

PEMANFAATAN TEKNIK GEOLISTRIK UNTUK MENDETEKSI PERSEBARAN AIR TANAH ASIN PADA AKUIFER BEBAS DI KOTA SURABAYA

Ig. Setyawan Purnama
Budi Sulaswono

Jurusan Geografi Fisik Fakultas Geografi UGM
Telpon +62.274.649.2332

INTISARI

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui persebaran airtanah asin di Kota Surabaya, menganalisis faktor penyebabnya dan mencari kemungkinan ditemukannya airtanah tawar pada akuifer tertekan. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan pendugaan geolistrik pada tujuh penampang dengan masing-masing penampang terdiri atas dua hingga tiga titik pendugaan. Untuk menganalisis hasil pendugaan, data tahanan jenis hasil pendugaan lapangan diinterpretasi dengan Program Schlumberger O'Neil. Hasil interpretasi dapat ditentukan kedalaman dan ketebalan lapisan airtanah beserta sifat-sifatnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa di Kota Surabaya telah terdeteksi adanya airtanah asin dan airtanah payau, dengan jarak dari garis pantai dan ketebalan lapisan yang bervariasi. Faktor penyebab adanya airtanah asin dan airtanah payau tersebut adalah air fosil (connate water) Hasil lain dari penelitian ini adalah bahwa hingga kedalaman 150 meter dari permukaan tanah, tidak ditemukan akuifer tertekan yang mengandung airtanah tawar.

Kata kunci: teknik geolistrik, airtanah asin

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Air mempunyai peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Di satu sisi, dengan adanya pertumbuhan penduduk dan kegiatan ekonomi, kebutuhan air semakin meningkat, sedangkan di sisi lain jumlah dan kualitasnya semakin menurun. Saat ini, di hampir sebagian besar negara-negara di dunia menghadapi permasalahan sumber air. Di samping sulitnya mendapatkan air dengan kualitas yang memenuhi persyaratan, jumlahnya juga sangat terbatas.

Di Indonesia, permasalahan sumberdaya air dapat dibagi menjadi tiga hal pokok yaitu masalah kuantitas, masalah kualitas dan masalah distribusi air (Kantor

Menteri Negara Lingkungan Hidup, 1998). Berdasarkan perbandingan ketersediaan dan kebutuhannya, ketersediaan air di Pulau Jawa, Bali, Nusa Tenggara Barat dan Sulawesi Selatan telah mengalami tingkat kritis. Pada tahun 2000, kebutuhan air di Pulau Jawa telah mencapai 153% dari ketersediaannya. Di Pulau Bali mencapai 73%, sedangkan di Nusa Tenggara Barat mencapai 58%. Ironisnya justru pulau-pulau dengan potensi air tinggi seperti Papua dan Kalimantan, kebutuhan airnya sangat rendah.

Dari segi kualitas, saat ini telah terjadi penurunan kualitas air yang cukup signifikan di beberapa kota besar. Di daerah perkotaan, limbah domestik dan industri telah menyebabkan penurunan kualitas air sungai di bagian hilir seperti Sungai Ciliwung di Jakarta, Sungai Garang di Semarang, Sungai Brantas, Sungai Surabaya dan Porong di sekitar Surabaya serta Sungai Musi di Palembang (Saeni, 1989). Pencemaran akibat limbah domestik dan industri bukan saja terjadi pada air sungai, tetapi juga terjadi pada airtanah. Selain oleh limbah domestik dan industri, pencemaran air juga dapat disebabkan oleh airtanah asin yang berada di daratan. Keberadaan airtanah asin ini telah menjadi permasalahan serius di kota-kota yang terletak di daerah pantai. Adanya airtanah asin menyebabkan peningkatan kadar salinitas pada air sumur, sehingga air sumur berasa asin.

Surabaya sebagai kota besar kedua di Indonesia terletak di daerah pantai yang merupakan delta Sungai Brantas. Sudah sejak lama penduduk mengeluhkan sulitnya mendapatkan air bersih untuk air minum. Tiap kali membuat sumur gali, yang didapatkan adalah airtanah yang rasanya asin. Upaya pembuatan sumur bor dengan kedalaman lebih dari 50 meter, seringkali juga tidak mendapatkan hasil sesuai yang diharapkan. Di beberapa lokasi bahkan sama sekali tidak mendapatkan air, padahal telah banyak biaya yang dikeluarkan untuk melakukan pemboran.

Tujuan Penelitian

1. mengetahui persebaran airtanah asin di daerah penelitian;
2. menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan terdapatnya airtanah asin di daerah penelitian;
3. mencari kemungkinan ditemukannya airtanah tawar pada akuifer tertekan.

Tinjauan Pustaka

Geolistrik merupakan metode penyelidikan airtanah dari permukaan bumi yang paling populer dalam bidang hidrogeologi (Todd, 1980). Kepopuleran ini disebabkan peralatan geolistrik mudah dibawa, mudah dioperasikan, waktu pengukuran cepat dengan biaya murah serta akurasi data yang dapat diandalkan. Pada dasarnya geolistrik merupakan alat untuk mendeteksi perlapisan batuan di bawah permukaan bumi. Prinsip utamanya adalah bahwa tiap perlapisan batuan mempunyai tahanan yang berbeda-beda bila dialiri listrik yang disebut tahanan jenis (*resistivity*). Hasil pendugaan pada berbagai jenis batuan menunjukkan adanya kisaran nilai tahanan jenis yang bervariasi. Sebagai contoh grafit mempunyai tahanan jenis $10^{-6} \Omega\text{m}$, sedangkan kuarsit mempunyai tahanan jenis lebih dari 10^{12}

Menteri Negara Lingkungan Hidup, 1998). Berdasarkan perbandingan ketersediaan dan kebutuhannya, ketersediaan air di Pulau Jawa, Bali, Nusa Tenggara Barat dan Sulawesi Selatan telah mengalami tingkat kritis. Pada tahun 2000, kebutuhan air di Pulau Jawa telah mencapai 153% dari ketersediaannya. Di Pulau Bali mencapai 73%, sedangkan di Nusa Tenggara Barat mencapai 58%. Ironisnya justru pulau-pulau dengan potensi air tinggi seperti Papua dan Kalimantan, kebutuhan airnya sangat rendah.

Dari segi kualitas, saat ini telah terjadi penurunan kualitas air yang cukup signifikan di beberapa kota besar. Di daerah perkotaan, limbah domestik dan industri telah menyebabkan penurunan kualitas air sungai di bagian hilir seperti Sungai Ciliwung di Jakarta, Sungai Garang di Semarang, Sungai Brantas, Sungai Surabaya dan Porong di sekitar Surabaya serta Sungai Musi di Palembang (Saeni, 1989). Pencemaran akibat limbah domestik dan industri bukan saja terjadi pada air sungai, tetapi juga terjadi pada airtanah. Selain oleh limbah domestik dan industri, pencemaran air juga dapat disebabkan oleh airtanah asin yang berada di daratan. Keberadaan airtanah asin ini telah menjadi permasalahan serius di kota-kota yang terletak di daerah pantai. Adanya airtanah asin menyebabkan peningkatan kadar salinitas pada air sumur, sehingga air sumur berasa asin.

