N. L., & Holland, J. P. (1996). A Comprehensive Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow and Transport. *Engineering with Computers*, 12, 235–242.
- Pandey, V. P., Shrestha, S., Chapagain, S. K., & Kazama, F. (2011). a Framework for Measuring Groundwater Sustainability. *Environmental Science & Policy*, 14, 396–407. <https://doi.org/doi:10.1016/j.envsci.2011.03.008>
- Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 121 Tahun 2015 tentang Pengusahaan Sumber Daya Air*. Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia.
- Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2017*. Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia.
- Riawan, E. (2012). *Penentuan Jumlah dan Distribusi Spasial Sumur Pantau Berdasarkan Geometri Akifer dengan Metode Estimasi Spasial Inverse Distance Weighting Studi Kasus CAT Bandung (Tidak Dipublikasi)*. Institut Teknologi Bandung.
- Rosen, M. R. (2004). Groundwater Monitoring Networks. In *Groundwater* (Vol II). Nevada: US Geological Survey.
- Santosa, L. W. (2001). Hidrostratigrafi dan Hidrokimia Air Tanah di Sekitar Rowo Jombor Kecamatan Bayat-Klaten. *Majalah Geografi Indonesia*, 15(2), 165–184.
- Seizarwati, W., Syahidah, M., & Rengganis, H. (2017). Penurunan Kapasitas Imbuhan Air Tanah CAT Jakarta Menggunakan Metode Neraca Air untuk Daerah Urban. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 27(1), 27–37.
- Shaad, K., & Burlando, P. (2018). Monitoring and Modelling of Shallow Groundwater Dynamics in Urban Context: the Case Study of Jakarta. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.005>
- Sreekanth, J., Lau, H., & Pagendam, D. (2017). Design of Optimal Groundwater Monitoring Well Network Using Stochastic Modeling and Reduced-Rank Spatial Prediction. *Water Resources Research*, 53(8), 6821–6840.
- Swain, E. D., & Sonenshein, R. S. (1994). Spatial and Temporal Statistical Analysis of a Ground-Water Level Network, Broward County, Florida. In *Water Resources Investigations Report 94-4076*. Tallahassee, Florida: U.S.Geological Survey.
- Taylor, C. J., & Alley, W. M. (2001). *Groundwater Level Monitoring and the Importance of Log Term Water Level Data*. Denver, Colorado: U.S.Geological Survey.
- Tremayne, A. (2010). *Changes to Water Balance due to Urbanization*. University of Western Australia.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduno, H., & Nanni, M. (2006). Groundwater Monitoring Requirements for Managing Aquifer Response and Quality Threats. In *Sustainable Groundwater Management Concepts & Tools*. GW MATE.
- Wu, P., & Tan, M. (2012). Challenges for Sustainable Urbanization: a Case Study of Water Shortage and Water Environment Changes in Shandong, China. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 919–927. <https://doi.org/doi:10.1016/j.proenv.2012.01.085>
- Yang, F. G., Cao, S. Y., Liu, X. N., & Yang, K. J. (2008). Design of Groundwater Level Monitoring Network with Ordinary Kriging. *Journal of Hydrodynamics, Seri B*, 20(3), 339–346.