

## Pemodelan Anomali Gravitasi Menggunakan Grablox untuk Identifikasi Injeksi Fluida pada Reservoir

Muhammad Zuhdi , Jannatin Ardhuha, Kosim, Wahyudi, Syahrial Ayub

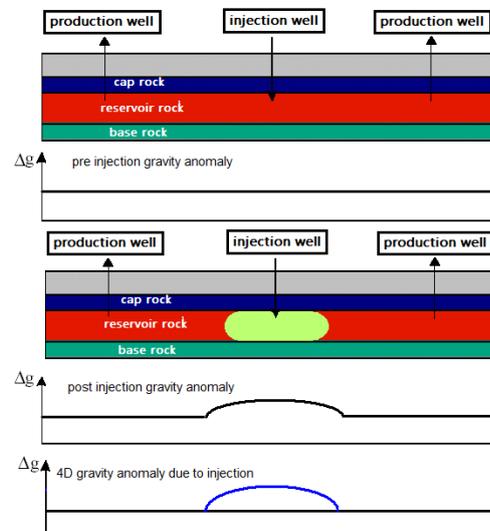
<sup>1</sup>Prodi Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Mataram, Jln. Majapahit no 62, Mataram, NTB, 83000

Email Korespondensi: [mzuhdi@unram.ac.id](mailto:mzuhdi@unram.ac.id)

| Article Info   | Abstract  |
|--|---|
| <p><b>Article History</b><br/>                     Received: October 2020<br/>                     Revised: December 2020<br/>                     Published: December 2020</p> <p><b>Keywords</b><br/>                     Grablox, Gravitasi 4D, Inversi, Reservoir</p>      | <p><b>Gravity Anomaly Modeling Using Grablox to Identify Fluid Injection in Reservoir.</b> The 4D microgravity method is a development of the gravity method with the time as the fourth dimension. This research was conducted to find a better way of interpreting the 4D gravity anomaly due to fluid injection around the reservoir. Researchers used GRABLOX for the interpretation of 4D anomalies around the reservoir. The results of the inversion of field data using GRABLOX provide the value of the injection fluid infiltration volume, which shows the distribution of the injection fluid movement on the reservoir. Another physical parameter that can be generated from GRABLOX with a modified value is the reduction in oil and gas saturation due to fluid injection. The inversion results using GRABLOX in the field data indicate a change in reservoir rock density up to 0.28 gr/cc associated with a reduction in gas and oil saturation. The reduction in gas saturation due to the injection fluid has the smallest value of 0% and the largest is up to 66%. The reduction in oil saturation only contributes to a density change of 20% of the reduction in gas saturation. The results of the GRABLOX trial on synthetic data and field data show that both can provide an identification of the movement of the injection fluid in the reservoir, as well as provide other physical parameters, ie. the reduction in oil saturation due to fluid injection.</p> |
| Informasi Artikel  | Abstrak   |
| <p><b>Sejarah Artikel</b><br/>                     Diterima: Oktober 2020<br/>                     Direvisi: Desember 2020<br/>                     Dipublikasi: Desember 2020</p> <p><b>Kata kunci</b><br/>                     Grablox, Gravitasi 4D, Inversi, Reservoir</p> | <p>Metoda gravitasi mikro 4D merupakan pengembangan metoda gravitasi dengan dimensi yang ke-empat adalah waktu. Penelitian ini dilakukan untuk menemukan cara yang lebih baik dalam interpretasi anomali gravitasi 4D akibat injeksi fluida disekitar reservoir. Peneliti menggunakan GRABLOX untuk interpretasi anomali 4D sekitar reservoir. Hasil inversi data lapangan menggunakan GRABLOX memberikan nilai volume infiltrasi fluida injeksi yang menunjukkan penyebaran pergerakan fluida injeksi pada reservoir. Parameter fisis lain yang dapat dihasilkan dari GRABLOX dengan modifikasi nilai adalah pengurangan saturasi minyak dan gas akibat injeksi fluida. Hasil inversi menggunakan GRABLOX pada data lapangan menunjukkan adanya perubahan densitas batuan reservoir hingga 0,28 gr/cc yang berhubungan dengan pengurangan saturasi gas dan minyak. Pengurangan saturasi gas akibat fluida injeksi memiliki nilai terkecil 0% dan terbesar hingga 66%. Pengurangan saturasi minyak hanya memberikan sumbangan perubahan densitas 20% dari pengurangan saturasi gas. Hasil uji coba GRABLOX pada data sintesis dan data lapangan menunjukkan bahwa keduanya dapat memberikan gambaran identifikasi pergerakan fluida injeksi di dalam reservoir, serta memberi parameter fisis lain yaitu pengurangan saturasi minyak akibat injeksi fluida.</p>   |
| <p><b>Sitasi:</b> Zuhdi, M., Ardhuha, J., Kosim, K., Wahyudi, W., &amp; Ayub, S. (2020). Pemodelan Anomali Gravitasi Menggunakan Grablox untuk Identifikasi Injeksi Fluida pada Reservoir. <i>Kappa Journal</i>, 4(2), 240-249.</p>  |   |

