

Analisis Perubahan Densitas Bawah Permukaan Berdasarkan Data Gaya Berat Mikro Antar Waktu, Studi Kasus Di Semarang

M. Ahganiya Naufal, Supriyadi*

Program Studi Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang

E-mail: Ahganiya@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan penelitian gaya berat antar waktu di wilayah Kota Semarang untuk mengetahui dinamika air tanah. Metode gaya berat antar waktu dapat diaplikasikan untuk mengetahui perubahan air tanah karena pada dasarnya metode gaya berat antar waktu mendeteksi perubahan gaya berat akibat perubahan rapat massa. Pengukuran gaya berat antar waktu dilakukan sebanyak tiga periode yaitu periode Mei 2013 dan periode Mei 2014 dengan menggunakan gravimeter Scintrex Autograv CG-5. Citra yang dihasilkan dari penelitian ini berupa persebaran data gaya berat antar waktu dan hasil inversi perubahan densitas dalam rupa 3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai perubahan densitas positif pada kedalaman 30 meter terdapat pada daerah Barusari, Mugassari, Bulu, Kalibanteng, Simpang Lima, dan Tugu Muda yang terindikasi terjadi penambahan air tanah dangkal sementara pada daerah Bandarharjo, Panggung Lor, Kuningan, Dadapsari dan Tanjung Emas yang merupakan penanda peristiwa intrusi air laut pada kedalaman 30 meter dan pada daerah Krobokan, Tawangmas, Panggung Lor, Bandarharjo, Kemijen, Mlatiharjo, Rejosari, Bulu Lor, Bangunharjo, Kranggan, Purwodinatan dan Karangampel merupakan daerah dengan nilai perubahan densitas negatif yang diduga terjadi pengurangan air tanah dangkal. Pada kedalaman 140 meter, bagian barat daya hingga selatan lokasi penelitian telah mengalami pengurangan air tanah sedangkan bagian barat-utara-timur penelitian, sebagian besar telah mengalami penambahan air tanah.

Kata kunci : gaya berat, antar waktu, air tanah, perubahan densitas.

PENDAHULUAN

Air tanah merupakan salah satu sumber daya alam yang paling sering digunakan oleh makhluk hidup salah satunya adalah manusia. Air tanah seringkali digunakan sebagai air minum dan kebutuhan sehari-hari dan industri. Kebutuhan air tanah meningkat seiring bertambah jumlah penduduk. Meningkatnya kebutuhan air tanah dapat menyebabkan akuifer pada suatu daerah menjadi defisit sehingga timbul permasalahan intrusi air laut dan amlbesan tanah. Perubahan air tanah perlu dideteksi untuk menghindari akibat dari pengurangan air tanah. Salah satu metode yang dapat mendeteksi perubahan jumlah air tanah adalah dengan metode gaya berat.

Metode gaya berat dilandasi oleh hukum Newton tentang gravitasi yang menyatakan gaya tarik-menarik kedua benda bermassa sebanding

dengan perkalian kedua massa benda tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda. Perbedaan nilai percepatan gaya berat pada suatu daerah dipengaruhi oleh perbedaan rapat massa batuan dan ketinggiannya. Apabila suatu daerah memiliki tinggi muka tanah yang relatif datar, maka perbedaan nilai percepatan gaya berat pada suatu daerah dipegaruhi oleh rapat massa batuan. Keaneekaragaman rapat massa batuan menandakan adanya struktur geologi, ketidakhomogenan jenis batuan pada suatu daerah, porositas batuan dan fluida yang terdapat pada batuan. Darharta (2007) berpendapat bahwa metode gaya berat dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan rapat massa pada akuifer akibat perubahan kandungan air tanah karena metode gaya berat pada prinsip dasarnya adalah mendeteksi perubahan rapat massa dan jarak. Metode gaya berat antar waktu

dapat diaplikasikan untuk mengetahui perubahan massa bawah permukaan tanah pada selang periode pengukuran.