Surabaya sebagai kota besar kedua di Indonesia terletak di daerah pantai yang merupakan delta Sungai Brantas. Sudah sejak lama penduduk mengeluhkan sulitnya mendapatkan air bersih untuk air minum. Tiap kali membuat sumur gali, yang didapatkan adalah airtanah yang rasanya asin. Upaya pembuatan sumur bor dengan kedalaman lebih dari 50 meter, seringkali juga tidak mendapatkan hasil sesuai yang diharapkan. Di beberapa lokasi bahkan sama sekali tidak mendapatkan air, padahal telah banyak biaya yang dikeluarkan untuk melakukan pemboran.

Tujuan Penelitian

1. mengetahui persebaran airtanah asin di daerah penelitian;
2. menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan terdapatnya airtanah asin di daerah penelitian;
3. mencari kemungkinan ditemukannya airtanah tawar pada akuifer tertekan.

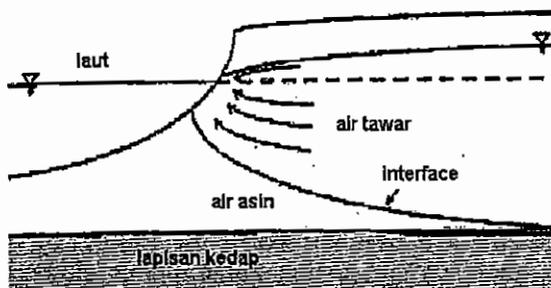
Tinjauan Pustaka

Geolistrik merupakan metode penyelidikan airtanah dari permukaan bumi yang paling populer dalam bidang hidrogeologi (Todd, 1980). Kepopuleran ini disebabkan peralatan geolistrik mudah dibawa, mudah dioperasikan, waktu pengukuran cepat dengan biaya murah serta akurasi data yang dapat diandalkan. Pada dasarnya geolistrik merupakan alat untuk mendeteksi perlapisan batuan di bawah permukaan bumi. Prinsip utamanya adalah bahwa tiap perlapisan batuan mempunyai tahanan yang berbeda-beda bila dialiri listrik yang disebut tahanan jenis (*resistivity*). Hasil pendugaan pada berbagai jenis batuan menunjukkan adanya kisaran nilai tahanan jenis yang bervariasi. Sebagai contoh grafit mempunyai tahanan jenis $10^{-6} \Omega\text{m}$, sedangkan kuarsit mempunyai tahanan jenis lebih dari 10^{12}

Ωm (Zohdy *et al.*, 1980). Todd (1980) menyatakan bahwa secara umum batuan metamorf mempunyai tahanan jenis antara 10^2 hingga $10^8 \Omega\text{m}$, sedangkan pada batuan sedimen dan pada bahan lepas (pasir dan kerikil) bervariasi dari 1 hingga $10^4 \Omega\text{m}$.

Selain oleh jenis material, ternyata pada kebanyakan batuan nilai tahanan jenis lebih banyak ditentukan oleh porositas, kandungan air serta kualitas airnya. Pada akuifer yang tersusun oleh bahan lepas, nilai tahanan jenis akan semakin menurun sesuai dengan tingkat kejenuhan dan keasinan airtanahnya. Adanya lapisan lempung juga akan semakin menurunkan (hingga mencapai sekitar $2 \Omega\text{m}$) nilai tahanan jenis, karena sifatnya yang sangat menghantarkan listrik. Menurut Zohdy *et al.* (1980), tahanan jenis pada batuan sedimen seperti misalnya pada lempung atau pasir yang jenuh air asin nilainya kurang dari $1 \Omega\text{m}$. Pada batuan basal serta pasir dan kerikil yang kering, nilai tahanan jenisnya dapat mencapai ribuan Ωm , sedangkan untuk pasir dan kerikil yang jenuh air tawar tahanan jenisnya antara 15 dan $600 \Omega\text{m}$. Diantara berbagai penyebab keasinan airtanah di daratan, intrusi air laut dan air fosil merupakan penyebab yang paling dominan. Menurut UNESCO (1991), intrusi air laut merupakan suatu fenomena yang dapat terjadi pada semua wilayah pertemuan antara airtanah tawar dan air laut.

Mintakat pertemuan air asin dari laut dan air tawar disebut *interface*. Daerah di bawah *interface* merupakan air asin, sedangkan di atasnya airtanah tawar (Gambar 1). Makin kuat desakan airtanah tawar dari daratan terhadap air laut, maka *interface* akan makin ke arah laut atau sangat dalam, sebaliknya bila desakan airtanah berkurang, air laut akan mendesak ke darat dan *interface* akan makin dangkal. Menurut Polo dan Ramis (1983), pergerakan kedua jenis zat cair ini pada *interface* dapat diketahui dengan simulasi menggunakan model matematika. Di samping terjadi pergerakan antar zat cair, pada mintakat ini juga terjadi beberapa proses kimia. Sering terjadi pertukaran ion antara Ca^{2+} dan Mg^{2+} serta antara Ca^{2+} dan Na^+ , demikian pula dengan terjadinya reduksi sulfat (Goldenberg *et al.*, 1983). Kedalaman *interface* dapat diperkirakan dengan persamaan Ghyben-Herzberg dan melalui pendugaan geolistrik. Secara matematis persamaan Ghyben-Herzberg dapat ditulis sebagai berikut (Bouwer, 1978; Todd, 1980; Fetter, 1988):



$$Z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \dots (1)$$

Gambar 1. Keadaan air asin dan air tawar pada *interface* (FAO, 1997)

dengan h adalah elevasi muka airtanah di atas muka air laut, z adalah kedalaman *interface* dari muka air laut, ρ_s adalah densitas air asin ($1,025 \text{ g/cm}^3$) dan ρ_f adalah densitas air tawar ($1,000 \text{ g/cm}^3$). Berdasarkan persamaan tersebut, kedalaman *interface* di suatu akuifer pantai dapat diperkirakan sebesar $40 h$ (Beukeboom, 1978; Wanielista *et al.*, 1997).

Kedalaman *interface* juga dapat ditentukan dengan pendugaan geolistrik. Dengan teknik ini dapat ditentukan stratigrafi batuan dan nilai tahanan jenis airtanah yang terdapat di dalamnya. Air tawar mempunyai nilai tahanan jenis yang berbeda dibandingkan dengan air asin.

