



## PREDIKSI SEBARAN INTRUSI AIR LAUT MENGGUNAKAN METODE GAYABERAT MIKRO ANTAR WAKTU DI DAERAH SEMARANG UTARA

P. A. Wibowo ✉, Supriyadi.

Prodi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Indonesia, 50229

### Info Artikel

#### Sejarah Artikel:

Diterima Mei 2014

Disetujui Mei 2014

Dipublikasikan Juni 2014

#### Keywords:

Intrusion, Gravity, Time Lapse

### Abstrak

Telah dilakukan penelitian pengukuran gayaberat mikro antar waktu di wilayah Semarang utara dan sekitarnya untuk mendeteksi perubahan kondisi hidrogeologi. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan air di kota Semarang yang menyebabkan dampak intrusi air laut. Titik pengukuran sebanyak 110 titik dan pengukuran dilakukan sebanyak 2 kali yaitu pada Mei 2013 dan Oktober 2013 di titik yang sama. Pengukuran gayaberat menggunakan gravimeter tipe Scintrex Autograv CG-5. Hasil penelitian berupa nilai anomali gayaberat mikro antar waktu positif sebesar 0,13 mGal sampai 0,18 mGal yang mengindikasikan adanya intrusi air laut di daerah Pelabuhan Tanjung Mas, Bandarharjo, Kuningan, Pasar Boom Lama dan daerah Johar. Anomali negatif sebesar -0,060 mGal sampai -0,18 mGal mengindikasikan pengurangan air di dalam tanah di daerah Puri Anjasmoro, Kenconowungu dan Puspowarno. Berdasarkan kontras densitas, intrusi air laut telah terjadi di lokasi penelitian pada kedalaman mulai dari 60 meter dengan kontras densitas 0,15 g/cm<sup>3</sup> sampai 0,28 g/cm<sup>3</sup>.

### Abstract

Research about time lapse microgravity was done in Northern region of Semarang to detect changes in hydrogeology condition. This research is motivated by the increasing water demand in the city of Semarang, which causes the effects of seawater intrusion. Gravity points as much as 110 points and the measurement was done 2 times, in May 2013 and October 2013 at the same point. Measurement of gravity using gravimeter Scintrex CG-5 Autograv. The results is positive anomaly of time lapse microgravity between 0.13 mGal to 0.18 mGal indicated seawater intrusion in the Port of Tanjung Mas, Bandarharjo, Kuningan, Pasar Boom Lama and Johar. The negative anomaly is -0.060 mGal to -0.18 mGal indicates a reduction in the groundwater in the area of Puri Anjasmoro, Kenconowungu and Puspowarno. Based on the density contrast, seawater intrusion has occurred at depths ranging from 60 meters with a density contrast of 0.15 g/cm<sup>3</sup> to 0.28 g/cm<sup>3</sup>.

## PENDAHULUAN

Kebutuhan air tanah di Semarang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk (Sriyono et al., n.d) dan industri. Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Kota Semarang menyatakan bahwa jumlah penduduk kota Semarang pada bulan November 2013 sebesar 1.739.989 jiwa.

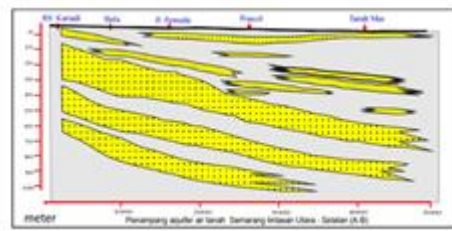
Jumlah penduduk berdampak pada banyaknya eksploitasi air melalui sumur bor, maka perlu dilakukan tindakan pemantauan terhadap pemanfaatannya sehingga keberadaan airtanah tetap terjaga (Listyani et al., 2012). Sumur bor dapat memenuhi kebutuhan air tanah dalam jangka waktu yang cukup lama namun memiliki dampak bagi akuifer yaitu intrusi air laut. Intrusi pada dasarnya adalah proses masuknya air laut di bawah permukaan tanah melalui akuifer di daratan atau daerah pantai (Nisa et al., 2012).