$$g = G \frac{m}{r^2} \quad (1)$$

Metode gaya berat antar waktu merupakan pengukuran gaya berat yang dilakukan berulang kali pada beberapa periode pada lokasi yang sama. Gravimeter yang memiliki ketelitian dalam orde mikro dan altimetri dalam orde millimeter dibutuhkan untuk mendukung dalam pengukuran metode gaya berat antar waktu (Sarkowi, 2005). Jika pengukuran gaya berat dilakukan pada periode yang berbeda dengan lokasi yang sama, maka perubahan nilai percepatan gaya berat yang terukur pada selang periode pengukuran dipengaruhi oleh perubahan struktur batuan perubahan fluida yang terdapat pada batuan. Dengan menerapkan Persamaan (1) pada periode pengukuran t_1 dan t_2 yaitu periode awal dan periode selanjutnya diperoleh

$$g(t_1) = G \frac{m_1}{r^2} \quad (2)$$

dan

$$g(t_2) = G \frac{m_2}{r^2} \quad (3)$$

dengan G adalah konstanta gravitasi, sehingga selisih nilai gaya berat pada selang periode pengukuran dengan asumsi jarak antar kedua benda tetap

$$\Delta g(\Delta t) = G \frac{m_2}{r^2} - G \frac{m_1}{r^2} \quad (4)$$

$$\Delta g(\Delta t) = G \frac{\Delta m}{r^2} \quad (5)$$

Metode gaya berat antar waktu dapat digunakan untuk monitoring perilaku reservoir hidrokarbon (Hare dkk., 1999; Santoso dkk., 2004), panas bumi (Allis dan Hunt, 1986; Fujimitsu dkk., 2000), amblesan dan perubahan muka air tanah (Branston dan Styles, 2000; Kadir dkk., 2004; dan Santoso dkk., 2006).

Koreksi Data Gaya Berat

Nilai yang terukur pada metode gaya berat merupakan nilai percepatan gaya berat total. Faktor yang mempengaruhi nilai gaya berat adalah kelelahan alat, letak astronomi benda angkasa, posisi geografis lokasi pengukuran, ketinggian lokasi pengukuran dan rapat massa batuan/geologi. Data gaya berat perlu dilakukan koreksi terhadap faktor-faktor tersebut agar diperoleh nilai gaya berat akibat rapat massa batuan/geologi. Anomali Bouguer Lengkap mencerminkan nilai gaya berat yang dipengaruhi oleh faktor rapat massa batuan yang didefinisikan sebagai berikut.

$$g_{ABL} = g_{OBS} - g_T + g_{FAC} - g_B + g_{Ter} \quad (6)$$

dengan g_{OBS} adalah nilai gaya berat observasi yang telah terkoreksi faktor kelelahan alat, peristiwa pasang surut dan tinggi alat pada permukaan tanah. g_T adalah nilai gaya berat teoritis pada posisi lintang (koreksi lintang). g_{FAC} adalah nilai gaya berat akibat ketinggian lokasi pengukuran (koreksi udara bebas). g_B adalah koreksi Bouguer yaitu nilai gaya berat akibat ketinggian lokasi pengukuran dengan memperhitungkan massa. g_{Ter} adalah nilai gaya berat akibat adanya perbedaan ketinggian pada sekitar lokasi pengukuran (koreksi medan).

Pengukuran metode gaya berat antar waktu mengukur setiap stasiun sebanyak dua kali atau lebih pada periode yang berbeda. Jika t_1 dan t_2 adalah periode awal dan periode selanjutnya, maka Anomali Bouguer Lengkap untuk masing-masing periode adalah sebagai berikut:

$$g_{ABL}(t_1) = g_{OBS}(t_1) - g_T(t_1) + g_{FAC}(t_1) - g_B(t_1) + g_{Ter}(t_1) \quad (7)$$

dan

$$g_{ABL}(t_2) = g_{OBS}(t_2) - g_T(t_2) + g_{FAC}(t_2) - g_B(t_2) + g_{Ter}(t_2) \quad (8)$$

sehingga persamaan Anomali Bouguer Lengkap antar waktu adalah

$$g_{ABL}(\Delta t) = g_{OBS}(\Delta t) - g_T(\Delta t) + g_{FAC}(\Delta t) - g_B(\Delta t) + g_{Ter}(\Delta t) \quad (9)$$