Penelitian airtanah asin telah dilakukan beberapa peneliti di beberapa daerah dan negara. FAO (1997), menyatakan bahwa adanya airtanah asin di daratan merupakan fenomena umum yang terjadi pada daerah-daerah yang terletak di wilayah pantai. Dalam laporannya dinyatakan bahwa fenomena airtanah asin terjadi pada banyak kota di dunia seperti daerah Damsarkho dan Akkar di Suriah, Siwa di Mesir, Beirut di Libanon serta di Siprus, Tunisia, dan Turki. Untuk wilayah Asia Tenggara, Bangkok dan Jakarta merupakan dua kota yang wilayahnya banyak didapatkan airtanah asin, akibat intrusi air laut (Soenarto 1988). Di Bangkok intrusi terjadi dengan kecepatan 50 meter/tahun, sedangkan di Jakarta 3 hingga 50 meter/tahun. Menurut Kodoatie (1996), pada tahun 1988 intrusi air laut di Jakarta telah terdeteksi sejauh 2 hingga 3 kilometer dari garis pantai.

Kerangka Pemikiran

Akibat perkembangan sektor perindustrian, banyak penduduk dari daerah sekitar Surabaya ataupun daerah-daerah lainnya yang masuk ke kota ini sebagai pekerja industri maupun sektor lainnya. Akibatnya terjadi peningkatan jumlah penduduk, yang menuntut tersedianya sarana dan prasarana hidup, diantaranya adalah kebutuhan akan air bersih.

Di sisi lain terjadi pemanfaatan lahan yang semakin intensif. Lahan yang semula kosong diubah peruntukannya menjadi permukiman ataupun bangunan industri. Akibatnya tanah terbuka sebagai tempat peresapan air hujan ke dalam tanah berkurang, sehingga pasokan airtanah juga berkurang. Fenomena ini mengakibatkan berbagai permasalahan. Pada tahap awal terjadi penurunan muka airtanah pada sumur-sumur penduduk, sehingga volume airtanah berkurang. Akibatnya tekanan air tawar dalam tanah berkurang, dan air asin dari laut mengalami intrusi ke daratan. Meskipun demikian faktor lingkungan seperti karakteristik pantai dan batuan penyusun, kekuatan aliran airtanah ke laut dan fluktuasi airtanah di daerah pantai dapat pula mempermudah terjadinya intrusi air laut ke dalam akuifer.

Intrusi air laut bukanlah satu-satunya penyebab keasinan airtanah. Adanya airtanah asin dapat pula disebabkan oleh adanya air fosil, evaporasi dari laguna dan daerah tertutup lainnya, air dari kubah garam, pancaran air laut oleh angin, pasang surut dan badai, air dari pelarutan batuan evaporit, aliran balik air dari daerah irigasi serta pencemaran dari limbah domestik dan pertanian. Fenomena ini

dengan h adalah elevasi muka airtanah di atas muka air laut, z adalah kedalaman *interface* dari muka air laut, ρ_s adalah densitas air asin ($1,025 \text{ g/cm}^3$) dan ρ_f adalah densitas air tawar ($1,000 \text{ g/cm}^3$). Berdasarkan persamaan tersebut, kedalaman *interface* di suatu akuifer pantai dapat diperkirakan sebesar $40 h$ (Beukeboom, 1978; Wanielista *et al.*, 1997).

Kedalaman *interface* juga dapat ditentukan dengan pendugaan geolistrik. Dengan teknik ini dapat ditentukan stratigrafi batuan dan nilai tahanan jenis airtanah yang terdapat di dalamnya. Air tawar mempunyai nilai tahanan jenis yang berbeda dibandingkan dengan air asin.

Penelitian airtanah asin telah dilakukan beberapa peneliti di beberapa daerah dan negara. FAO (1997), menyatakan bahwa adanya airtanah asin di daratan merupakan fenomena umum yang terjadi pada daerah-daerah yang terletak di wilayah pantai. Dalam laporannya dinyatakan bahwa fenomena airtanah asin terjadi pada banyak kota di dunia seperti daerah Damsarkho dan Akkar di Suriah, Siwa di Mesir, Beirut di Libanon serta di Siprus, Tunisia, dan Turki. Untuk wilayah Asia Tenggara, Bangkok dan Jakarta merupakan dua kota yang wilayahnya banyak didapatkan airtanah asin, akibat intrusi air laut (Soenarto 1988). Di Bangkok intrusi terjadi dengan kecepatan 50 meter/tahun, sedangkan di Jakarta 3 hingga 50 meter/tahun. Menurut Kodoatie (1996), pada tahun 1988 intrusi air laut di Jakarta telah terdeteksi sejauh 2 hingga 3 kilometer dari garis pantai.

Kerangka Pemikiran

Akibat perkembangan sektor perindustrian, banyak penduduk dari daerah sekitar Surabaya ataupun daerah-daerah lainnya yang masuk ke kota ini sebagai pekerja industri maupun sektor lainnya. Akibatnya terjadi peningkatan jumlah penduduk, yang menuntut tersedianya sarana dan prasarana hidup, diantaranya adalah kebutuhan akan air bersih.

Di sisi lain terjadi pemanfaatan lahan yang semakin intensif. Lahan yang semula kosong diubah peruntukannya menjadi permukiman ataupun bangunan industri. Akibatnya tanah terbuka sebagai tempat peresapan air hujan ke dalam tanah berkurang, sehingga pasokan airtanah juga berkurang. Fenomena ini mengakibatkan berbagai permasalahan. Pada tahap awal terjadi penurunan muka airtanah pada sumur-sumur penduduk, sehingga volume airtanah berkurang. Akibatnya tekanan air tawar dalam tanah berkurang, dan air asin dari laut mengalami intrusi ke daratan. Meskipun demikian faktor lingkungan seperti karakteristik pantai dan batuan penyusun, kekuatan aliran airtanah ke laut dan fluktuasi airtanah di daerah pantai dapat pula mempermudah terjadinya intrusi air laut ke dalam akuifer.