## PENDAHULUAN

Metoda gravitasi mikro 4D yang juga sering disebut dengan time lapse microgravity adalah pengembangan metoda gravitasi dengan dimensi yang ke-4 adalah waktu. Metoda ini dicirikan dengan pengukuran periodik baik secara bulanan, ataupun tahunan dengan menggunakan alat ukur gravitasi (gravimeter) dengan ketelitian yang sangat tinggi yang didukung oleh pengukuran posisi dengan ketelitian yang tinggi pula. Kelebihan dari metoda ini adalah operasional yang relatif sederhana dan ramah lingkungan (Reynolds, 1997).



Gambar 1: Model dan respon gravitasi 4D akibat injeksi fluida pada reservoir dengan rapat massa fluida injeksi lebih besar dari rapat massa fluida pengisi pori sebelumnya yaitu minyak dan air

Kebutuhan minyak dunia selalu meningkat dari waktu ke waktu, sementara ketersediaan minyak semakin menipis. Upaya untuk mencukupi kebutuhan minyak dilakukan dengan cara eksplorasi sumber minyak baru dan optimalisasi reservoir minyak yang telah berproduksi. Salah satu cara untuk meningkatkan produksi adalah dengan menginjeksi fluida ke dalam reservoir. Fluida ini akan bergerak menjauhi sumur injeksi dan mendorong minyak menuju sumur produksi sehingga produksi meningkat. Pada proses injeksi fluida, perubahan rapat massa fluida pengisi pori akan menimbulkan anomali gravitasi 4D yang merupakan selisih gravitasi pasca injeksi dengan nilai gravitasi sebelum injeksi. Gambar 1 menunjukkan model reservoir dan respon gravitasi 4D akibat injeksi gas dengan anomali 4D bernilai negatif karena fluida injeksi memiliki densitas lebih kecil dari fluida pengisi pori reservoir sebelum injeksi.

Injeksi gas berupa uap air pada reservoir melalui sumur minyak dapat meningkatkan produksi di sumur-sumur sekitarnya, dengan asumsi gas akan mendorong minyak menjauhi sumur injeksi menuju sumur produksi dengan arah radial. Dorongan ini akan menghasilkan akumulasi minyak yang bergerak menuju sumur produksi.

Metoda gravitasi 4D telah banyak digunakan untuk identifikasi dan monitoring perubahan massa di bawah permukaan. Metode ini dilakukan dengan berbagai keperluan seperti identifikasi reservoir dengan pengukuran di dasar laut hingga mendeteksi amblesan permukaan tanah akibat pengurangan massa di bawah permukaan.

Metoda gravitasi 4D telah banyak digunakan untuk identifikasi dan monitoring perubahan massa di bawah permukaan. Eiken dkk. (2004), menggunakan gravitasi mikro antar waktu, untuk memonitor produksi gas di reservoir bawah laut dengan gravimeter

berketelitian hingga 4 mikroGal. Gettings dkk. (2002), mengukur nilai gravitasi mikro 4D di sekitar sumber geothermal geysers untuk mendeteksi amblesan akibat perubahan massa selama masa produksi dengan laju amblesan  $2\pm 2$  mikroGal dan anomali 4D sebesar  $10\pm 8$  mikroGal. Rahman dkk. (2007) berhasil melakukan monitoring injeksi fluida pada reservoir di Sumatra Selatan menggunakan Metode Gravitasi 4D, dengan hasil analisa berupa kenaikan nilai gravitasi pada sumur injeksi (akibat injeksi air) dan penurunan nilai gravitasi di sekitar sumur produksi. Dafis dkk. (2008), mengukur anomali gravitasi 4D untuk memonitor laju injeksi air pada akuifer buatan artificial aquifer storage and recovery (ASR) di Leyden Colorado dengan hasil yang menunjukkan adanya korelasi positif antara laju injeksi air dengan laju kenaikan nilai gravitasi. Metoda ini terbukti sukses bahkan hingga dapat mendeteksi pergerakan air di dalam akuifer. Zuhdi dan Setiawan (2015) serta Zuhdi dkk (2018) melakukan pemodelan inversi gravitasi 4d injeksi gas pada reservoir minyak yang dilakukan dengan pemrograman Matlab.