Persamaan (9) menunjukkan selisih anomali Bouguer lengkap pada periode yang berbeda. Pengukuran antar waktu berada pada lokasi yang sama sehingga nilai g_T dapat diabaikan karena posisi lintang antar waktu adalah sama. Nilai g_{FAC} , g_B dan g_{Ter} terdapat faktor perubahan ketinggian pengukuran (Δh). Jika Δh relatif kecil (mendekati nol), maka nilai g_{FAC} , g_B dan g_{Ter} dapat diabaikan. Sehingga Persamaan (4) menjadi:

$$g_{ABL}(\Delta t) = g_{OBS}(\Delta t) \quad (10)$$

Sehingga

$$\Delta g(\Delta t) = g_{OBS}(t_2) - g_{OBS}(t_1) \quad (11)$$

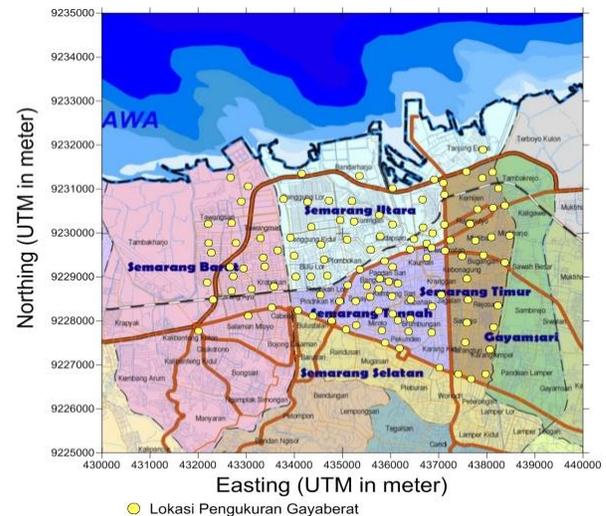
Nilai g_{OBS} pada t_1 digunakan sebagai acuan awal. Persamaan (11) menunjukkan bahwa perubahan nilai gaya berat pada selang periode pengukuran diperoleh dari selisih nilai gaya berat observasi yang telah terkoreksi oleh faktor kelelahan alat, peristiwa pasang surut dan ketinggian alat terhadap permukaan tanah. Sehingga perubahan nilai gaya berat pada selang periode pengukuran dipengaruhi oleh perubahan massa pada bawah permukaan tanah. Anomali nilai yang didapatkan pada nilai gaya berat antar waktu berupa nilai gaya berat negatif yang mengindikasikan pengurangan massa, nilai gaya berat positif yang mengindikasikan penambahan massa dan gaya berat bernilai 0 yang mengindikasikan tidak ada perubahan massa. Perubahan massa pada bawah permukaan tanah disebabkan oleh dinamika fluida dengan asumsi struktur batuan tidak berubah.

METODE PENELITIAN

Penelitian dinamika air tanah dengan menggunakan metode pengukuran gaya berat antar waktu dilakukan di kota Semarang khususnya pada Semarang bagian utara (Gambar 1). Penelitian dilakukan pada periode Mei 2013 dan periode Mei 2014. Pada penelitian ini menggunakan alat *gravimeter Scintrex Autograv CG-5* dengan ketelitian alat $1 \mu\text{Gal}$ ($1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$). Nilai gaya berat antar waktu diperoleh dengan mengurangkan nilai gaya berat periode

Mei 2014 dengan nilai gaya berat periode Mei 2013.

Nilai perubahan densitas diperoleh dengan menggunakan teknik inversi. Inversi data gaya berat antar waktu menggunakan perangkat lunak *Grav3D*. Perubahan densitas yang diperoleh menggunakan teknik inversi merupakan perubahan nilai densitas berdasarkan data gaya berat antar waktu.



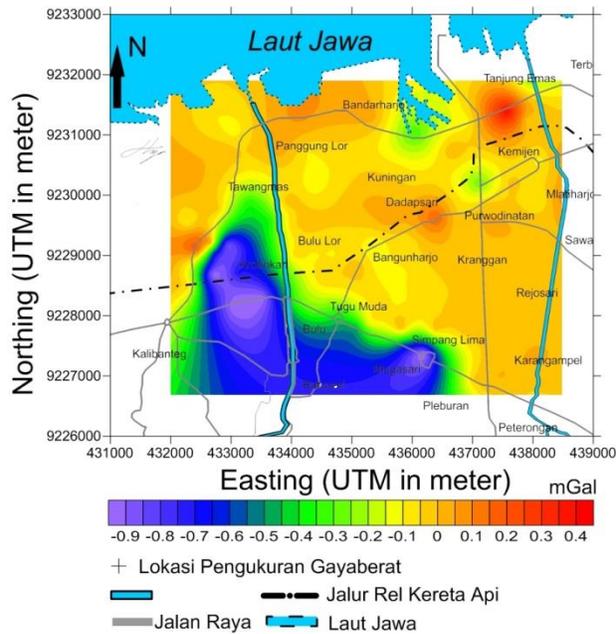
Gambar 1. Lokasi Pengukuran Gaya Berat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemantauan dinamika air tanah di Kota Semarang menggunakan data gaya berat antar waktu yang dilakukan pada periode Mei 2013 dan periode Mei 2014. Pada penelitian ini, periode Mei 2013 digunakan sebagai acuan awal untuk memperoleh nilai gaya berat antar waktu. Gambar 2 merupakan selisih nilai gaya berat periode Mei 2014 dengan periode Mei 2013.