### Geologi Daerah Penelitian

Kota Semarang bagian utara terdiri atas dua batuan utama yaitu aluvium dan batuan sedimen (Putranto & Rüde, n.d). Berdasarkan peta geologi lembar Magelang – Semarang (Thanden et al., 1996) bagian utara Semarang terdapat endapan permukaan berupa aluvium (Qa). Aluvium merupakan dataran pantai, sungai dan danau. Selain endapan permukaan berupa aluvium, juga terdapat batuan sedimen yang masuk dalam formasi Damar (QTd). Formasi Damar terdiri atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik.

### Hidrogeologi Semarang

Akuifer merupakan lapisan pembawa air. Akuifer berasal dari kata aqua yang berarti air dan fere yang berarti mengandung (Siswoyo et al., n d). Batuan yang dapat berfungsi sebagai lapisan pembawa air terbaik adalah pasir, kerakal dan kerikil (Tood, 1980). Secara hidrogeologi, kota Semarang dapat dibagi menjadi empat kelompok akuifer, yakni kelompok akuifer endapan kuartar, kelompok akuifer formasi damar, kelompok akuifer breksi vulkanik dan kelompok akuifer produk gunung api muda (Najib et al., 2006). Gambar 1.1 dibawah ini menunjukkan peta penampang akuifer air tanah daerah Semarang.



**Gambar 1.1** Penampang akuifer air tanah daerah Semarang

### Intrusi Air Laut

Intrusi atau penyusupan air laut ke dalam akuifer daratan (Irham et al., 2006) pada dasarnya adalah proses masuknya air laut di bawah permukaan tanah melalui akuifer di daratan atau daerah pantai. Adanya intrusi air laut dapat menyebabkan densitas di bawah permukaan bumi bertambah diikuti bertambahnya pula gayaberat bumi (Irham et al., 2004).

### Teori Gayaberat

Dasar teori dari metode gayaberat adalah hukum gravitasi Newton (Telford et al., 1990). Hukum Gravitasi Newton mempostulatkan bahwa tiap benda mengadakan gaya tarik pada tiap benda lain yang sebanding dengan massa kedua benda itu dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pisah antara mereka (Tipler, 1998). Besarnya gaya gravitasi yang dikerjakan oleh sebuah benda bermassa  $m$  pada benda lain bermassa  $M$  yang jauhnya diberikan oleh  $r$

$$F = \frac{GmM}{r^2} \quad (1.1)$$

Newton juga mendefinisikan hubungan antara gaya dan percepatan. Hukum Newton II tentang gerak menyatakan bahwa gaya adalah besarnya perkalian dari massa dan percepatannya.

$$F = mg \quad (1.2)$$

Percepatan sebuah benda bermassa yang disebabkan oleh tarikan benda bermassa  $M$  pada jarak  $r$  dapat dinyatakan dengan:

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{M}{r^2} \quad (1.3)$$

Massa jenis suatu benda merupakan perbandingan antara massa terhadap volume benda itu sendiri yang dapat dinyatakan dengan:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.4)$$

Apabila persamaan (1.3) dan (1.4) disubstitusikan, didapatkan persamaan (1.5) seperti berikut.

$$g = G \frac{\rho V}{r^2} \quad (1.5)$$

Keterangan:  $F$  = gaya (N),  $G$  = konstanta gayaberat =  $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ ,  $M$  = massa benda (kg),  $m$  = massa benda  $m$  (kg),  $r$  = jarak antar pusat massa benda (m),  $g$  = percepatan ( $\text{m/s}^2$ ),  $\rho$  = massa jenis benda ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  = volume benda ( $\text{m}^3$ ).

### Anomali Gayaberat

Secara matematis dapat didefinisikan bahwa anomali medan gayaberat di topografi atau di posisi  $(x, y, z)$  merupakan selisih dari medan gayaberat observasi di topografi terhadap medan gayaberat teoritis di topografi. Medan gayaberat teoritis disebabkan oleh faktor-faktor non-geologi dan harganya dihitung berdasarkan rumusan-rumusan yang dijabarkan secara teoritis. Nilai medan ini dipengaruhi oleh letak lintang, ketinggian dan massa topografi di sekitar titik tersebut. Secara matematis, anomali medan gayaberat di topografi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (1.6) berikut:

$$\Delta g(x, y, z) = g_{obs}(x, y, z) - g_{teoritis}(x, y, z)$$

dengan  $\Delta g(x, y, z)$  merupakan anomali medan gayaberat di topografi dan  $g_{obs}(x, y, z)$  adalah medan gayaberat observasi di topografi yang sudah dikoreksikan terhadap koreksi pasang surut dan koreksi apungan, sedangkan  $g_{teoritis}(x, y, z)$  merupakan medan gayaberat teoritis di topografi.

