

## Anomali Time-Lapse First Vertikal Derivative dan Hubungannya dengan Dinamika Air Tanah dan Amblesan

Ahmad Zaenudin

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung  
Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145

### Abstract

Groundwater movement and landscape change can be observed by the gravity change in observation point. Time-lapse microgravity measurement is reliable to identify underground movement and level change (down lift and up lift landscape level). Microgravity FVD methods is one of the most reliable method to identify groundwater movement. Simulation of model shows that decreasing groundwater level yields negative time-lapse FVD, and viceversa, and lanscape level movement yields zero time-lapse FVD. Interpretation of time-lapse FVD give a better groundwater level change.

**Keywords :** *time-lapse FVD, groundwater movement, landscape change.*

### Pendahuluan

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang didasarkan pada perubahan kontras densitas dan jarak di bawah permukaan bumi. Pada tahap awal perkembangannya metode ini digunakan untuk menentukan struktur cebakan minyak, cebakan material pertambangan, lengkungan lithosfera dan lain-lain. Pada saat ini metode gayaberat telah mengalami perkembangan yang cukup pesat seiring dengan meningkatnya ketelitian gravitometer. Gravitometer Worden memiliki ketelitian sampai 0.1 miligall, Lacoste&Romberg mengeluarkan : gravitometer tipe G dengan ketelitian 0.01 miligall, gravitometer tipe D dengan ketelitian 0.001 miligall. Seiring dengan perkembangan teknologi pada saat ini gravitometer telah dibuat dengan ketelitian yang tinggi (0.0001 miligall untuk jenis Graviton) dengan pengoperasian yang lebih mudah. Peningkatan ketelitian gravitometer ini memungkinkan untuk mengukur dinamika massa di bawah permukaan dengan metode gayaberat, seperti untuk: monitoring reservoir panas bumi<sup>1,2,3</sup>, pemantauan pergerakan injeksi air pada

reservoir gas<sup>4,5</sup>, pemantauan amblesan tanah<sup>7,11</sup>, pemantauan magma dan prediksi letusan<sup>9</sup>.

Kemungkinan penggunaan metoda geofisika biasanya terlebih dahulu diuji dengan simulasi. Simulasi diperlukan sebagai alat estimasi besar harga anomali, karakter anomali dan sifat-sifat fisis lainnya sebelum pengukuran di lapangan. Pada tulisan ini akan dipaparkan simulasi penggunaan metoda gayaberat untuk memantau dinamika airtanah akibat perubahan muka airtanah dan amblesan permukaan tanah (*land subsidence*), kemudian diterapkan untuk analisa anomali *time-lapse FVD* di dataran aluvial Semarang.

### Metode Penelitian

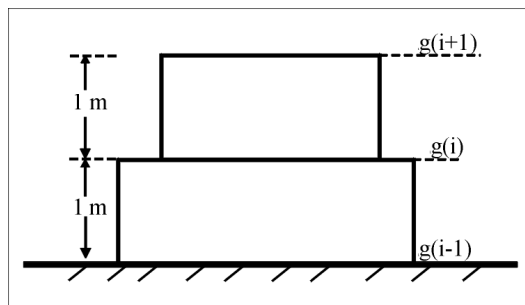
Teknik turunan-vertikal gayaberat dikembangkan dari besaran gradien diferensial, dimana gradien ditentukan dari suatu interval data gayaberat lapangan. Gambar 1 mengilustrasikan konsep *finite-difference* untuk menentukan gradien-gayaberat. Skema struktur untuk pengukuran gradien-vertikal gayaberat dibuat dari dua buah

kotak dengan ketinggian kotak masing-masing 1 meter, sehingga variasi *finite-difference* atau interval besaran dari gradien vertikal dapat ditentukan.