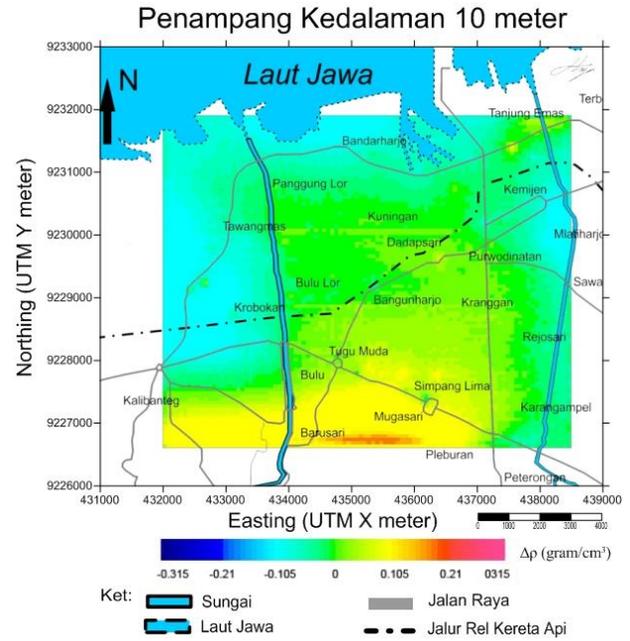
Selisih nilai gaya berat periode Mei 2013 dengan periode Mei 2014 memiliki nilai berkisar $0,4 \text{ mGal}$ s.d. $-0,9 \text{ mGal}$. Anomali negatif berada pada daerah Krobokan, Bulu, Barusari, Mugassari, Kalibanteng, Simpang Lima, Tanjung Emas, Kuningan bagian utara, bagian utara Purwodinatan dan Tugu Muda ($-0,1 \text{ mGal}$ s.d. $-0,9 \text{ mGal}$). Daerah dengan nilai negatif diduga selama periode Mei 2013 – Mei 2014 mengalami pengurangan air tanah. Anomali positif ditemukan pada daerah Mlatiharjo, Tanjung Emas bagian selatan, Bandarharjo dan Dadapsari dengan nilai berkisar $0,1 \text{ mGal}$ s.d. $0,4 \text{ mGal}$. Daerah dengan

anomali positif diduga telah mengalami penambahan air tanah pada periode Mei 2013 – Mei 2014. Nilai 0 mGal meliputi Panggung Lor bagian utara, Kemijen, Rejosari, Purwodinatan dan Kranggan diduga selama periode Mei 2013 – Mei 2014 daerah tersebut tidak mengalami dinamika air tanah.



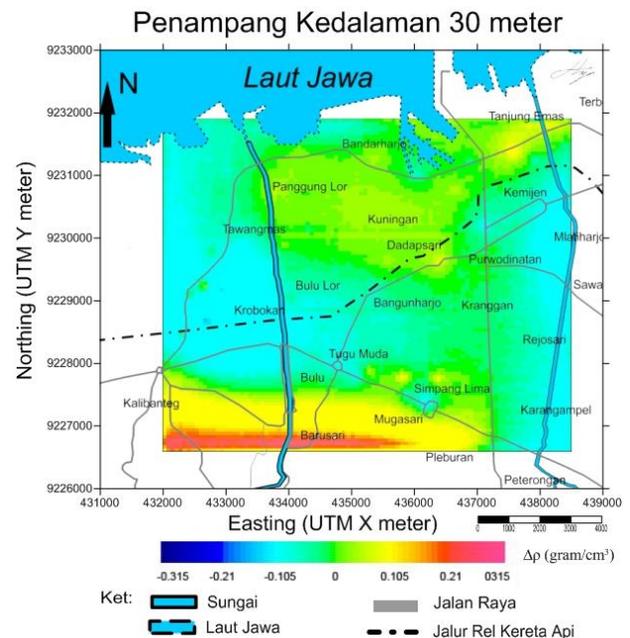
Gambar 2. Nilai gaya berat antar waktu (periode Mei 2013 – periode Mei 2014). Satuan gaya berat dalam mGal