Intrusi air laut bukanlah satu-satunya penyebab keasinan airtanah. Adanya airtanah asin dapat pula disebabkan oleh adanya air fosil, evaporasi dari laguna dan daerah tertutup lainnya, air dari kubah garam, pancaran air laut oleh angin, pasang surut dan badai, air dari pelarutan batuan evaporit, aliran balik air dari daerah irigasi serta pencemaran dari limbah domestik dan pertanian. Fenomena ini

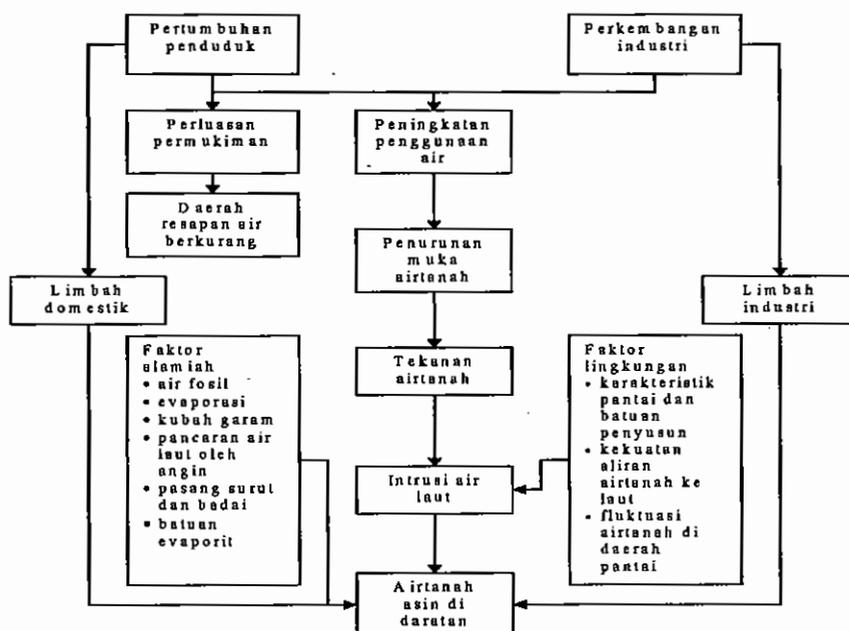
secara sederhana digambarkan dalam diagram alir kerangka pemikiran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

METODE PENELITIAN

Teknik Penelitian

Daerah penelitian dibagi menjadi tujuh penampang pendugaan, dengan masing-masing penampang terdiri atas dua atau tiga titik pendugaan tergantung dari variasi litologinya (Gambar 3). Teknik geolistrik yang digunakan adalah rangkaian elektrode menurut Schlumberger yaitu suatu rangkaian yang digunakan untuk mengetahui kedalaman dan ketebalan lapisan ke arah dalam atau vertikal.

Prinsip dari susunan elektrode Schlumberger ini adalah dengan mengalirkan arus listrik searah ke dalam tanah melalui dua buah elektrode arus yang ditancapkan ke dalam tanah. Besarnya kuat arus yang mengalir ke dalam tanah diukur dengan amperemeter. Perubahan potensial tanah (ΔV) akibat arus listrik tersebut diukur melalui dua buah elektrode potensial yang ditancapkan diantara kedua elektrode arus. Susunan elektrode arus dan elektrode potensial diubah-ubah mulai jarak 1,5 meter hingga 300 meter. Pada jarak elektrode arus yang pendek berarti tahanan jenis yang terukur hanya pada permukaan tanah saja (sedalam $\frac{1}{2}$ jarak elektrode arus). Semakin jauh jarak elektrode arus berarti tahanan jenis lapisan tanah yang terukur juga akan semakin dalam.



Gambar 2. Diagram Alir Kerangka Pemikiran

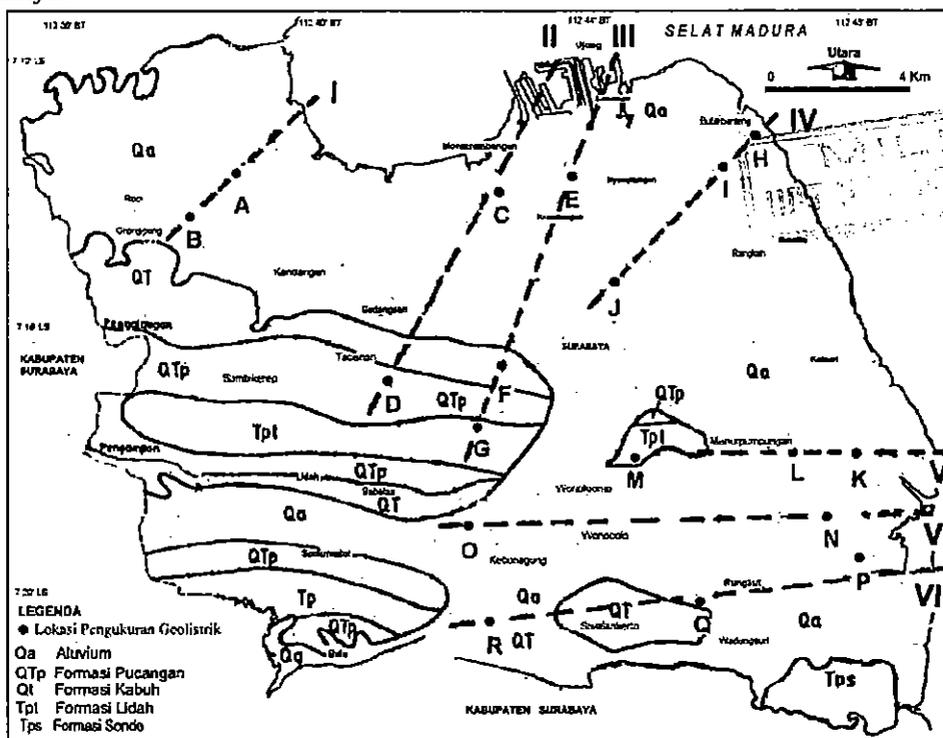
Analisis Data

Hasil pendugaan geolistrik adalah data kuat arus dan perubahan potensial. Untuk menentukan harga tahanan jenisnya, dihitung dengan rumus (Zohdy 1980) :

$$R = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots(2)$$

dengan R adalah tahanan jenis (*resistivity*), I adalah kuat arus searah yang dialirkan ke dalam tanah, ΔV adalah perubahan potensial yang terjadi dan K adalah konstanta yang tergantung pada jarak elektrode.

Selanjutnya untuk melakukan interpretasi hasil pengukuran, data hasil pengukuran lapangan yang berupa jarak elektrode arus ½ L (dalam meter) dan harga tahanan jenis (dalam Ωm) dimasukkan dalam program Schlumberger O’Neil. Dari hasil pemrograman dapat ditentukan lapisan-lapisan airtanah serta sifat-sifatnya.



Gambar 3. Peta Geologi Daerah Penelitian dan Lokasi Titik-titik Pengukuran

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Geologi

Berdasarkan Peta Geologi lembar Surabaya dan Sapulu skala 1 : 100.000 yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung Tahun 1992, secara geologis Kota Surabaya tersusun dari empat formasi batuan, yaitu aluvium, Formasi Kabuh, Formasi Pucangan dan Formasi Lidah (Gambar 3).

Aluvium terdiri atas kerakal, kerikil, pasir dan lempung dengan kelulusan batuan tinggi. Aluvium ini menempati sebagian besar wilayah penelitian terutama di daerah pantai.