### Gayaberat Mikro Antar Waktu

Metode gayaberat mikro antar waktu (time lapse) dapat juga disebut metode gayaberat mikro 4D. Dimensi keempat dalam metode gayaberat mikro 4D adalah waktu. Waktu dalam pengukuran dilakukan secara berulang baik harian, mingguan, bulanan atau tahunan (Supriyadi, 2008). Persamaan anomali gayaberat mikro antar waktu diperoleh dari persamaan (1.7) berikut.

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = g(x, y, z, t_2) - g(x, y, z, t_1)$$

### Koreksi Penurunan Muka Tanah

Anomali gayaberat akibat penurunan muka tanah didapatkan dari perubahan elevasi (Hunt, 2000). Koreksi penurunan muka tanah diperoleh dari persamaan (1.8) dan (1.9) berikut.

$$\Delta g = g_2 - g_1 = (g_{obs2} - g_{obs1}) + FAC - BC$$

$$\Delta g = g_2 - g_1 = (g_{obs2} - g_{obs1}) + SC$$

Dimana ( $FAC$ ) merupakan koreksi udara bebas ( $-0,3086h$ ),  $BC$  adalah koreksi Bouguer ( $2\pi G\rho h = 0.04193\rho h$ )  $\rho$  adalah densitas batuan dan  $h$  adalah penurunan muka tanah (m)

## METODE PENELITIAN

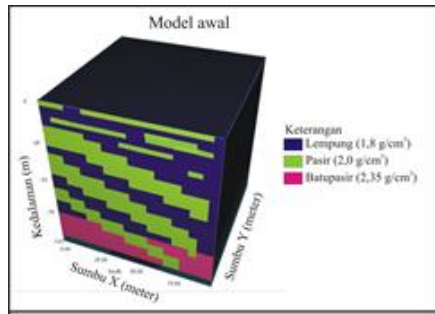
Alat yang digunakan untuk mengukur gayaberat dalam penelitian ini adalah Gravimeter Scintrex Autograv CG-5 dengan ketelitian  $1 \mu\text{Gal}$ . Pengukuran dilakukan sebanyak dua kali secara berulang yaitu pada saat musim penghujan (bulan Mei 2013) dan musim kemarau (bulan Oktober 2013) dengan metode looping yang berpola base-A-B-C-D-n-base. Jumlah titik pengukuran sebanyak 110 titik. Berdasarkan penelitian sebelumnya, beberapa lokasi penelitian telah mengalami intrusi air laut seperti daerah Tugu Muda, Bulu, Tawang Mas dan Bandarharjo.

### Pemodelan

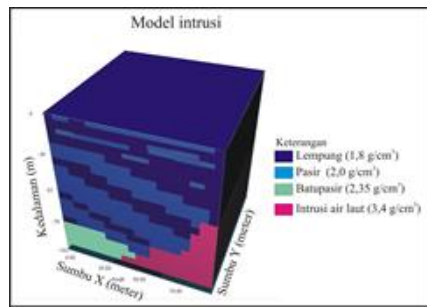
Model merupakan suatu pendekatan terhadap kenyataan di alam yang kompleks (Putranto, 2011). Model dibuat dalam dua jenis yang berbeda, yaitu model awal dan model intrusi. Model awal dilakukan dengan membuat lapisan batuan sesuai perlapisan pada peta penampang akuifer kota Semarang (Gambar 1.1).

Jenis batuan pada model ini adalah lempung, pasir dan batu pasir berdasarkan peta geologi lembar Magelang - Semarang. Nilai densitas lempung, pasir dan batupasir berturut-turut sebesar  $1,8 \text{ g/cm}^3$  (Soedarsono, 2009),  $2,0 \text{ g/cm}^3$  dan  $2,35 \text{ g/cm}^3$  (Telford et al., 1990). Model awal dianggap sebagai model yang belum mengalami intrusi air laut. Model intrusi pada dasarnya sama seperti model awal, yang membedakan adalah adanya masukan intrusi air laut. Intrusi pada model ini dibuat sepanjang 40 – 100 meter pada sumbu x dikedalaman 47 – 103 meter dengan densitas batuan yang terintrusi air laut  $3,4 \text{ g/cm}^3$ , nilai ini diasumsikan sebagai penambahan densitas akibat adanya air laut yang memiliki nilai densitas sebesar  $1,05 \text{ g/cm}^3$  (Telford et al., 1990).

