

# Turunan Radial dari Anomali Gravitasi untuk Identifikasi Injeksi Air pada Reservoir

Muhammad Zuhdi<sup>1</sup>, Ahmad Busyairi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FKIP Pendidikan Fisika, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

<sup>1</sup>FKIP Pendidikan Fisika, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia;

## Article history

Received: April 2<sup>st</sup>, 2024

Revised: May 2<sup>st</sup>, 2024

Accepted: June 12<sup>st</sup>, 2024

\*Corresponding Author:  
Muhammad Zuhdi, University  
of Mataram, Lombok, Indonesia  
Email:  
[mzuhdi@unram.ac.id](mailto:mzuhdi@unram.ac.id)

**Abstract:** Time Lapse micro-gravity or 4D microgravity has been developed and applied for various purposes related to the dynamics change beneath the earth's surface. The principle is a repeated and periodic measurement to determine the change in gravity value at time interval as a yield of the dynamics changes in the density change of the subsurface. This method can be used for monitoring and identify water or gas injections in reservoirs. Mass density taht changes due to gas injection provide changes in the values of gravity over time. This change allows us to identify the dynamics of gas movement in reservoir. A reservoir model has been made in this research with gas injected in reservoir bulk. The time lapse gravity respons value is calculated numerically. Oil-gas contact is an edge between gas injection front with oil which move direction away from injection point. The first and second radial derivatives of 4D gravity can provide as a front of the gas movement in the reservoir. A radial derivatives is a horizontal derivative of gravity anomaly along radial direction from a point which selected as a entre of the anomaly. The second radial derivative is derivative of radial deriative. Radial derivatives value of this model response have range of 20 microGals/m and second radial derivative has a values of 0.05 microGals/m<sup>2</sup>. Graphics of absolute value of radial derivative and second radial derivative of 4D gravity anomaly seemingly correlated with the oil-gas contact of reservoir models. Radial derivative and second radial derivative has been proven as new available method wich has ability to shows a boundary of a horizontal layer with vertical density contrast.

**Keywords:** Gravity. Radial derivatives, reservoir injection.

## Introduction

Permintaan minyak bumi dunia selalu meningkat dari waktu ke waktu, sedangkan ketersediaan minyak bumi semakin menipis. Upaya pemenuhan kebutuhan minyak bumi dilakukan dengan melakukan eksplorasi sumber minyak bumi baru dan optimalisasi reservoir minyak yang telah dihasilkan. Salah satu cara untuk meningkatkan produksi adalah dengan menyuntikkan cairan ke dalam reservoir. Fluida ini akan menjauh dari sumur injeksi dan mendorong minyak menuju sumur produksi.

Pada proses injeksi fluida, perubahan densitas bulk akibat injeksi menghasilkan gravitasi mikro 4D. Anomali 4D bernilai negatif karena cairan injeksi lebih kecil dibandingkan cairan awal pada pori.

Injeksi gas berupa uap air pada reservoir melalui sumur minyak dapat meningkatkan produksi

di sekitar sumur, dengan asumsi gas tersebut akan mendorong minyak menuju sumur produksi dengan arah radial dan seragam. Dorongan ini akan mengakibatkan penumpukan minyak di sumur produksi. Proses injeksi harus diawasi agar pergerakan fluida injeksi tidak langsung menuju sumur produksi yang mengakibatkan terhentinya produksi. Metode gravitasi dalam eksplorasi minyak bumi merupakan metode yang handal, dan sangat murah dibandingkan dengan metode seismik. Data gravitasi juga digunakan sebagai pengikat data dari metode seismik. Metode gravitasi juga digunakan dalam eksplorasi mineral untuk memperjelas informasi yang telah diperoleh dari metode elektromagnetik. Metode gravitasi juga terkadang digunakan untuk tujuan teknik dan arkeologi [1]. Metode gravitasi merupakan metode geofisika pertama yang digunakan untuk eksplorasi minyak

bumi [2]. Interpretasi Gravitasi merupakan upaya untuk mendapatkan distribusi massa dari suatu data gravitasi yang ada pada suatu bidang. Interpretasi Gravitasi sebenarnya merupakan proses kebalikan dari teori medan, karena nilai yang diketahui adalah potensinya sedangkan sumbernya adalah sesuatu yang diketahui [3].