Formasi Kabuh yang terdiri atas batupasir berkerikil dan konglomerat, dijumpai di daerah Pengalangan, Tabanan, Kembangkuning, Babatan dan Siwalankerto. Kelulusan batuan relatif rendah atau bahkan kedap air. Ditinjau dari stratigrafinya, di daerah pantai Formasi Kabuh merupakan alas dari aluvium dengan ketebalan lapisan mencapai sekitar 125 m.

Formasi Pucangan di bagian atas terdiri atas batupasir bertuf berlapis, dan di bagian bawah terdiri atas batupasir bertuf berlapis bersisipan konglomerat dan batulempung yang kaya akan fosil moluska dan plankton. Formasi batuan ini dapat dijumpai di daerah Sambikerep, Pengampon, Randegan dan Sumurwelut dengan nilai kelulusan batuan sangat rendah. Formasi keempat adalah Formasi Lidah yang hanya meliputi sebagian kecil daerah penelitian yaitu di sebelah selatan Sambikerep dan di sebelah barat Menurpumpungan. Batuan penyusunnya adalah batulempung dan batulempung berpasir.

Penggunaan Lahan

Berdasarkan Peta Penggunaan Lahan Skala 1 : 50.000 yang diterbitkan oleh BAPPEDA Kota Surabaya Tahun 2005, bentuk penggunaan lahan utama yang terdapat di Kota Surabaya adalah permukiman. Bentuk penggunaan lahan ini terletak membentang dari Pelabuhan Tanjung Perak di bagian utara hingga Buwanggedede di bagian selatan, serta Tambakdono di bagian barat hingga Kalisari di bagian timur. Di daerah pantai bagian utara, terdapat bentuk penggunaan lahan tambak, sedangkan di pantai bagian timur berupa suaka alam dan industri.

Tanah

Ditinjau dari keadaan tanahnya, terdapat empat macam tanah di daerah penelitian yaitu Aluvial Hidromorf, Aluvial Kelabu Tua, Aluvial Kelabu dan Grumusol Kelabu Tua. Tanah Aluvial Hidromorf tersebar di sepanjang pantai, mulai dari muara Sungai Buwangan Gede di bagian selatan hingga muara Sungai Lamong di bagian utara. Tanah Aluvial Kelabu Tua dan Aluvial Kelabu menempati bagian tengah daerah penelitian, sedangkan Grumusol Kelabu Tua tersebar di bagian barat pada topografi yang lebih tinggi.

Hasil Pendugaan Geolistrik

1) Penampang (A-B)

Penampang (A-B) terdiri atas dua titik pengukuran, yaitu titik A dengan jarak dari pantai 4,3 km terletak di Dukuh Jerawat dan titik B dengan jarak dari pantai 7,2 km terletak di Sumberejo (Gambar 4). Di titik A, air asin didapati pada kedalaman 0,8 m dari permukaan tanah dengan nilai tahanan jenis 0,7 Ω m. Lapisan

Aluvium terdiri atas kerakal, kerikil, pasir dan lempung dengan kelulusan batuan tinggi. Aluvium ini menempati sebagian besar wilayah penelitian terutama di daerah pantai.

Formasi Kabuh yang terdiri atas batupasir berkerikil dan konglomerat, dijumpai di daerah Pengalangan, Tabanan, Kembangkuning, Babatan dan Siwalankerto. Kelulusan batuan relatif rendah atau bahkan kedap air. Ditinjau dari stratigrafinya, di daerah pantai Formasi Kabuh merupakan alas dari aluvium dengan ketebalan lapisan mencapai sekitar 125 m.

Formasi Pucangan di bagian atas terdiri atas batupasir bertuf berlapis, dan di bagian bawah terdiri atas batupasir bertuf berlapis bersisipan konglomerat dan batulempung yang kaya akan fosil moluska dan plankton. Formasi batuan ini dapat dijumpai di daerah Sambikerep, Pengampon, Randegan dan Sumurwelut dengan nilai kelulusan batuan sangat rendah. Formasi keempat adalah Formasi Lidah yang hanya meliputi sebagian kecil daerah penelitian yaitu di sebelah selatan Sambikerep dan di sebelah barat Menurpumpungan. Batuan penyusunnya adalah batulempung dan batulempung berpasir.

Penggunaan Lahan

Berdasarkan Peta Penggunaan Lahan Skala 1 : 50.000 yang diterbitkan oleh BAPPEDA Kota Surabaya Tahun 2005, bentuk penggunaan lahan utama yang terdapat di Kota Surabaya adalah permukiman. Bentuk penggunaan lahan ini terletak membentang dari Pelabuhan Tanjung Perak di bagian utara hingga Buwanggedede di bagian selatan, serta Tambakdono di bagian barat hingga Kalisari di bagian timur. Di daerah pantai bagian utara, terdapat bentuk penggunaan lahan tambak, sedangkan di pantai bagian timur berupa suaka alam dan industri.

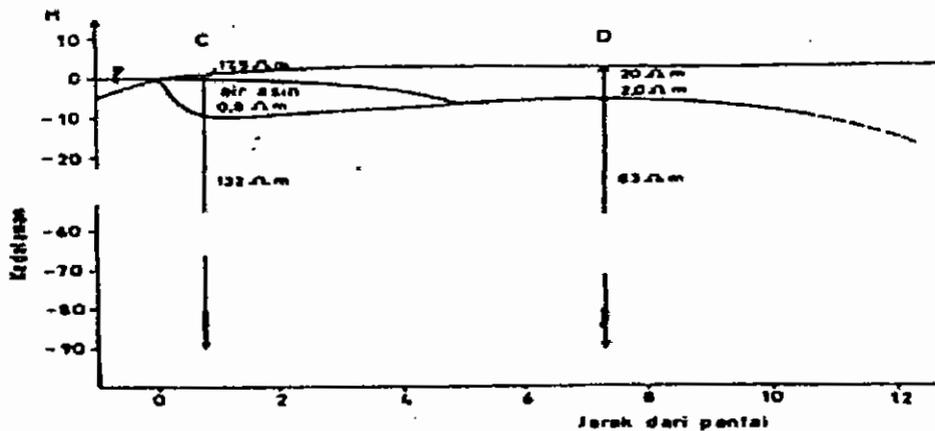
Tanah

Ditinjau dari keadaan tanahnya, terdapat empat macam tanah di daerah penelitian yaitu Aluvial Hidromorf, Aluvial Kelabu Tua, Aluvial Kelabu dan Grumusol Kelabu Tua. Tanah Aluvial Hidromorf tersebar di sepanjang pantai, mulai dari muara Sungai Buwangan Gede di bagian selatan hingga muara Sungai Lamong di bagian utara. Tanah Aluvial Kelabu Tua dan Aluvial Kelabu menempati bagian tengah daerah penelitian, sedangkan Grumusol Kelabu Tua tersebar di bagian barat pada topografi yang lebih tinggi.