Parameter yang diperoleh pada inversi data gaya berat antar waktu berupa perubahan densitas antar periode pengukuran dalam rupa 3D. Mesh yang digunakan memiliki ukuran 6500x5300x150 meter. Penampilan rupa 3D dalam makalah ini di tampilkan secara terpisah tiap kedalaman 10 meter (Gambar 3), kedalaman 30 meter (Gambar 4), kedalaman 80 meter (Gambar 5), kedalaman 110 meter (Gambar 6) dan kedalaman 140 meter (Gambar 7). Nilai perubahan densitas berdasarkan hasil inversi berkisar $0,315 \text{ g/cm}^3$ s.d. $-0,315 \text{ g/cm}^3$.



Gambar 3. Penampang densitas pada kedalaman 10 meter

Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan penampang densitas pada kedalaman 10 meter dan 30 meter dengan rentang nilai perubahan densitas $0,21 \text{ g/cm}^3$ s.d. $-0,105 \text{ g/cm}^3$. Akuifer pada kedalaman kurang dari 30 meter merupakan akuifer dangkal.



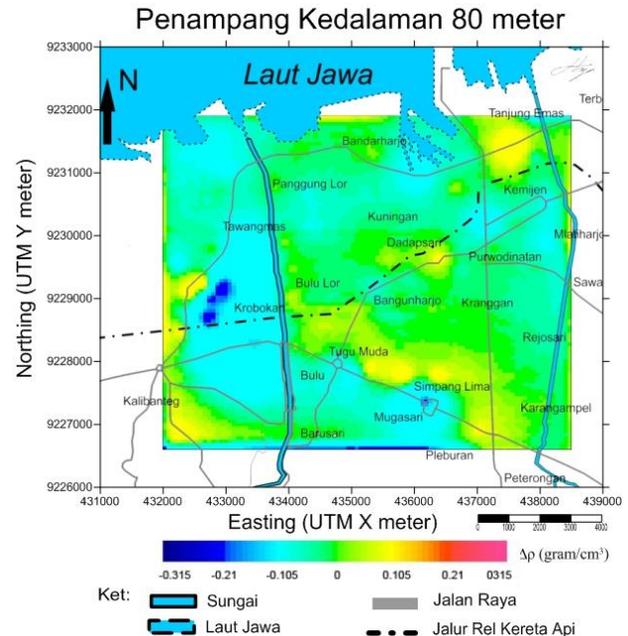
Gambar 4. Penampang densitas pada kedalaman 30 meter

Nilai perubahan densitas positif pada kedalaman kurang dari 30 meter ditemukan pada daerah selatan penelitian yaitu daerah Barusari, Mugassari, Bulu, Kalibanteng, Simpang Lima, dan Tugu Muda. Nilai perubahan densitas positif pada daerah tersebut diduga terjadi penambahan air tanah dangkal dengan ditemukannya nilai perubahan densitas $0,105 \text{ g/cm}^3$ s.d. $0,315 \text{ g/cm}^3$. Daerah Krobokan, Tawangmas, Panggung Lor, Bandarharjo, Kemijen, Mlatiharjo, Rejosari, Bulu Lor, Bangunharjo, Kranggan, Purwodinatan dan Karangampel merupakan daerah dengan nilai perubahan densitas negatif yang diduga terjadi pengurangan air tanah dangkal (nilai perubahan densitas $-0,105 \text{ g/cm}^3$). Nilai perubahan densitas 0 g/cm^3 ditemukan pada bagian tengah daerah penelitian yaitu pada daerah peralihan antara nilai perubahan densitas negatif dan nilai perubahan densitas positif. Daerah dengan nilai perubahan densitas 0 g/cm^3 mengindikasikan tidak terjadi perubahan massa pada kedalaman kurang dari 30 meter. Peristiwa penambahan air tanah pada daerah selatan penelitian dan pengurangan air tanah pada kedalaman 10 meter s.d. 30 meter berdasarkan asumsi bahwa porositas akuifer berkisar 10% s.d. 30% dengan densitas air tanah 1 g/cm^3 (Telford, 1990).