Untuk pengukuran gayaberat dengan tiga beda tinggi yaitu  $h_{(i-1)}$ ,  $h_{(i)}$ , dan  $h_{(i+1)}$ ,

maka Turunan Vertikal Pertama (*first vertical derivative, FVD*) pengukuran dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \left( \frac{g_{(i-1)} - g_{(i)}}{h_{(i)} - h_{i-1}} \right) \text{ miligal/m}$$



Gambar 1. Tiga-tingkat struktur tower untuk menentukan interval gradien vertikal

Turunan Vertikal Pertama (FVD) hasil pengukuran langsung ini berbeda dengan gradien-vertikal gayaberat yang diturunkan dari gravitasi normal. Gradien-vertikal gayaberat yang dihitung dari persamaan gaya berat normal bumi dengan bentuk ellipsoid sering disebut dengan koreksi udara bebas.

$$g_{\varphi,h} = g_{\varphi} + \frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} h$$

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} = -\frac{2g_{\varphi}}{a} (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi)$$

$$\frac{\partial g_{\varphi}}{\partial h} = -0.308765 \text{ untuk } \varphi = 7,5^{\circ}$$

Simulasi yang dilakukan ini didasarkan pada kenyataan bahwa perubahan gayaberat merupakan manifestasi dari perubahan rapat massa batuan yang ada disekitarnya. Perubahan rapat massa batuan dapat disebabkan oleh beberapa hal, yaitu komposisi elemen pembentuknya, struktur dan pengikat internalnya<sup>10</sup>. Elemen pembentuk batuan yang relatif mudah berubah atau berpindah adalah gas dan fluida.

Sehingga perubahan rapat massa pada suatu volume batuan dapat diuraikan bilamana ada perubahan rapat massa matriks batuan, perubahan volume atau massa gas dan fluida atau dinamika pergerakan massa gas dan fluida tersebut.

Pengambilan airtanah yang berlebihan sehingga melampaui kemampuan aman potensi akuifernya dapat menimbulkan penurunan muka tanah (*amblesan* atau *subsidence*). Turunnya muka airtanah ini menyebabkan terjadinya kekosongan pori-pori tanah. Tekanan hidrostatik di bawah permukaan tanah berkurang sebesar hilangnya airtanah tersebut, sedangkan tegangan efektif bertambah. Karena seluruh lapisan pada akuifer ditekan akibat penambahan tegangan efektif, maka kemudian menyebabkan terjadinya pemampatan dan penurunan pada lapisan akuifer tersebut.<sup>12</sup> Hubungan penambahan tegangan efektif dengan pemampatan lapisan tanah akuifer inilah yang menjadi dasar untuk menyatakankan hubungan antara penurunan muka tanah (*amblesan*) dengan penurunan muka

airtanah yang tidak terpulihkan akibat pengambilan yang berlebihan.