Metode gravitasi mikro 4D atau dikenal juga dengan time lapse microgravity merupakan pengembangan dari metode gravitasi dengan dimensi keempat yaitu waktu. Metode ini ditandai dengan pengukuran berulang baik harian, mingguan, bulanan atau tahunan dengan menggunakan pengukuran gravitasi dengan ketelitian sangat tinggi didukung dengan pengukuran posisi dan ketinggian dengan ketelitian yang tinggi juga. Kelebihan metode ini adalah pengoperasiannya yang relatif sederhana dan ramah lingkungan [4].

## Metode

Injeksi gas pada reservoir akan menurunkan berat jenis karena minyak dan air digantikan oleh gas yang mempunyai massa jenis lebih rendah, sehingga perubahan massa jenis ini memberikan respon berupa perubahan anomali gravitasi negatif. Di sisi lain, perubahan air tanah juga mempunyai pengaruh nilai positif yang besar terhadap anomali gravitasi 4D yang diukur. Penelitian ini dibatasi pada identifikasi kontak antara fluida injeksi (gas) dengan fluida awal dalam pori yaitu minyak.

Upaya yang dilakukan adalah dengan menerapkan turunan radial yang bertujuan untuk memperoleh kerapatan kontras batas vertikal akibat injeksi dengan anomali mendekati nol.

Metode gravitasi 4D telah banyak digunakan untuk identifikasi dan pemantauan perubahan bawah permukaan. Eiken et al, menggunakan gravitasi mikro antar regional, untuk memantau produksi gas di reservoir bawah laut dengan sensitivitas gravimeter hingga 4 mikrogal. Tingkat kepercayaan hasil pengukuran berada pada angka 80% [5]. Mendapatkan dkk. (2002), mengukur nilai gravitasi mikro 4D di sekitar sumber geyser panas bumi untuk mendeteksi subsidensi akibat perubahan massa selama masa produksi dengan laju anomali  $2 \pm 2$  mikroGal dan 4D sebesar  $10 \pm 8$  mikroGal [6]. Akasaka dan Nakanishi (2000) memisahkan anomali gravitasi sumber panas bumi dari pengaruh perubahan air tanah dengan mengkorelasikan data pengeboran dan data curah hujan [7]. Rahman dkk. (2007) berhasil melakukan pemantauan injeksi fluida pada reservoir di Sumatera Selatan dengan menggunakan metode gravitasi 4D [8]. Dafis dkk.

(2008), mengukur anomali gravitasi 4D untuk memantau laju injeksi air pada akuifer penyimpanan dan pemulihan akuifer buatan (ASR) di Leyden Colorado. Metode ini terbukti berhasil bahkan untuk mendeteksi pergerakan air di dalam akuifer [9]. Sarkowi (2008) meneliti hubungan perubahan air tanah dengan perubahan nilai gradien gravitasi vertikal di Kota Semarang dan sekitarnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah akan mengakibatkan penurunan nilai gradien gravitasi vertikal [10]. Zuhdi dan Sismanto telah membuat model reservoir dan perlakuan turunannya secara horizontal [11].

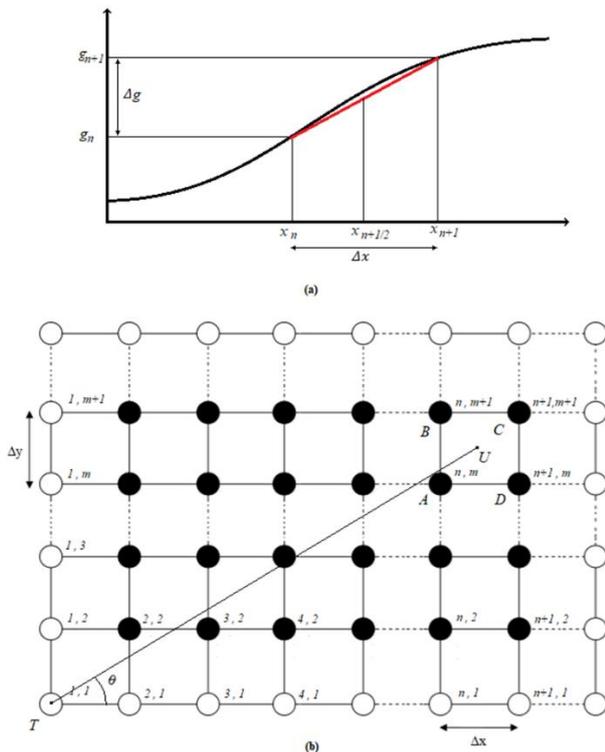
Pada penelitian ini akan digunakan metode mikrogravitasi 4D untuk mendeteksi pergerakan fluida gas dalam reservoir dengan metode baru yaitu turunan radial dan anomali mendekati nol. Kontak minyak-gas sebagai front pergerakan gas akan diidentifikasi dengan turunan radial dan turunan radial kedua.