Hasil Pendugaan Geolistrik

1) Penampang (A-B)

Penampang (A-B) terdiri atas dua titik pengukuran, yaitu titik A dengan jarak dari pantai 4,3 km terletak di Dukuh Jerawat dan titik B dengan jarak dari pantai 7,2 km terletak di Sumberejo (Gambar 4). Di titik A, air asin didapati pada kedalaman 0,8 m dari permukaan tanah dengan nilai tahanan jenis 0,7 Ω m. Lapisan



Gambar 5. Penampang (C-D)

3) Penampang (E-F-G)

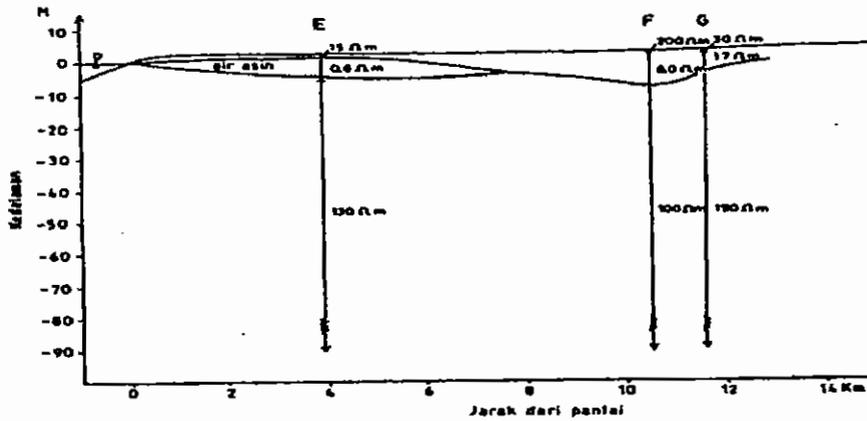
Penampang (E-F-G) terdiri atas tiga titik pengukuran, yaitu titik E yang berjarak 3,9 km dari garis pantai, titik F yang berjarak 10,5 km dari garis pantai serta titik G yang berjarak 11,6 km dari garis pantai (Gambar 6). Di titik E yang terletak di Perak Barat, pada kedalaman 0,9 m dari permukaan tanah terdeteksi adanya lapisan air asin dengan nilai tahanan jenis $0,8 \Omega\text{m}$. Lapisan ini mempunyai ketebalan 7,1 m. Di bawahnya terdapat lapisan dengan nilai tahanan jenis $130 \Omega\text{m}$ yang diperkirakan merupakan lapisan batupasir berkerikil dan konglomerat dari Formasi Kabuh.

Di titik F yang terletak di Dukuh Kupang tidak terdeteksi adanya lapisan air asin maupun lapisan air payau, tetapi di titik G yang terletak di Gunungsari dengan lokasi yang lebih jauh dari pantai, justru terdeteksi adanya air payau mulai dari kedalaman 0,8 m hingga 6 m. Adanya lapisan air payau ini diketahui berdasarkan tahanan jenis batuan yang mencapai $1,7 \Omega$. Di bawahnya terdapat lapisan batupasir bertufa dari Formasi Pucangan dengan nilai tahanan jenis $150 \Omega\text{m}$.

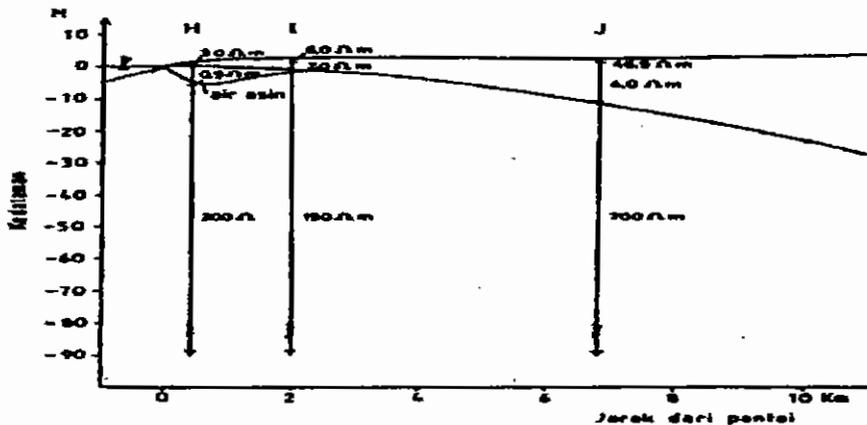
4) Penampang (H-I-J)

Penampang (H-I-J) juga terdiri atas tiga titik pengukuran. Titik H yang terletak di Pantai Kenjeran berjarak 0,4 km dari garis pantai, titik I yang terletak di Platodonomulyo berjarak 2 km dari garis pantai, sedangkan titik J yang terletak di Bubutan berjarak 6,8 km dari garis pantai (Gambar 7).

Di titik H yang terletak di Pantai Kenjeran, lapisan air asin didapatkan pada kedalaman 0,8 m dari permukaan tanah dengan nilai tahanan jenis $0,9 \Omega\text{m}$. Lapisan air asin ini masih didapati hingga kedalaman 7 m, dilanjutkan dengan lapisan batupasir dan konglomerat dengan nilai tahanan jenis 200Ω . Di titik I yang terletak di Platodonomulyo dan titik J yang terletak di Bubutan tidak terdeteksi adanya lapisan air asin.



Gambar 6. Penampang (E-F-G)



Gambar 7. Penampang (H-I-J)

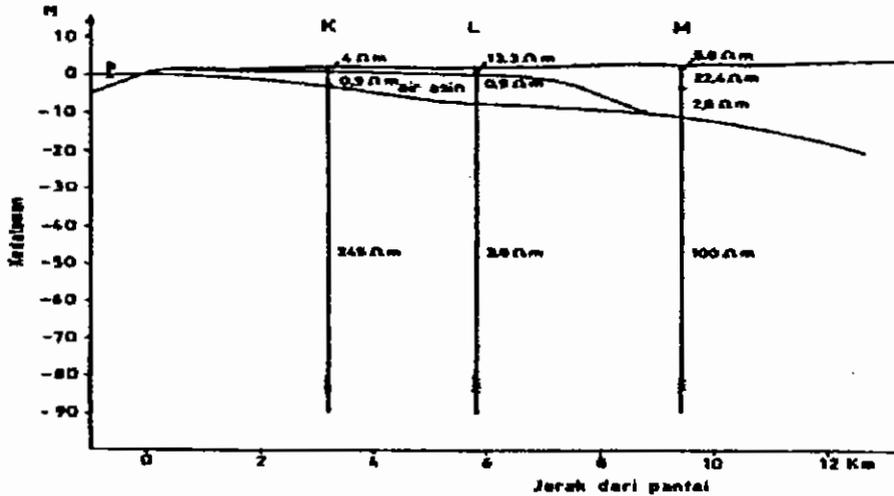
5) Penampang (K-L-M)