Gambar 1.2 dan Gambar 1.3 menunjukkan model awal dan intrusi.



Gambar 1.2 Model Awal

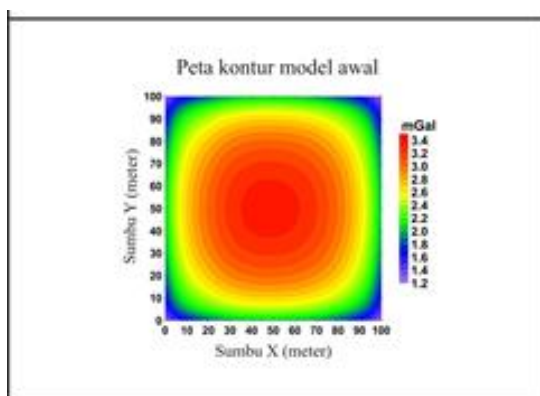


Gambar 1.3 Model Intrusi

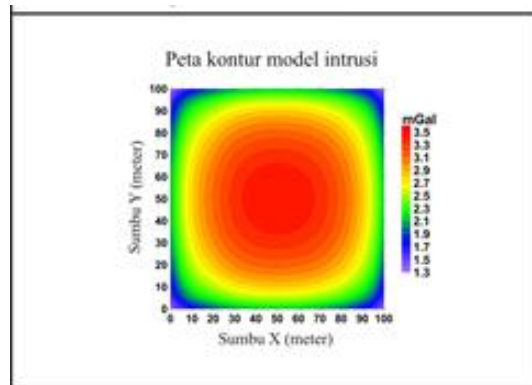
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemodelan

Model berbentuk 3D yang dibuat menggunakan *software Grav3D* selanjutnya diolah sehingga menghasilkan peta kontur model awal dan model intrusi dalam bentuk 2D. Gambar 1.4 dan Gambar 1.5 menunjukkan peta kontur model awal dan intrusi.

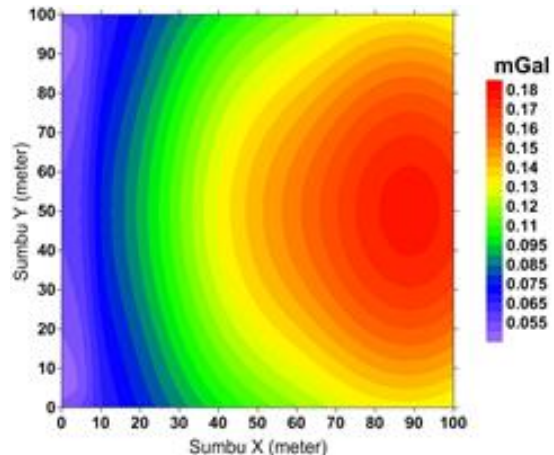


Gambar 1.4 Peta Kontur Model Awal



Gambar 1.5 Peta Kontur Model Intrusi

Untuk mengetahui perubahan gayabarat akibat intrusi air laut, dilakukan pengurangan antara hasil kontur model intrusi terhadap hasil kontur model awal menggunakan *software surfer 10*. Peta kontur perubahan gayabarat akibat intrusi berdasarkan model ditunjukkan pada Gambar 1.6 berikut.