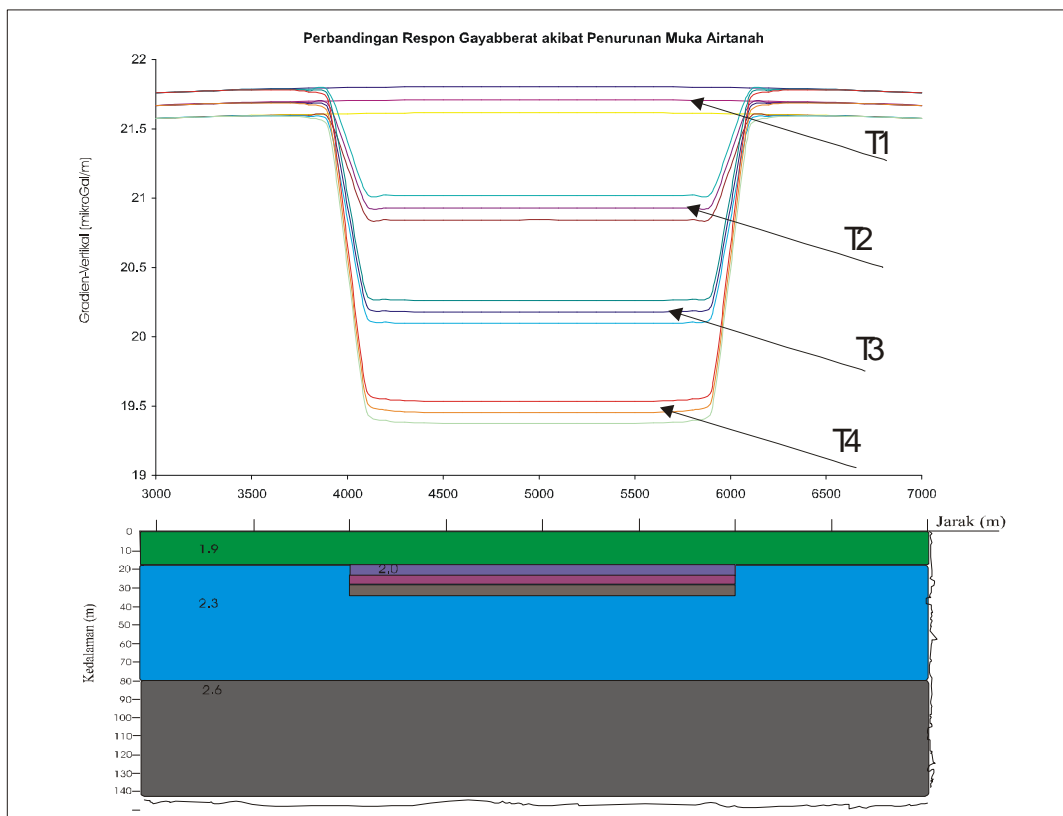
### Simulasi *time-lapse FVD* Akibat Penurunan muka airtanah dan Imbuhan airtanah

Simulasi dibuat dengan model bumi 3 lapis yang memanjang ke arah horizontal sampai tak-hingga. Masing-masing lapisan tersebut adalah lapisan zona aerasi (*zone of aeration*) setebal 0 – 18 m, lapisan zona saturasi (*zone of saturation*) dari kedalaman 18 – 80 m, dan lapisan impermeabel pada kedalaman 80 – 1000 m. Rapat massa rata-rata model lapisan tersebut masing-masing adalah zona aerasi sebesar 1.9 g/cc, zona saturasi 2,3 g/cc dan batuan impermeabel sebesar 2,6 g/cc. Perubahan rapat massa terjadi pada

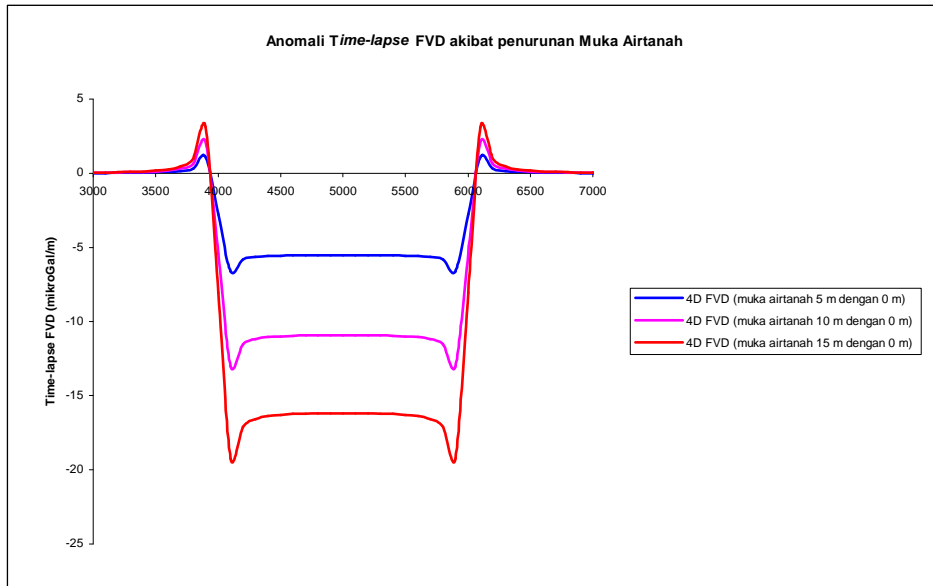
lapisan yang mengandung akuifer air tanah (zona saturasi) yang diambil airtanahnya sebesar 0,3 g/cc dengan asumsi porositas lapisan ini adalah 30% dan rapat massa air 1 g/cc, dan perubahan kedalaman airtanah antar waktu  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  dan  $t_4$  terjadi pada stasiun (4000 – 6000) masing-masing 5 m.