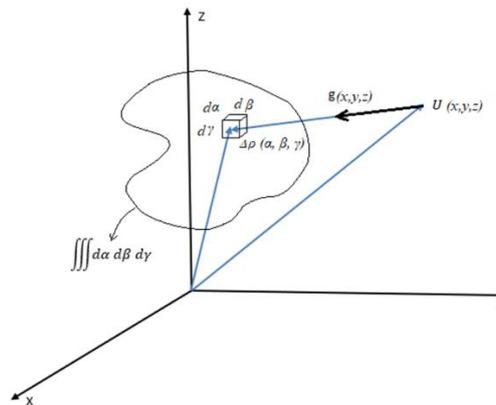
Metode inversi banyak dilakukan untuk analisa anomali gravitasi dengan asumsi penyebab anomali memiliki bentuk-bentuk geometri sederhana. Metode inversi 3 dimensi yang didasarkan pada potongan balok-balok kecil dapat dilakukan dengan paket program GRABLOX. Paket program GRABLOX ini akan dipakai untuk membantu analisis gravitasi 4D di sekitar reservoir.

Masalah utama pada penggunaan metode gravitasi 4D untuk identifikasi injeksi fluida pada reservoir adalah belum adanya metode yang cukup baik untuk mendeteksi pergerakan fluida dan batas kontak antara fluida injeksi dengan fluida pengisi pori sebelumnya. Hal ini dapat dilihat dari berbagai penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Penggunaan GRABLOX untuk interpretasi injeksi fluida pada reservoir juga belum pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Untuk mengatasi masalah tersebut maka dilakukan usaha untuk menyelesaikannya dengan menggunakan GRABLOX untuk identifikasi fluida injeksi pada reservoir.

GRABLOX adalah paket program interpretasi gravitasi dengan pemodelan inversi yang didasarkan pada model block 3 dimensi yang tersusun dari blok-blok kecil. Tujuan utama dari interpretasi gravitasi adalah untuk menentukan nilai kontras densitas dan bentuk geometri benda penyebab anomali. Pada penelitian ini GRABLOX digunakan sebagai alat interpretasi anomali gravitasi 4D akibat injeksi fluida pada reservoir.

Inversi data gravitasi menggunakan GRABLOX telah dilakukan secara luas. Shandini dan Tadjou (2012), menggunakan GRABLOX untuk identifikasi tumbukan lempeng Pan Africa dengan Camerun Craton. Dzakiya dan Sismanto (2014), melakukan pemodelan tiga dimensi (3D) menggunakan GRABLOX pada lapisan bawah permukaan bumi di subcekungan Jambi pada lapangan "Zuhro" berdasarkan analisis data anomali gravitasi. Atef dkk., (2016), menggunakan GRABLOX 1.7 untuk untuk interpretasi dan pemodelan gravitasi pada area panas bumi di teluk Suez, wilayah Sinai, Mesir.. Wibowo dkk., (2017), menggunakan GRABLOX untuk interpretasi model panas bumi di lapangan Coso, California. Titi dan Minarto, (2017), menggunakan GRABLOX untuk analisa data gravitasi dengan hasil 3 dimensi yang menunjukkan busur gunung api di Pulau Flores.

**METODE**



Gambar 2: Gravitasi di titik  $P(x, y, z)$  akibat elemen massa  $\rho(\alpha, \beta, \gamma)$

Apabila suatu massa 3 dimensi bentuk sembarang terdistribusi secara kontinu dengan selisih rapat massa  $\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ , sebagaimana gambar 2, maka potensial gravitasi di titik  $P(x, y, z)$  diatas dan di luar distribusi selisih rapat massa tersebut diberikan oleh :

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{1/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad 1)$$

Komponen gravitasi vertikal dan horisontal akibat distribusi rapat massa di atas diperoleh dengan mendiferensialkan persamaan 1 terhadap  $x, y,$  dan  $z$ , yang hasilnya adalah:

$$\Delta g_x(x, y, z) = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x} = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x - \alpha)}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad 2)$$

$$\Delta g_y(x, y, z) = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(y - \beta)}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad 3)$$

$$\Delta g_z(x, y, z) = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(z - \gamma)}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad 4)$$

Dari persamaan (4) tampak bahwa percepatan gravitasi  $g$  di permukaan bumi bervariasi dan nilainya tergantung pada distribusi massa di bawah permukaan yang dikontrol oleh bentuk geometri (struktur) dan rapat massa.  $G$  adalah konstanta gravitasi umum. Medan gravitasi  $g$  disebut juga percepatan gravitasi yang memiliki satuan dalam CGS yaitu Gal.