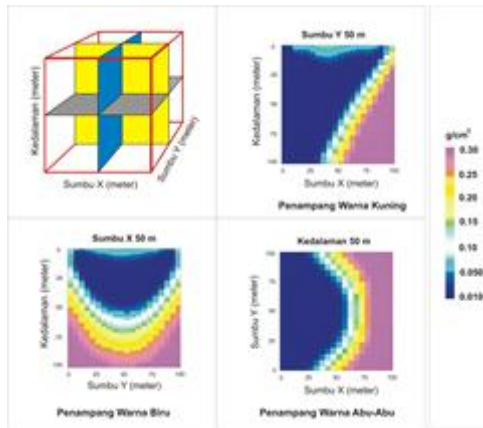


Gambar 1.6 Peta Kontur perubahan gaya berat akibat intrusi berdasarkan model

Gambar 1.6 diatas memperlihatkan adanya anomali gayabarat akibat intrusi air laut bernilai antara 0,13 mGal – 0,18 mGal mulai dari 40 meter sampai 100 meter pada sumbu x, hal ini bersesuaian dengan model intrusi dimana letak intrusi pada model intrusi berada sepanjang 40 meter sampai 100 meter pada sumbu x.

Untuk mengetahui perubahan kontras densitas terhadap perubahan akibat intrusi air laut, dilakukan pengolahan menggunakan *Grav3D* dengan inputan data perubahan gayabarat akibat intrusi yang dihasilkan dari pemodelan diatas. Berdasarkan hasil *Grav3D*, nilai kontras densitas yang disebabkan oleh intrusi air laut adalah antara 0,15 g/cm<sup>3</sup> sampai 0,30 g/cm<sup>3</sup> seperti pada Gambar 1.7.



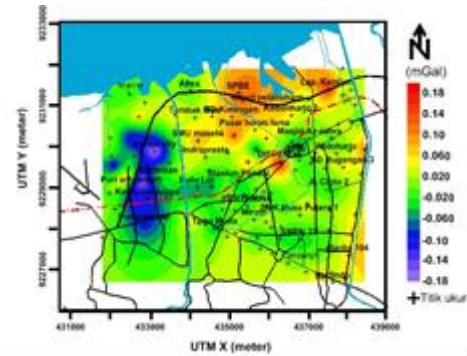


Gambar 1.7 Nilai Perubahan Kontras Densitas Akibat Intrusi Air Laut Berdasarkan Model

#### Analisis Gayaberat Mikro Antar Waktu

Data gayaberat mikro antar waktu didapatkan dengan mengurangkan data gayaberat observasi Oktober 2013 dengan data gayaberat observasi Mei 2013. Nilai anomali (+) dengan rentang nilai 0,020 mGal – 0,18 mGal pada peta anomali gayaberat mikro antar waktu terjadi di daerah SPBE Bandarharjo, Kemijen, Pelabuhan Tanjung Mas, Kuningan, Bugangan, Johar dan Jalan Barito. Hal ini diduga karena adanya penurunan muka tanah dan intrusi air laut. Hal ini didukung dengan data penurunan muka tanah dan sumur pantau yang telah mengalami intrusi air laut. Nilai anomali (-) terdapat di daerah Puri Anjasmoro, daerah Krobokan, Kenconowungu, Bulu Lor dan Puspowarno.

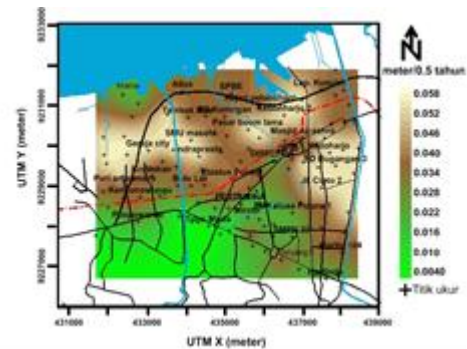
Nilai anomali (-) pada daerah tersebut diduga karena pengurangan air di dalam tanah. Daerah tersebut merupakan daerah perumahan yang padat penduduk sehingga kebutuhan air juga semakin besar. Setiowati (2002) menyatakan bahwa pasokan air diperumahan Puri Anjasmoro berasal dari PDAM dan air bawah tanah yang disediakan oleh pengembang perumahan melalui sumur bor (13 sumur). Banyaknya kebutuhan air bawah tanah inilah yang mengakibatkan pengurangan air di daerah tersebut. Peta anomali gayaberat mikro antar waktu dapat dilihat pada Gambar 1.8.



Gambar 1.8 Peta Anomali Gayaberat Mikro Antar Waktu (Mei 2013 sampai Oktober 2013)

#### Analisis Gayaberat Mikro Antar Waktu Akibat Perubahan Air di dalam Tanah

Untuk mendapatkan anomali gayaberat mikro antar waktu akibat perubahan air di dalam tanah, dibuat terlebih dahulu anomali gayaberat akibat penurunan muka tanah. Inputan perubahan penurunan muka tanah didapat dari peta laju penurunan muka tanah seperti Gambar 1.9.