Gambar 2 menunjukkan respon gayaberat akibat penurunan muka airtanah, sedangkan Gambar 3 menunjukkan anomali *time-lapse FVD* untuk setiap periodenya.

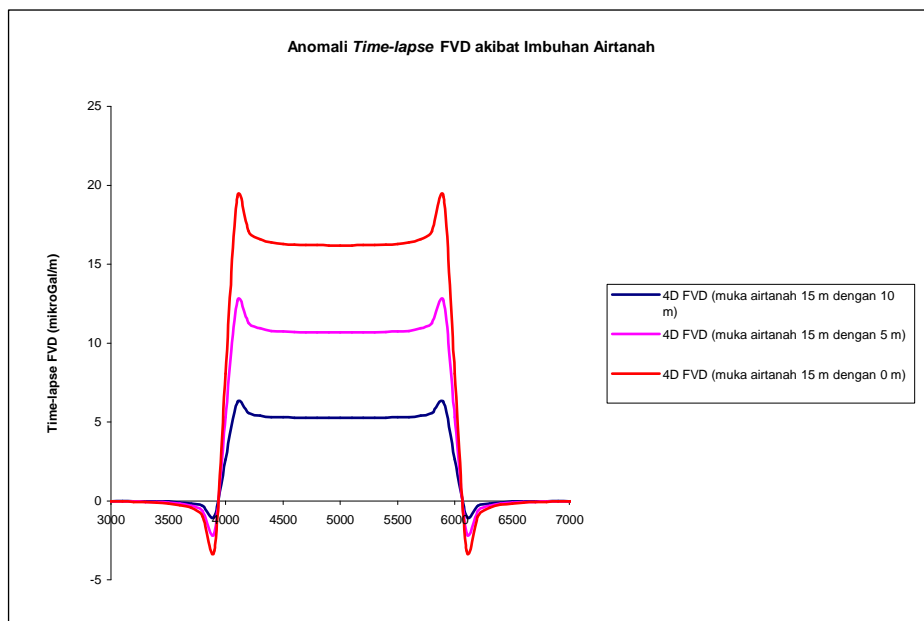
Respon anomali *time-lapse FVD* akibat imbuhan airtanah adalah kebalikan dari proses penurunan muka airtanah, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 2. Respon Gaya berat akibat Penurunan muka airtanah