Menurut Kadir (1999), benda 3 dimensi dengan distribusi rapat massa  $\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ , memberikan efek gravitasi di titik  $P(x, y, z)$  pada permukaan dalam selang waktu tertentu ( $\Delta t$ ) diberikan oleh :

$$\Delta g_x(x, y, z, \Delta t) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta \rho(\alpha, \beta, \gamma, \Delta t)(z - \gamma)}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (5)$$

Pada persamaan (5) jika perubahan gravitasi terjadi akibat perubahan rapat massa saja dan tidak diikuti dengan perubahan geometri dan volume benda maka dapat didekati dengan:

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) \cong \kappa \cdot \Delta \rho(x, y, z, \Delta t) \quad (6)$$

Dengan  $\kappa$  adalah konstanta yang berhubungan dengan geometri dan volume benda anomali, sedangkan:

$$\Delta g(x, y, z, \Delta t) = g(x, y, z, t') - g(x, y, z, t) \quad (7)$$

adalah anomali gravitasi yang berhubungan langsung dengan adanya perubahan rapat massa sebagai akibat adanya perubahan material yang mengisi volume pori sumber anomali pada selang waktu tersebut. Sehingga jika diasumsikan semua volume pori terisi minyak pada waktu  $t$ , dan terjadi pengurangan minyak yang kemudian diganti oleh gas atau fluida lain pada waktu  $t'$ , maka perubahan rapat massanya (Schon, 1998) diberikan oleh persamaan:

$$\Delta \rho = \rho' - \rho = \Phi(\rho_f - \rho_m)(S_m - I) \quad (8)$$

dengan  $\rho_f$  dan  $\rho_m$  masing-masing adalah rapat massa fluida dan rapat massa minyak, sedangkan  $S_m$  adalah saturasi minyak yang didefinisikan perbandingan volume minyak  $V_m$  terhadap volume pori keseluruhan  $V_p$ , sedangkan  $\Phi$  adalah porositas total. Dengan memasukan persamaan (6) ke persamaan (8) maka diperoleh:

$$\Delta g = \kappa \Phi(\rho_f - \rho_m)(S_m - I) \quad (9)$$

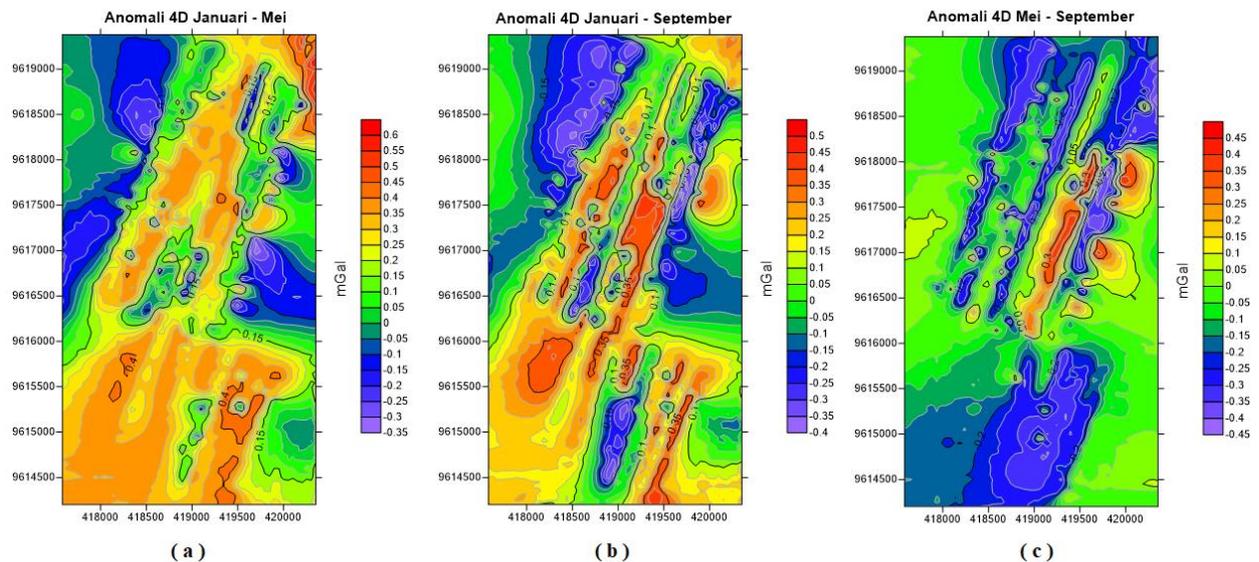
Kemudian dengan mengganti  $S_m$  dengan  $V_m/V_p$ , persamaan (9) menjadi:

$$\Delta g = \kappa \Phi(\rho_f - \rho_m)[(V_m/V_p) - I] \quad (10)$$

Anomali  $\Delta g$  akan bernilai negatif karena minyak dengan rapat massa tinggi digantikan dengan gas yang rapat massanya lebih rendah. Jika fluida yang di injeksikan memiliki densitas lebih besar, maka anomali 4D nya akan bernilai positif.  $V_m$  adalah minyak yang tersisa dalam volume pori keseluruhan, dan jika semua pori terisi oleh minyak maka  $V_m = V_p$ .