Gambar 1.9. Laju Penurunan Muka Tanah Per Setengah Tahun.

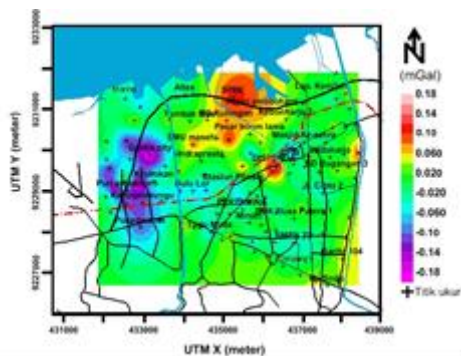
Anomali gayaberat akibat penurunan tanah ini digunakan untuk mengkoreksi anomali gayaberat mikro antar waktu. Data gayaberat mikro antar waktu akibat perubahan air di dalam tanah dapat menunjukkan adanya pengurangan air di dalam tanah dan intrusi air laut.

Berdasarkan peta gayaberat mikro antar waktu akibat perubahan air di dalam tanah, daerah yang memiliki nilai (+) sebesar 0,13 mGal sampai 0,18 mGal adalah SPBE Bandarharjo, Pelabuhan Tanjung Mas, Kuningan, Pasar Boom Lama dan daerah Johar. Daerah-daerah tersebut diduga telah mengalami penambahan intrusi air laut karena mempunyai nilai anomali gayaberat akibat intrusi air laut yang sama berdasarkan model yaitu 0,13 mGal sampai 0,18 mGal. Hal ini juga didukung dengan data sumur

pantau pelabuhan Tanjung Mas yang telah mengalami intrusi air laut dengan konsentrasi klorida sebesar 794,8 mg/L.

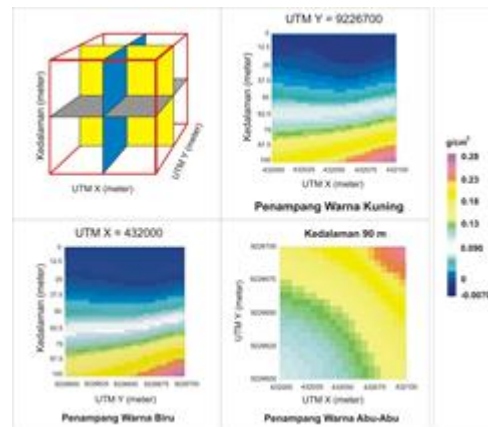
Daerah sekitar Simpang Lima, Tugu Muda, Miroto, Jalan Cipto, Marina, SMK Nusa Putera 1, kantor Pertamina, Bugangan, Widoharjo, Kemijen, dan Altex Tanah Mas memiliki nilai anomali gayaberasat mikro antar waktu akibat perubahan air di dalam tanah sebesar 0 mGal sampai 0,020 mGal. Nilai 0 mGal sampai 0,020 mGal diindikasikan jumlah pengurangan air yang sebanding dengan jumlah penambahan air di bawah tanah selama selang waktu Mei 2013 sampai Oktober 2013.

Daerah yang memiliki nilai (-) antara -0,060 mGal sampai -0,18 mGal adalah Puri Anjasmoro, Kenconowungu, dan Puspowarno. Nilai negatif ini diduga karena adanya pengurangan air di dalam tanah. Daerah tersebut merupakan daerah perumahan padat penduduk yang kebutuhan airnya berasal dari PDAM dan sumur bor (Setiowati, 2002) yang berjumlah 13 sumur untuk memenuhi kebutuhan air di daerah tersebut. Hal inilah yang mengakibatkan pengurangan air di daerah tersebut. Gambar 1.10 menunjukkan peta anomali gayaberasat mikro antar waktu akibat perubahan air di dalam tanah.



**Gambar 1.10** Peta Anomali Gayaberasat Mikro Antar Waktu Akibat Perubahan Air di dalam Tanah

Untuk mengetahui perubahan densitas akibat perubahan air di dalam tanah dilakukan pengolahan menggunakan *Grav3D* dan hasilnya seperti Gambar 1.11 berikut ini.



jarak minimum antar titik pengukuran sejauh 200 meter yang menyebabkan hasil pengolahan data dikedalamkan kurang dari sekitar 60 meter tidak dapat diinterpretasi dengan tepat.