Gambar 3. Anomali Time-lapse FVD akibat Penurunan muka airtanah



Gambar 4. Anomali Time-lapse FVD akibat Imbuan airtanah

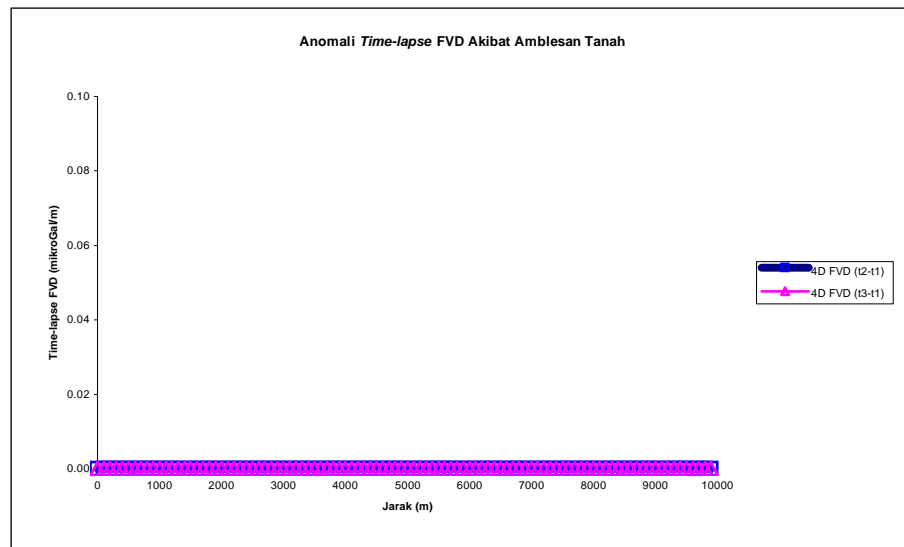
### Simulasi time-lapse FVD Akibat Amblesan Penurunan Tanah

Jika dua pembacaan gayaberat dibandingkan pada suatu stasiun pada  $t_1$  dan  $t_2$ , dimana pada  $t_1$  belum terjadi amblesan dan  $t_2$  setelah terjadi amblesan tanah sebesar  $\Delta z$ , maka nilai gayaberat pada  $t_2$  lebih besar karena perubahan elevasi sebesar  $\Delta z$  tersebut. Selama amblesan tanah tidak terjadi kehilangan material (massa) yang berpindah;

amblesan tanah hanya efek kompresi pada material dibawahnya. Oleh karena itu, efek dari amblesan tanah pada perubahan gayaberat ( $\Delta g$ ) didekati oleh<sup>6</sup>:

$$\delta g' = -\Delta z \cdot 0.30876 \text{ miligal/m}$$

Karena pengukuran pada  $t_1$  dan  $t_2$  dilakukan di permukaan tanah dimana sebelum dan setelah terjadi amblesan tanah, maka respon *time-lapse FVD* akibat amblesan tanah ditunjukkan adalah nol (Gambar 5).



Gambar 5. Anomali *Time-lapse* FVD Akibat Amblesan Tanah

### Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi di atas dapat diringkas pada tabel di bawah ini :

Tabel 1. Ringkasan Hasil Simulasi

No	Kejadian	Gayaberat	FVD	Time-lapse FVD
1.	Penurunan muka airtanah	Lebih kecil	Lebih kecil & positif	Negatif
2.	Imbuhan Airtanah	Lebih besar	Lebih besar & positif	Positif
3.	Amblesan	Lebih besar	Konstan	Nol
4.	Penurunan muka airtanah + amblesan	Lebih kecil	Lebih kecil & positif	Negatif
5.	Imbuhan airtanah + amblesan	Lebih besar	Lebih besar + positif	Positif

Hasil simulasi di atas memperlihatkan bahwa pengurangan massa airtanah atau perubahan kedalaman airtanah dibawah permukaan mengakibatkan respon gayaberat yang lebih kecil, FVD lebih kecil dan *time-lapse FVD* negatif (Gambar 3). Hal ini karena pengurangan airtanah menyebabkan berkurangnya rapat massa akuifer airtanah sebesar rapat massa air (fluida) pengisi akuifer dikalikan dengan porositas batuan akuifer airtanah ( $\phi \cdot \rho_f$ ). Sedangkan imbuhan

airtanah memberikan respon *time-lapse FVD* positif (Gambar 4), hal ini terkait dengan imbuhan airtanah pada akuifer tersebut yang menyebabkan bertambahnya rapat massa akuifer airtanah. Amblesan permukaan tanah memberikan respon gayaberat yang lebih besar, sebesar perubahan elevasi ( $\Delta z$ ) dikalikan dengan koreksi udara bebas (0,308765 mgal/m). Tetapi karena pengukuran untuk periode setelah terjadi amblesan dilakukan pada permukaan tanah yang

juga mengalami perubahan elevasi, maka gradien vertikalnya hanya disebabkan oleh interval gradien yang diberikan, sehingga FVD amblesan adalah konstan. Hal ini akan memberikan *time-lapse FVD* sama dengan nol (Gambar 5).