Pengukuran microgravity di lapangan ini dilakukan pada tiga tahap di Lapangan Minyak X. Tahap pertama yaitu pada bulan Januari 2003, tahap kedua dilakukan pada bulan Mei dan tahap ketiga dilakukan pada bulan September tahun 2003. Ada beberapa titik pengukuran gravitasi yang tidak melibatkan pengukuran ketinggian. Dari 3 tahap pengukuran ini didapatkan 3 anomali 4D, yaitu anomali periode Januari – Mei, periode Januari – September dan periode Mei-September. Interpretasi anomali dengan GRABLOX dilakukan pada 3 anomali 4D yaitu periode Januari – Mei, Januari – September dan Mei – September.

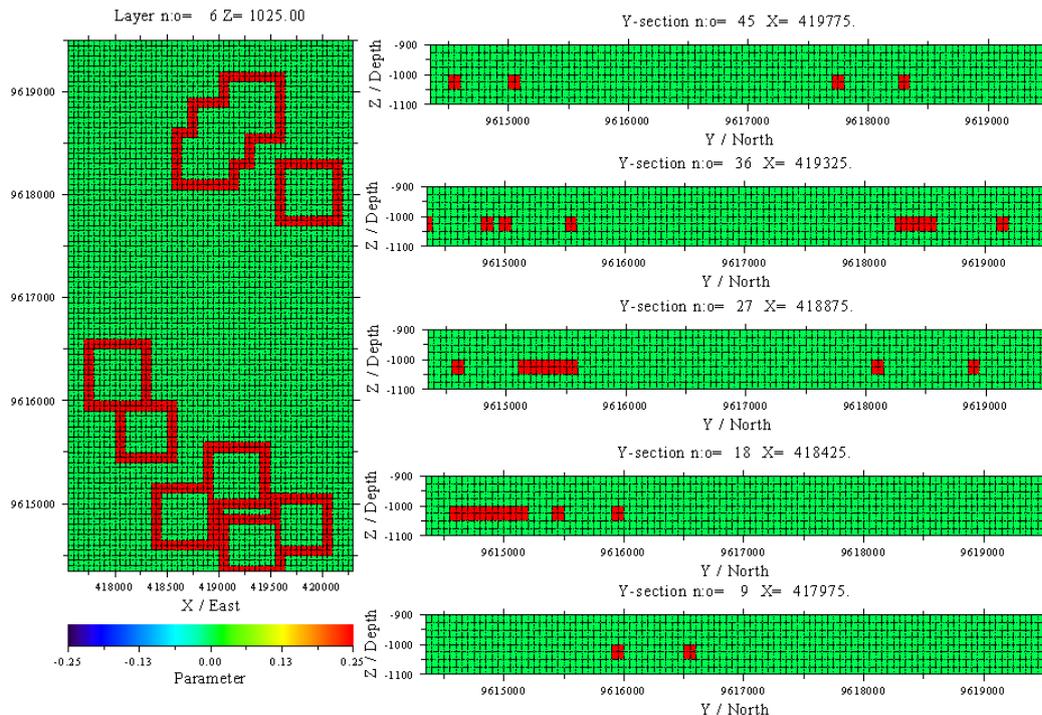
## HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 3: Anomali Gravitasi 4D pada periode (a) Januari hingga Mei (b) Januari hingga September (c) Mei hingga September

Gambar 3 adalah anomali gravitasi 4D yang merupakan hasil pengurangan anomali Bouguer tiap periode pengukuran. Gambar 3 (a) menunjukkan hasil pengukuran dan perhitungan anomali gravitasi 4D periode Januari hingga Mei. Gambar 3 (b) menunjukkan hasil pengukuran dan perhitungan anomali gravitasi 4D periode Januari hingga September, sedangkan gambar 3 (c) menunjukkan hasil pengukuran dan perhitungan anomali gravitasi 4D periode Mei hingga September. Ketiga anomali 4D ini kemudian diolah dan diproses dengan metode inversi menggunakan paket program GRABLOX.