Pada kedalaman 10 meter s.d. 30 meter, perubahan densitas bernilai positif ditemukan pada daerah utara penelitian yang meliputi daerah Bandarharjo, Panggung Lor, Kuningan, Dadapsari dan Tanjung Emas dengan nilai perubahan densitas $0,105 \text{ g/cm}^3$. Perubahan densitas bernilai positif pada daerah utara penelitian diduga karena intrusi air laut dengan asumsi bahwa densitas air laut = 1.05 g/cm^3 (Telford, 1990) dan porositas pada akuifer sebesar 10%. Arah persebaran intrusi air laut pada kedalaman 30 meter berarah dari timur laut menuju ke barat daya.

Nilai perubahan densitas pada kedalaman 80 meter berkisar $-0,105 \text{ g/cm}^3$ s.d. $0,105 \text{ g/cm}^3$. Pada kedalaman 80 meter (Gambar 5) anomali negatif nampak mendominasi pada daerah penelitian. Anomali negatif meliputi daerah Purwodinatan, Kemijen, Bandarharjo, Panggung Lor, Tawangmas, Krobokan, Bulu, Bulu Lor, Barusari, Tugu muda, Kranggan, Rejosari dan Karangampel dengan nilai perubahan densitas

berkisar $-0,105 \text{ g/cm}^3$. Anomali positif (nilai perubahan densitas $0,105 \text{ g/cm}^3$) meliputi daerah Kalibanteng, Simpang Lima bagian utara, Dadapsari dan bagian selatan Tanjung Emas. Nilai perubahan densitas 0 g/cm^3 ditemukan pada daerah peralihan antara nilai perubahan densitas negatif dan nilai perubahan densitas positif. Daerah dengan nilai perubahan densitas 0 g/cm^3 mengindikasikan tidak terjadi perubahan massa pada kedalaman kurang dari 80 meter.



Gambar 5. Penampang densitas pada kedalaman 80 meter

Berdasarkan Gambar 5, kedalaman 80 meter diduga sebagai daerah peralihan antara akuifer dangkal dan dalam dengan ditandainya anomali negatif yang mendominasi daerah penelitian.

Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan penampang densitas pada kedalaman 110 meter dan 140 meter. Pada kedalaman tersebut merupakan daerah dengan akuifer dalam.

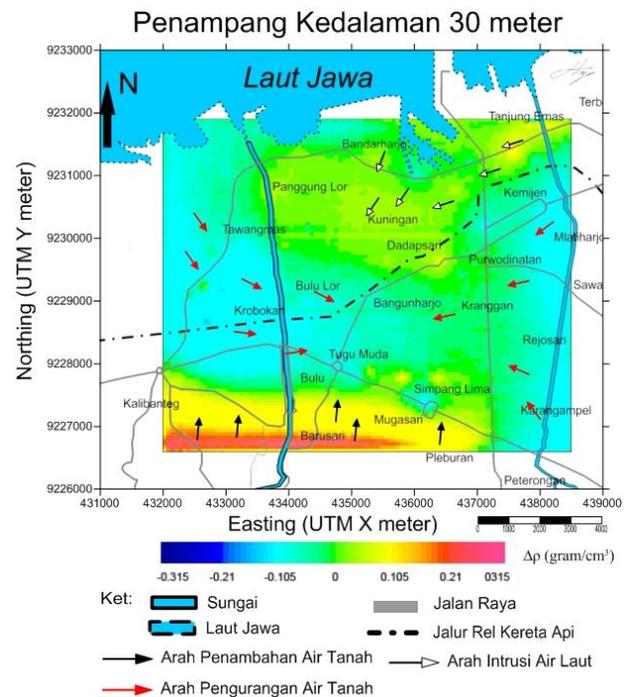
Nilai perubahan densitas pada kedalaman 110 meter berkisar $-0,315 \text{ g/cm}^3$ s.d. $0,315 \text{ g/cm}^3$. Anomali negatif (perubahan densitas $-0,315 \text{ g/cm}^3$ s.d. $-1,05 \text{ g/cm}^3$) sebagian besar ditemukan pada daerah barat daya penelitian yang meliputi daerah Krobokan, Kalibanteng, Tawangmas, Bulu, Barusari, Mugassari, Simpang Lima dan Tugu Muda. Anomali negatif juga ditemukan pada daerah Purwodinatan bagian utara, Tanjung Emas

Sedangkan persebaran nilai perubahan densitas negatif pada daerah Tanjung Emas berarah dari utara menuju ke arah selatan. Jika dikorelasikan dengan data gaya berat antar waktu (Gambar 2), daerah dengan anomali negatif telah mengalami pengurangan air tanah dalam.