Demikian juga karena *time-lapse FVD* akibat amblesan sama dengan nol maka kejadian yang berlangsung secara bersamaan antara penurunan muka airtanah dengan amblesan atau imbuan airtanah dengan amblesan akan memberikan anomali *time-lapse FVD* yang sama dengan penurunan muka airtanah atau imbuan airtanah saja. Hal ini berarti pula bahwa amblesan dan perubahan permukaan tanah lainnya tidak dapat ditunjukkan oleh anomali *time-lapse FVD*.

Sebagai studi kasus hasil simulasi ini akan digunakan untuk menafsirkan anomali gradien-vertikal gayaberat pada dataran aluvial Semarang. Survey gayaberat di Semarang telah dilakukan sebanyak 2 kali yaitu pada bulan September 2002 dan bulan Juni 2003. Sebanyak 40 titik pengamatan gayaberat telah diukur dengan tiap titik diukur respon gayaberatnya pada tiga ketinggian yang berbeda. Peta anomali *time-lapse FVD* untuk periode Juni 2003 – September 2004 ditunjukkan pada Gambar 6.

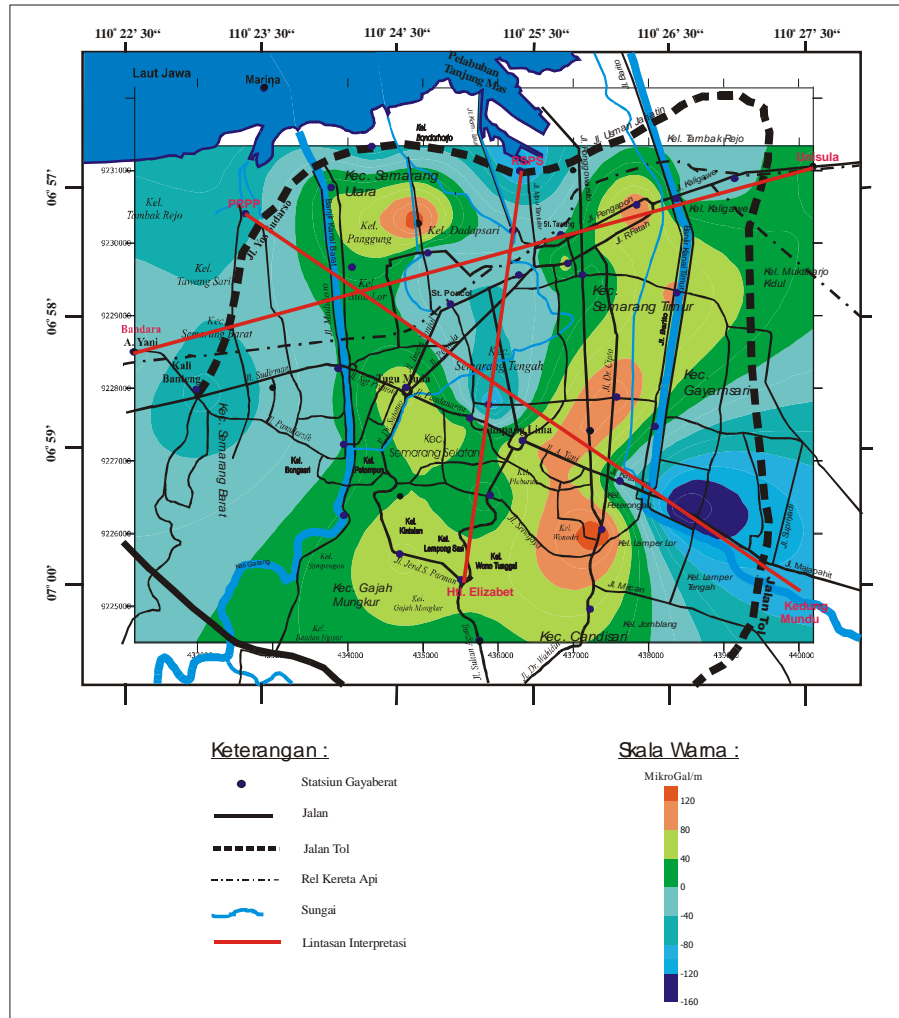
Peta Anomali *time-lapse FVD* Periode Juni 2003-September 2002, diperoleh dengan mengurangi Anomali FVD Juni 2003 dengan Anomali FVD September 2002. Dari simulasi telah dibuktikan bahwa pengurangan massa air (penurunan muka air tanah) ditunjukkan dengan harga *time-lapse FVD* negatif besar, imbuan airtanah ditunjukkan oleh anomali *time-lapse FVD* positif besar, dan batas-batas anomali ditunjukkan oleh harga mendekati nol.