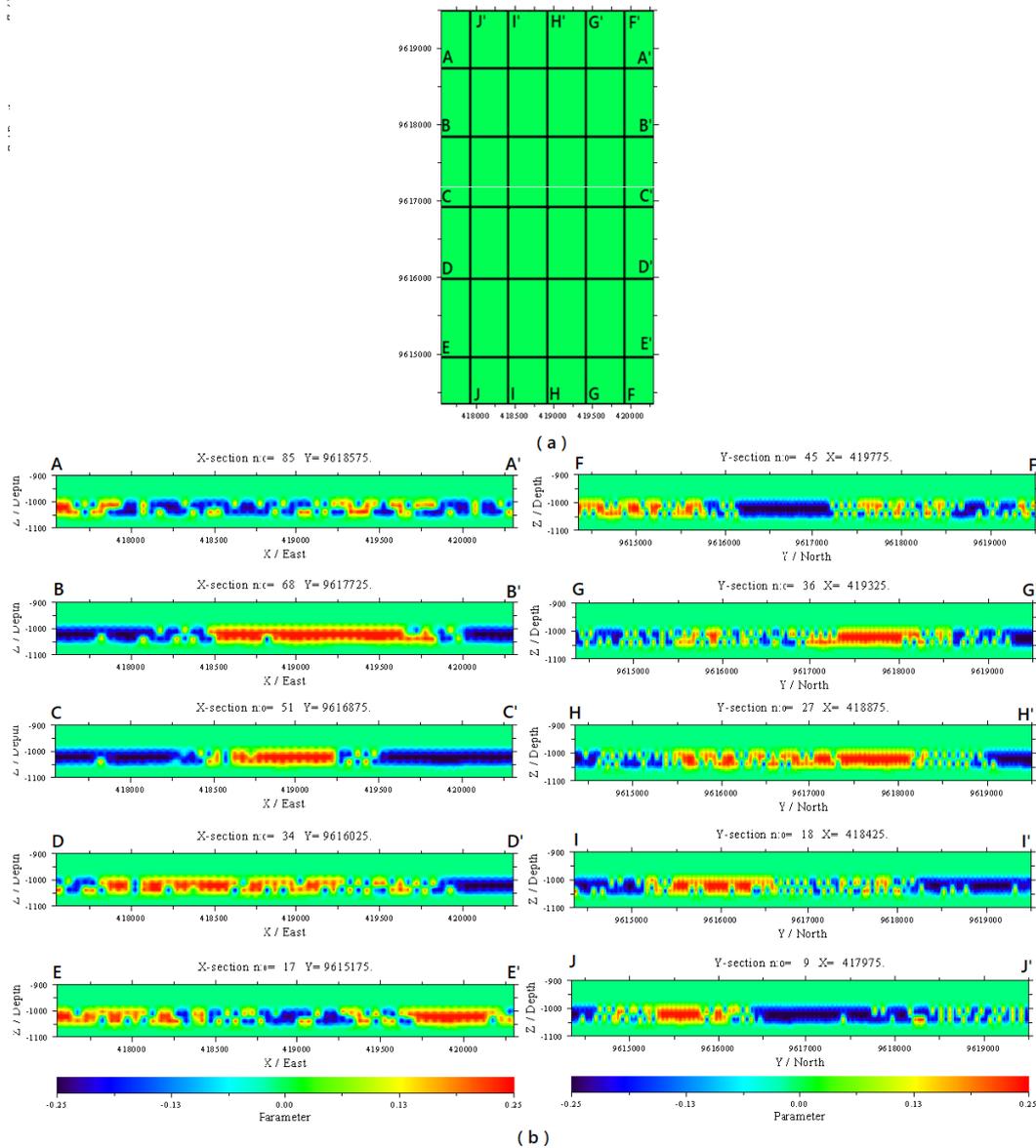
Gambar 4 menunjukkan model awal pergerakan fluida injeksi tampak atas pada kedalaman puncak 500 meter dengan jejari model tiap sumur injeksi dibuat sama. Volume model injeksi pada periode Mei – September adalah hasil selisih model injeksi Januari – September dikurangi dengan volume model injeksi Januari – Mei. Gambar terdiri dari sayatan horizontal dan vertikal. Nilai densitas latar pada model awal ini adalah 0 gr/cc, sedangkan densitas model sebesar 0,275 gr/cc didasarkan pada perhitungan perubahan maksimal densitas setelah injeksi sebesar 300g/cc.