Penampang (K-L-M) terdiri atas tiga titik pengukuran, yaitu titik K yang berjarak 3,2 km dari pantai, titik L yang berjarak 5,8 km dari pantai, serta titik M yang berjarak 9,4 km dari pantai (Gambar 8). Pada penampang (K-L-M) ini, dari ketiga titik pengukuran tersebut, hanya dua titik yang terdeteksi mempunyai kandungan air asin. Di titik K yang terdapat di Tempat Pembuangan Sampah Akhir (TPA) Keputih, terdeteksi adanya lapisan air asin pada kedalaman 0,9 m hingga 5 m dari permukaan tanah. Di bawahnya, didapati lapisan batupasir dan konglomerat dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis 245 Ωm.

Di titik L yang berlokasi di halaman Asrama Haji Surabaya, lapisan air asin didapati pada kedalaman 0,9 m dengan nilai tahanan jenis 0,9 Ωm. Lapisan air asin ini didapati hingga kedalaman 9,2 m, dilanjutkan oleh lapisan batupasir dan konglomerat dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis 318 Ωm.

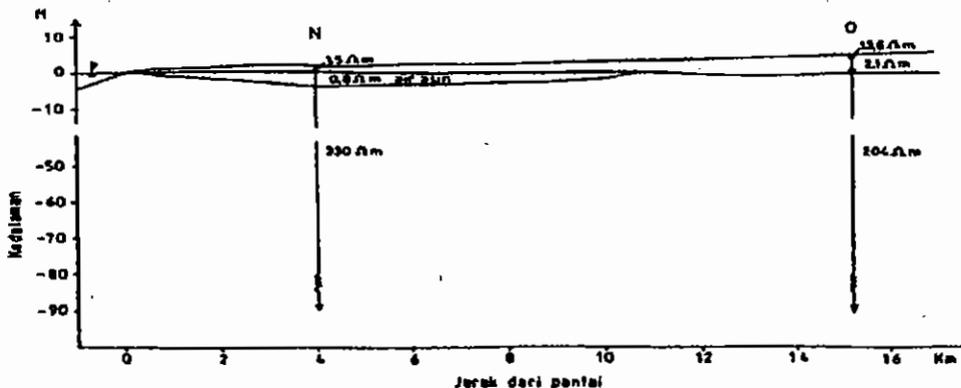
6) Penampang (N-O)

Penampang (N-O) terdiri atas dua titik pengukuran yaitu titik N yang berjarak 4 km dari pantai dan titik O yang berjarak 15,2 km dari pantai (Gambar 9). Di titik N yang terletak di Wonorejo, lapisan air asin dijumpai pada kedalaman 0,9 m hingga 5 m dari permukaan tanah. Di bawahnya, dijumpai lapisan batupasir dan konglomerat dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis 330 Ω.



Gambar 8. Penampang (K-L-M)

Di titik O yang terletak di Perumahan Maritim, tidak dijumpai adanya lapisan air asin. Meskipun demikian pada kedalaman 0,8 m hingga 4 m dari permukaan tanah, dijumpai lapisan air payau dengan nilai tahanan jenis 2 Ωm, yang dilanjutkan oleh lapisan batupasir dan konglomerat dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis 220 Ω.

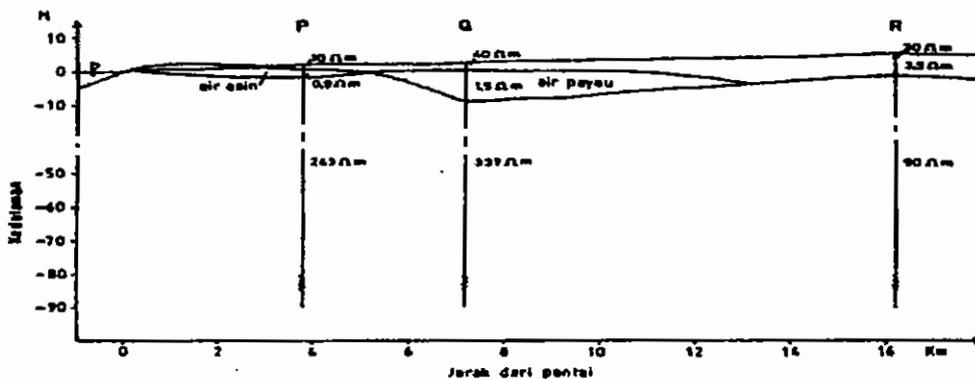


Gambar 9. Penampang (N-O)

7) Penampang (P-Q-R)

Penampang (P-Q-R) terdiri atas tiga titik pengukuran, yaitu titik P yang berjarak 3,8 km dari pantai terletak di Gununganyar, titik Q yang berjarak 7,2 km dari pantai terletak di Kompleks Industri Rungkut VI dan titik R yang berjarak 16,2 km dari pantai terletak di Warugunung (Gambar 10). Di titik P, lapisan teratas berupa pasir dan lempung dengan nilai tahanan jenis 10Ω , didapati hingga kedalaman 0,9 m dari permukaan tanah. Di bawahnya terdeteksi adanya lapisan air asin dengan nilai tahanan jenis $0,9 \Omega\text{m}$. Lapisan ini didapati hingga kedalaman 3,2 km dari permukaan tanah, yang kemudian dilanjutkan oleh lapisan batuan dari Formasi Kabuh dengan nilai tahanan jenis $245 \Omega\text{m}$.

Di titik Q tidak terdeteksi adanya air asin, melainkan lapisan air payau pada kedalaman 1,5 hingga 11,6 m dari permukaan tanah dengan nilai tahanan jenis $1,5 \Omega\text{m}$. Di bawahnya terdapat lapisan batuan dengan nilai tahanan jenis $332 \Omega\text{m}$ yang diduga masih berupa lapisan batuan dari Formasi Kabuh. Di titik R juga tidak didapati lapisan air asin, melainkan lapisan air tawar mulai pada kedalaman 6,5 m dari permukaan tanah. Produktivitas lapisan air tawar ini diduga tidak terlalu tinggi karena berada pada lapisan dengan nilai tahanan jenis rendah yaitu $3,5 \Omega\text{m}$. Selanjutnya, untuk memperoleh gambaran secara keseluruhan kondisi airtanah di daerah penelitian, hasil pendugaan geolistrik pada tujuh penampang tersebut disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 10. Penampang (P-Q-R)

Berdasarkan Tabel 1 tersebut terlihat bahwa keterdapatan airtanah asin di daerah penelitian telah meliputi sebagian besar wilayah pantai. Ditinjau dari jaraknya dari garis pantai, airtanah asin didapati pada jarak antara 0,4 hingga 5,8 km dari garis pantai, sedangkan airtanah payau didapati pada jarak 2,0 hingga 15,2 km dari garis pantai.