Anomali positif ditandai dengan pola berwarna kuning hingga merah dengan nilai perubahan densitas $0,105 \text{ g/cm}^3$ s.d. $0,315 \text{ g/cm}^3$. Anomali positif tersebar pada daerah Tawangmas bagian barat, Panggung Lor, Bandharharjo, Bulu Lor, Kranggan, Dadapsari, Kuningan, Purwodinatan, Kemijen, Mlatiharjo, Rejosari dan Karangampel. Jika dikorelasikan dengan penampang densitas pada kedalaman 110 meter (Gambar 6), arah persebaran nilai perubahan densitas positif pada daerah Mlatiharjo, Kemijen, Purwodinatan, Rejosari, Karangampel berarah dari arah timur menuju ke arah barat. Daerah Kranggan pada Gambar 6 menunjukkan daerah tersebut bernilai 0 g/cm^3 . Jika dikorelasikan dengan Gambar 7, arah persebaran nilai perubahan densitas positif pada daerah Kranggan berasal dari daerah Purwodinatan, Rejosari dan Mlatiharjo. Sementara arah persebaran pada daerah Tawangmas bagian barat berarah dari arah barat menuju ke arah timur. Persebaran nilai perubahan densitas positif pada daerah Panggung Lor berasal dari arah barat laut dan arah utara (laut Jawa) sedangkan daerah Bulu Lor berasal dari arah barat laut. Persebaran nilai perubahan densitas positif pada daerah Bandharharjo berasal dari arah utara (laut Jawa) sedangkan daerah Kuningan dan Dadapsari berasal dari daerah barat dan arah timur lokasi penelitian. Skema lengkap arah persebaran nilai perubahan densitas pada kedalaman 30 meter dan 140 meter terdapat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Jika dikorelasikan dengan data gaya berat antar waktu (Gambar 2), daerah dengan anomali positif telah mengalami penambahan air tanah dalam.

Berdasarkan pembahasan pada Gambar 2 s.d. Gambar 9, perubahan nilai gaya berat dapat dihubungkan dengan peristiwa dinamika air tanah dengan asumsi penambahan dan pengurangan massa yang terjadi di kota Semarang disebabkan oleh dinamika air tanah. Kota Semarang khususnya bagian utara sebagian besar geologinya berupa endapan aluvial pantai (Thanden, 1996). Endapan aluvial pantai ini terdiri dari batuan lempung dan pasir (lapisan pembawa air).

Penambahan air tanah pada daerah penelitian memiliki dua kemungkinan yaitu penambahan air tawar dan intrusi air laut.



Gambar 8. Arah persebaran densitas kedalaman 30 meter

Berdasarkan asumsi bahwa porositas batuan berkisar 10% s.d. 30% dengan densitas air laut $1,05 \text{ g/cm}^3$ dan densitas air tawar 1 g/cm^3 , maka nilai perubahan densitas berkisar $0,105 \text{ g/cm}^3$ s.d. $0,315 \text{ g/cm}^3$ adalah sebagai penanda peristiwa penambahan air tawar maupun intrusi air laut. Gejala penambahan air tawar dan gejala intrusi air laut dapat dipisahkan berdasarkan arah persebarannya. Gejala intrusi air laut ditandai dengan arah persebaran dari nilai perubahan densitas positif yang berasal dari arah utara penelitian dengan mengingat bahwa penelitian berada di kota Semarang yang secara geografis berbatasan dengan Laut Jawa pada bagian utara kota Semarang. Sementara gejala penambahan air tawar ditandai dengan arah persebaran dari nilai perubahan densitas positif yang berasal dari arah barat, timur dan selatan daerah penelitian. Peristiwa pengurangan air tanah di kota Semarang disebabkan oleh pengambilan air tanah yang digunakan untuk keperluan rumah tangga dan

- Direktorat Geologi Tata Lingkungan,
Bandung.
- Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990.
Applied Geophysics Second Edition.
Cambridge University Press. New York.
- Thanden, R.E., Sumadirdja, H., Richards, P.W.,
Sutisna, K., Amin, T.C., 1996, *Peta Geologi
Lembar Magelang dan Semarang, Jawa*, Pusat
Penelitian dan Pengembangan Geologi,
Bandung.