Gambar 4: Model awal inversi akibat injeksi periode Mei hingga September tampak dari atas dan tampak dari samping

Ukuran luasan model pada gambar 4 sesuai dengan luasan daerah survei yaitu 1950 m x 3200 m yang terbagi dalam 39x64 blok minor, sehingga ukuran luasan horizontal tiap blok minor adalah 50 meter x 50 meter. Ketebalan total model adalah 200 meter yang dibagi dalam 10 grid sehingga tebal masing-masing blok bernilai 20 meter. Jumlah keseluruhan blok model yang dilibatkan dalam perhitungan adalah sejumlah 24.960 blok masing-masing dengan ukuran 50m x 50m x 20m. Jumlah blok minor yang ada di dalam blok utama menentukan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses inversi. Semakin kecil grid, maka resolusi hasil model akan semakin bagus. Harus dipertimbangkan bahwa semakin banyak jumlah blok mayor yang terlibat dalam inversi, maka proses inversi membutuhkan waktu yang lebih lama.

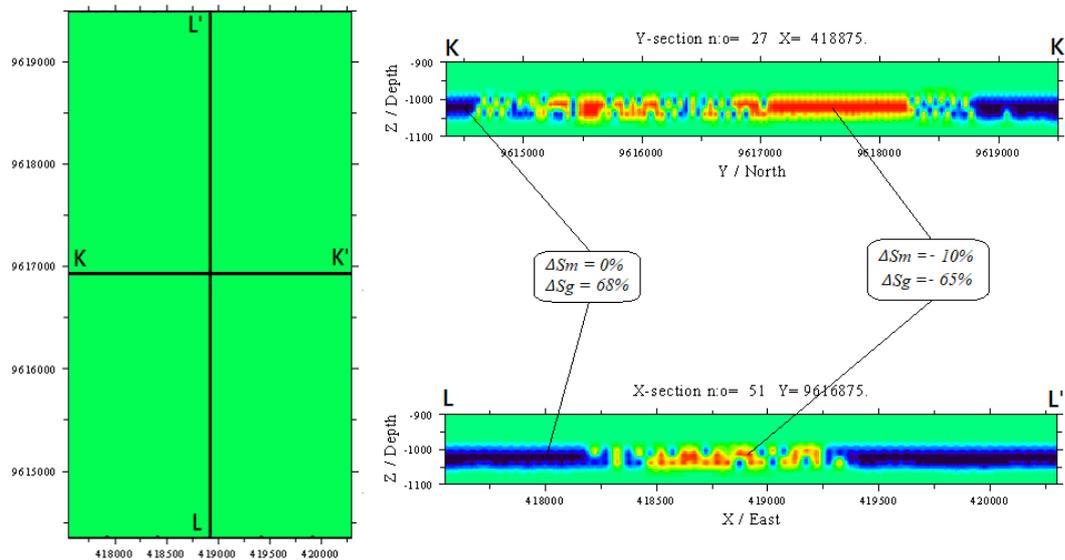
Data anomali gravitasi 4D periode Mei hingga September disimpan dalam file dengan format dat dengan isi berbentuk 3 kolom yaitu posisi x (easting), y (northing) dan nilai gravitasi 4D yang merupakan selisih ADT bulan September dengan ADT bulan Mei. Posisi x dan y memiliki satuan meter, sedangkan nilai anomali gravitasi dalam satuan milli Gal. Data ADT merupakan anomali yang sudah di reduksi ke bidang datar.



Gambar 5: Hasil inversi pada periode Januari hingga Mei dalam 10 sayatan

Gambar 5 menunjukkan hasil inversi pada periode Januari hingga Mei dalam 10 sayatan. Lima sayatan memiliki arah arah timur-barat yaitu sayatan A-A', B-B', C-C', D-D' dan E-E', sedangkan sayatan F-F', G-G', H-H', I-I' dan G-G' merupakan sayatan-sayatan dengan arah selatan-utara.

Dari model hasil inversi GRABLOX didapatkan nilai perubahan densitas pada area ini dengan nilai dari -0.22 gr/cc hingga 0.23 gr/cc. Densitas positif dapat diinterpretasi sebagai infiltrasi fluida injeksi yaitu air yang menggantikan fluida pengisi pori sebelumnya yaitu minyak. Densitas negatif diinterpretasi sebagai penambahan saturasi gas akibat injeksi fluida pada reservoir. Penambahan saturasi gas terjadi akibat berkurangnya tekanan pada reservoir akibat proses produksi.



Gambar 6: Interpretasi pengurangan saturasi minyak dan saturasi gas model reservoir hasil inversi periode Januari hingga Mei

Perubahan saturasi minyak dan saturasi gas sebagai interpretasi model reservoir hasil inversi periode Januari hingga September ditunjukkan oleh gambar 6. Perubahan nilai densitas positif hingga 0.23 gr/cc dapat diinterpretasi sebagai pengurangan saturasi gas hingga 64% dengan pengurangan saturasi minyak hingga 15% secara bersama-sama. Gas yang digantikan oleh air menyebabkan berkurangnya saturasi gas. Pengurangan saturasi minyak juga terjadi karena minyak digantikan oleh air selama terjadinya proses injeksi. Perubahan densitas positif sebesar 0,24 gr/cc pada anomali 4D periode Mei hingga September dapat diartikan dengan berkurangnya saturasi gas sebesar 66% dan berkurangnya saturasi minyak sebesar 15%.