Ditinjau dari ketebalan lapisannya, airtanah asin yang terdeteksi di daerah penelitian mempunyai ketebalan dari 1,0 m (di titik A) hingga 10,8 m (di titik C), sedangkan airtanah payau mempunyai ketebalan lapisan dari 2,1 m (di titik I)

hingga 10,1 m (di titik Q). Untuk kedalamannya dari permukaan tanah, berkisar antara 0,6-0,9 m untuk airtanah asin dan 0,8-1,5 m untuk airtanah payau.

Selain airtanah asin dan airtanah payau, di daerah penelitian juga masih dapat ditemukan airtanah tawar, yang umumnya berada pada jarak yang lebih jauh dari garis pantai. Di titik F (Dukuh Kupang), airtanah tawar ditemukan pada kedalaman 1,0-11,0 m dari permukaan tanah, di titik J (Jl. Bubutan) airtanah tawar ditemukan pada kedalaman 0,9-12,7 m dari permukaan tanah, di titik M (Jl. Darmo) airtanah tawar ditemukan pada kedalaman 1,0-6,1 m dari permukaan tanah, sedangkan di titik R (Warugunung) airtanah tawar ditemukan pada kedalaman 0,8-6,5 m dari permukaan tanah. Airtanah tawar yang ditemukan ini, terdapat pada akuifer bebas yang pada umumnya mempunyai produktivitas akuifer rendah (kecuali di titik M yang produktivitasnya cukup tinggi).

Tabel 1. Gambaran kondisi airtanah di daerah penelitian berdasarkan hasil pendugaan geolistrik

Jalur Pendugaan	Lokasi	Jarak dari garis pantai (km)	Air asin		Air payau		Air tawar	
			Kedalaman (m)	Tahanan (Ω m)	Kedalaman (m)	Tahanan (Ω m)	Kedalaman (m)	Tahanan (Ω m)
Penampang (A-B)	Titik A	4,3	0,8-1,8	0,7	-	-	-	-
	Titik B	7,2	-	-	0,9-8,4	1,2	-	-
Penampang (C-D)	Titik C	0,8	0,6-11,4	0,8	-	-	-	-
	Titik D	7,3	-	-	0,9-9,0	2,0	-	-
Penampang (E-F-G)	Titik E	3,9	0,9-8,0	0,8	-	-	-	-
	Titik F	10,5	-	-	-	-	1,0-11,0	8,0
	Titik G	11,6	-	-	0,8-6,0	1,7	-	-
Penampang (H-I-J)	Titik H	0,4	0,8-7,0	0,9	-	-	-	-
	Titik I	2,0	-	-	0,9-3,0	2,0	-	-
	Titik J	6,8	-	-	-	-	0,9-12,7	4,0
Penampang (K-L-M)	Titik K	3,2	0,9-5,0	0,9	-	-	-	-
	Titik L	5,8	0,9-9,2	0,9	-	-	-	-
	Titik M	9,4	-	-	-	-	1,0-6,1	22,4
Penampang (N-O)	Titik N	4,0	0,9-5,0	0,8	-	-	-	-
	Titik O	15,2	-	-	0,8-4,0	2,0	-	-
Penampang (P-Q-R)	Titik P	3,8	0,9-3,2	0,9	-	-	-	-
	Titik Q	7,2	-	-	1,5-11,6	1,5	-	-
	Titik R	16,2	-	-	-	-	0,8-6,5	3,5

Sumber: hasil pengukuran lapangan

Pendugaan geolistrik yang dilakukan hingga kedalaman 150 m dari permukaan tanah, tidak mampu mendeteksi adanya airtanah tawar pada akuifer tertekan karena begitu tebalnya lapisan kedap yang mendasari akuifer bebas. Hasil pendugaan geolistrik juga tidak menunjukkan adanya *interface*, sehingga faktor penyebab adanya airtanah asin dan airtanah payau di daerah penelitian adalah air fosil (*connate water*).

KESIMPULAN

1. Di Kota Surabaya terdeteksi adanya airtanah asin dan airtanah payau dengan jarak dari garis pantai dan ketebalan lapisan yang bervariasi.
2. Faktor penyebab adanya airtanah asin dan airtanah payau di daerah penelitian adalah air fosil (*connate water*).
3. Berdasarkan hasil pendugaan geolistrik di lapangan, hingga kedalaman 150 m dari permukaan tanah tidak dijumpai akuifer tertekan yang mengandung airtanah tawar.

DAFTAR PUSTAKA

- Beukeboom, T.J., 1978. Some Theories on Fresh-Salt Groundwater Relationship in Coastal Aquifers, *The Indonesian Journal of Geography*, 8(35), hal. 1-9.
- Bouwer, H., 1978. *Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- FAO, 1997. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*. Guidelines for Study, Monitoring and Control, FAO, Rome.
- Fetter, C.W., 1988. *Applied Hydrogeology*. Macmillan Publishing Co., New York.
- Goldenberg, L.C., Magaritz, M. dan Mandel, S., 1983. Experimental Investigation on Irreversible Changes of Hydraulic Conductivity on the Seawater-Fresh Water Interface in Coastal Aquifers, *Water Resources Research* 19(1), hal. 225-242.
- Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup, 1998. *Kebijaksanaan dan Strategi Nasional Pengelolaan Lingkungan Hidup dalam Pembangunan Jangka Panjang Kedua (1994/1995-2019/2020)*. Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup, Jakarta.
- Kodoatie, R.J., 1996. *Pengantar Hidrogeologi*. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Polo, J.F. dan Ramis, J.R., 1983. Simulation of Salt Water-Fresh Water Interface Motion, *Water Resources Research*, 19(1), hal. 61-68.
- Saeni, M.S., 1989. *Kimia Lingkungan*. PAU Ilmu Hayat IPB, Bogor.
- Soenarto, B., 1988. Penyusupan Air Asin dalam Airtanah Jakarta, *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pengairan*, 2(8), hal. 157-165.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, New York.

UNESCO, 1991. *Guidelines on The Study of Seawater Intrusion into Rivers*. UNESCO, Paris.

Wanielista, M., Kersten, R. dan Eaglin, R., 1997. *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*. John Wiley and Sons Inc., New York.

Zohdy, A.A.R., Eaton, G.P. dan Mabey, D.R., 1980. *Application of Surface Geophysics to Groundwater Investigation*. United States Department of The Interior, Washington.