Peta Anomali *time-lapse FVD* periode Juni 2003 – September 2002 menampakan bahwa :

1. Anomali *time-lapse FVD* negatif tinggi (-80 s/d -160 mikroGal/m), menunjukkan penurunan muka airtanah yang besar. Keadaan ini terjadi di kawasan pusat kota (Kec. Semarang Tengah), pelabuhan Tanjung Mas, dan kawasan Pandean Lamper-Kedung Mundu.
2. Anomali *time-lapse FVD* negatif rendah (0 s/d - 80 mikrogal/m), menunjukkan penurunan muka air sedang atau penurunan muka air terjadi pada reservoir dalam. Terjadi disekitar daerah Hotel Siranda dan kawasan Simpang Lima, sebagian kawasan Stasiun Poncol, Stasiun Tawang. Selain itu kawasan sebelah barat Kali Garang dan Banjir Kanal Barat Mulia dari kawasan Bongsari, Kali Banteng menerus ke utara yaitu kawasan PRPP dan juga kawasan industri Kaligawe.
3. Anomali *time-lapse FVD* positif, menunjukkan terjadi imbuan airtanah. Imbuan airtanah dapat berasal dari *recharge area* dari perbukitan di atasnya, intrusi air laut dan imbuan dari sungai (*influent stream*).
4. Kawasan yang imbuhan stabil diperkirakan terjadi pada kawasan Candi Atas, dimana airtanah disuplai dari daerah perbukitan di atasnya, karena kemiringannya cukup curam sehingga terjadi imbuan secara stabil. Kawasan tersebut meliputi sebagian besar kawasan Kec. Gajah Mungkur dan Kec. Semarang Selatan. Sedangkan zona positif untuk daerah yang lebih utara (Semarang Bawah) diperkirakan lebih banyak dikontrol oleh imbuan dari dua sungai besar, yaitu di bagian barat oleh Kali Garang, Banjir Kanal Barat, dan disebelah timur oleh Banjir Kanal Timur juga intrusi air laut.

Anomali *time-lapse FVD* negatif ini secara umum terkait langsung dengan pola pengambilan airtanah di daerah tersebut, misalnya untuk kebutuhan

industri, perkantoran, perumahan dan PDAM yang tersebar di daerah Semarang.



Gambar 6. Peta Anomali *time-lapse FVD* Periode Juni 2004-September 2002

### Kesimpulan

Pengukuran gayabarat secara berulang dapat digunakan untuk mengetahui adanya dinamika air tanah di bawah permukaan. Pengurangan air tanah akan menurunkan nilai respon gayabarat dan penambahan air tanah akan meningkatkan respon gayabarat yang terukur.