## KESIMPULAN

Hasil dari pemodelan menunjukkan perubahan nilai gayaberat akibat intrusi air laut sebesar 0,13 mGal sampai 0,18 mGal dan perubahan kontras densitasnya sebesar 0,15 g/cm<sup>3</sup> sampai 0,30 g/cm<sup>3</sup>. Korelasi dari hasil pemodelan dengan data hasil pengukuran, didapatkan daerah yang telah mengalami penambahan intrusi air laut adalah daerah Pelabuhan Tanjung Mas, daerah SPBE Bandarharjo, Kuningan, Pasar Boom Lama dan daerah Johar dengan nilai perubahan gayaberat antara 0,13 mGal sampai 0,18 mGal dan perubahan kontras densitasnya sebesar 0,15 g/cm<sup>3</sup> sampai 0,28 g/cm<sup>3</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hunt, T.M. 2000. *Microgravity Measurements At Wairakei Geothermal Field, New Zealand; A Review Of 30 Years Data (1961-1991)*. Taupo: Wairakei Research Centre, Institute of Geological & Nuclear Science.
- Irham, M. 2004. *Aplikasi Metode Mikrogravity 4D dan Leveling untuk Pemantauan Intrusi Air Laut dan Amblesan Tanah Daerah Semarang Bawah Jawa Tengah*. Laporan Penelitian. Hibah Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi (Hibah Pekerti) DIKTI. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Irham, M., Achmad, R. T., Widodo, S. 2006. *Pemetaan Sebaran Air Tanah Asin Pada Aquifer Dalam di Wilayah Semarang Bawah*. Berkala Fisika, Vol.9, No.3, hal 137-143.
- Listyani, T., Isjudarto, A., Prayetno., Putra, R.I. 2012. *Analisis Hidrologi Untuk Mendukung Potensi Airtanah Pada Sub Das Code*. Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi.
- Najib & Fahrudin. 2006. *Kajian Penyebaran Akuifer di Kota Semarang*. Laporan Kegiatan. DIPA Udip. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Nisa, K., Yulianto, T., Widada, S. 2012. *Aplikasi Metode Geolistrik Tahanan Jenis untuk Menentukan Zona Intrusi Air Laut di Kecamatan Genuk Semarang*. Berkala Fisika, Vol. 15, No. 1, hal 7- 14.
- Putranto, T.T. 2011. *Aplikasi Pemodelan Aliran Airtanah Dalam Konsep Pengelolaan Airtanah Berbasis Cekungan*. Prosiding Olimpiade Karya Tulis Inovatif (OKTI).
- Putranto, T.T. & Rude T.R. n.d. *Groundwater Problems in Semarang Demak Urban Area, Java/Indonesia*. Jerman: RWTH Aachen University.
- Setiowati, A. 2002. *Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Pemanfaatan Air Bawah Tanah Pada Perumahan Puri Anjasmoro Semarang*. Tesis. Semarang: Magister Teknik Pembangunan Kota Universitas Diponegoro.
- Siswoyo. H., Asmaranto. R., Saputra, D.D. n.d. *Pemetaan Parameter Kualitas Airtanah Pada Zona Intrusi Air Laut di Cekungan Airtanah Pasuruan*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Soedarsono., Arief, R.B. 2009. *Prediksi Amblesan Tanah (Land Subsidence) Pada Dataran Aluvial di Semarang Bagian Bawah*. Semarang: Teknik Sipil dan Lingkungan UNISSULA.
- Supriyadi, 2008. *Pemisahan Antara Anomali Gayaberat Akibat Amblesan Dengan Penurunan Muka Air Tanah Pada Data Gayaberat Mikro Antar Waktu Menggunakan Mbf ( Model Based Filter ) Dan Analisanya Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang*. Disertasi. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sherif, R. E., 1990. *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, New York.
- Tipler, P. A., 1991. *Fisika untuk Sains dan Teknik Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Todd, D.K. 1980. *Groundwater Technology*. Associate Professor of Civil Engineering California University. Jihn Wiley and son. New York