## KESIMPULAN

Hasil inversi data lapangan menggunakan GRABLOX memberikan nilai volume infiltrasi fluida injeksi yang menunjukkan penyebaran pergerakan fluida injeksi pada reservoir. Parameter fisis lain yang dapat dihasilkan dari GRABLOX dengan modifikasi nilai adalah pengurangan saturasi minyak dan gas akibat injeksi fluida. Hasil inversi menggunakan GRABLOX pada data lapangan menunjukkan adanya perubahan densitas batuan reservoir hingga 0,23 gr/cc yang berhubungan dengan pengurangan saturasi gas dan minyak. Pengurangan saturasi gas akibat fluida injeksi memiliki nilai terkecil 0% dan terbesar hingga 66%. Pengurangan saturasi minyak hanya memberikan sumbangan perubahan densitas 15% dari pengurangan saturasi gas. Hasil inversi dari GRABLOX tidak bersifat unik. Hasil model inversi ini tergantung pada model awal dengan berbagai parameter fisisnya dan metode optimasi yang dipilih. Jumlah grid yang banyak memberikan hasil model yang lebih baik tetapi memerlukan waktu inversi yang lama.

## DAFTAR PUSTAKA

Atef, H., Abd El-Gawad, A.M.S., Abdel Zaher, M., Farag, K.S.I., (2016), *The contribution of gravity method in geothermal exploration of southern part of the Gulf of Suez–Sinai region, Egypt*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 5. P. 173-185

- Dafis, K., Li, Y., and Batzle, M., 2008, "Time-lapse gravity monitoring: A systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery", *GEOPHYSICS*, VOL. 73, NO. 6 \_NOV-DEC 2008\_; P.WA61–WA69, 13 FIGS. 10.1190/1.2987376
- Dzakiya, N. and Sismanto, 2014, *Pemodelan Tiga Dimensi (3D) Lapisan Bawah Permukaan Bumi di Subcekungan Jambi pada Lapangan "Zuhro" Berdasarkan Analisis Data Anomali Gravitasi*. Berkala MIPA, 24(4).
- Eiken, O., Zumberge, M., and Stenvold, T., 2004, "Gravimetric monitoring of gas production from the Troll field", SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting, Denver, Colorado.
- Gettings, P., Harris, R.N., Allis, R.G., and Chapman, D.S, (2002), "Gravity Signals at The Geysers Geothermal System" Proceedings, Twenty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University
- Kadir, W. G. A., 1999, "Survey Gravitasi 4D dan dinamika Sumber Bawah Permukaan": Proceeding Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, 94-99.
- Rahman, A., Mashud, M. I., Rahmawati, A. D., Susilo, A., Sarkowi, M., 2007, "Hydrocarbon Reservoir Monitoring Using Gravity 4d Method, In "X" Field In Southern Sumatra Area". Proceedings Joint Convention Bali 2007 The 32nd HAGI And The 36th IAGI Annual Convention And Exhibition.
- Shandini, Y., and Tadjou, J. M., 2012, *Interpreting gravity anomalies in south Cameroon, central Africa*, Earth Sciences Research Journal, Earth Sci. Res. SJ. Vol. 16, No. 1 (June, 2012): 5 – 9
- Titi, Y.L.A., Minarto, E., 2017, *The subsurface three-dimensional modeling of volcano arc of Flores island based on gravity data analysis*. AIP Conference Proceedings 1788, 030106 (2017); doi: 10.1063/1.4968359
- Wibowo, B.R., Yatini, Hamdalah, H., 2017, *Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Pemodelan Data Gravitasi 3D (Studi Kasus Lapangan Panas Bumi Coso, California)*, Unnes Physics Journal
- Zuhdi, M., dan Setiawan, A., 2015, *Pemodelan Inversi Gravitasi 4d Injeksi Gas Pada Reservoir Minyak*. Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi, Volumee I No 2, April 2015
- M. Zuhdi, A., Sismanto, Setiawan, A., Setyowiyoto, J., Susilo, A., and Sarkowi, M. (2018). *Radial Derivative and Radial Inversion for Interpreting 4D Gravity Anomaly Due to Fluids Injection Around Reservoir*. TELKOMNIKA 16 (6), pp. 2855–2863