Metode Turunan Vertikal Pertama anomali gayabarat mikro-4D, merupakan

salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mengetahui adanya dinamika air tanah. Dari simulasi menunjukkan bahwa adanya pengurangan air tanah atau penurunan muka air tanah akan memberikan respon *time-lapse FVD* negatif, dan sebaliknya imbuan atau kenaikan muka air tanah akan memberikan respon yang positif. Sedangkan perubahan permukaan tanah memberikan respon *time-lapse FVD* nol.

Berdasarkan analisa Peta *time-lapse FVD* Periode Juni 2003- September 2002 daerah Semarang dapat ditarik beberapa hal yang menarik sehubungan dengan dinamika air tanah, yaitu :

1. Daerah dengan penurunan muka air tanah tinggi pengambilan air tanah yang berlebihan meliputi daerah: pusat kota (Kec. Semarang Tengah), Pelabuhan Tanjung Mas dan kawasan Pandean Lamper- Kedung Mundu.
2. Daerah yang mengalami penurunan muka air tanah yang sedang meliputi daerah: Simpang Lima, Kec. Semarang Tengah sebagai Pusat Kota yang memanjang ke kawasan Stasiun Poncol, Stasiun Tawang. Selain itu kawasan sebelah barat Kali Garang dan Banjir Kanal Barat mulia dari kawasan Bongsari, Kali Banteng menerus ke utara yaitu kawasan PRPP dan juga kawasan industri Kaligawe.
3. Daerah RS. Kariadi, kawasan Candi, Gajah Mungkur dan Lempong Sari merupakan daerah yang relatif tidak mengalami penurunan muka air tanah.

#### Daftar Pustaka

1. Allis, R.G, T.M, Hunt. 1986. Analisis of Exploration-induced gravity changes at Wairakei geothermal Field. *Geophysics*, 51, p. 1647-1660
2. Andres, R.B.S and J.R. Pedersen. 1983. Monitoring the Bulalo geothermal reservoir, Philipines, using precession gravity data. *Geothermics*, 22
3. Akasaka, C and Nakanishi, S, 2000. Correction of Background gravity change due to precipitation ; oguni geothermal Field, Japan. *Proceeding World Geothermal Congress*, Kyushu – Tohoku, Japan.
4. Gelderen, M.V., Haagmans, R., and Bilker, M., 1999. Gravity change and natural gas extraction in Groningen. *Geophysical Prospecting*, 47.
5. Hare, J.L. Ferguson, J.F. Aiken, C.L.V. and Brady, J.L. 1999. The 4-D microgravity method for waterflood surveillance: A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska. *Geophysics*, Vol. 64 No. 1 (January-February 1999)
6. Hochstein, M.P., and Soengkono, S. 1997. *Geothermal Exploration for Earth Scientists*, Geothermal Institute, The University of Auckland.
7. Kadir, W.G.A. 2003. *Studi Amblesan Permukaan Tanah dan Dinamika Air Tanah di Dataran Aluvial Semarang-Jawa Tengah dengan Menggunakan Metoda Microgravity 4D*, Laporan RUT (tidak Dipublikasikan), Bandung.
8. Notosiswoyo, S. 1997. Studi Pengaruh Eksploitasi Airtanah Terhadap Muka Airtanah Di Dataran Semarang, *Jurnal Teknologi Mineral*, No.1, Vol. IV, p. 17-30.
9. Rymer, H and Jones, G.W. 2000. Volcanic eruption predicture : magma chamber physics from gravity and deformation measurements. *Geophysical Research Letter*, Vol. 27 No. 16.
10. Schon, J.H. 1996. *Physical Properties of Rocks; Fundamental Theory and Principels of Petrophysics*. Permag-non, Tokyo.
11. Styles, P. 2003. *The use of time lapse microgrvity to investigate and monitoring an area undergoing surface subsidence; a case study*. Un published.
12. Sumaryo. 1997. Hubungan Penurunan Muka Air Tanah dengan Penurunan Muka Tanah di Wilayah DKI Jakarta, *Tesis*, Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.