## Derivatif Radial

Anomali gravitasi dapat dipertajam dengan membuat turunan terhadap jaraknya. Turunan radial merupakan turunan horizontal anomali gravitasi sepanjang arah radial dari suatu titik yang dipilih sebagai anomali pusat gravitasi. Turunan radial merupakan cara yang lebih baik daripada turunan horizontal biasa karena memungkinkan kita mendapatkan nilai maksimal untuk anomali sumber benda lingkaran. Turunan radial yang kedua merupakan turunan dari turunan radial atau perlakuan dua kali terhadap turunan radial.

Turunan radial dapat didekati dengan mengurangkan setiap titik pengukuran ke arah tertentu. Dari gambar 1, turunan terhadap sumbu X diperoleh dengan mengurangkan nilai gravitasi hasil pengukuran di titik X2 dengan nilai gravitasi di X1 kemudian membaginya dengan jarak X2 ke X1. Untuk menurunkan nilai turunan terhadap sumbu Y diperoleh dengan mengurangkan nilai gravitasi hasil pengukuran di titik Y2 dengan nilai gravitasi di titik Y1 kemudian dengan cara yang sama dibagi dengan jarak Y2 ke Y1.

Dalam banyak kasus, dibutuhkan turunan tidak hanya pada sumbu x atau y tetapi pada arah tertentu, sering disebut turunan berarah.



**Gambar 1** Pendekatan turunan radial

Pada gambar (1),  $\Delta x$  adalah pendekatan nilai derivatif horizontal kearah sumbu  $x$  pada posisi  $n+1/2, m$ , sehingga  $\Delta x$  pada persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{\Delta g x_{n+1/2, m}}{\Delta x} = \frac{g_{n+1, m} - g_{n, m}}{x_{n+1, m} - x_{n, m}} \quad (1)$$

dengan cara yang sama, maka  $dy$  yang merupakan derivatif horizontal kearah sumbu  $y$  pada posisi  $n+1/2, m$  dapat dituliskan dengan:

$$\frac{\Delta g y_{n, m+1/2}}{\Delta y} = \frac{g_{n, m+1} - g_{n, m}}{y_{n, m+1} - y_{n, m}} \quad (2)$$

Dengan melihat pada gambar 1 (b), nilai  $\cos \theta$  memiliki nilai yang besarnya dapat dinyatakan sebagai:

$$\cos \theta = \frac{x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1}}{\left\{ (x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1})^2 + (y_{1, m+1/2} - y_{1, 1})^2 \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

sedangkan nilai  $\sin \theta$  dapat dituliskan sebagai:

$$\sin \theta = \frac{y_{1, m+1/2} - y_{1, 1}}{\left\{ (x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1})^2 + (y_{1, m+1/2} - y_{1, 1})^2 \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

Nilai Derivatif Radial  $\Delta g / \Delta R = (\Delta g x / \Delta x) \sin \theta + (\Delta g y / \Delta y) \cos \theta$  kemudian didapatkan dengan mensubstitusikan dengan persamaan (1), (2), (3) dan (4) dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta g}{\Delta R} &= \frac{g_{n+1, m} - g_{n, m}}{x_{n+1, m} - x_{n, m}} \frac{x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1}}{\left\{ (x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1})^2 + (y_{1, m+1} - y_{1, 1})^2 \right\}^{1/2}} \\ &+ \frac{g_{n, m+1} - g_{n, m}}{y_{n, m+1} - y_{n, m}} \frac{y_{1, m+1/2} - y_{1, 1}}{\left\{ (x_{n+1/2, 1} - x_{1, 1})^2 + (y_{1, m+1} - y_{1, 1})^2 \right\}^{1/2}} \end{aligned} \quad (5)$$

Derivasi persamaan ini dilakukan dengan program berbasis Matlab untuk data yang besar, Program tersebut dapat digunakan untuk data dengan grid teratur dengan diberi nama matriks X, dengan jumlah kolom dan baris bernilai ganjil.

## Hasil dan Pembahasan

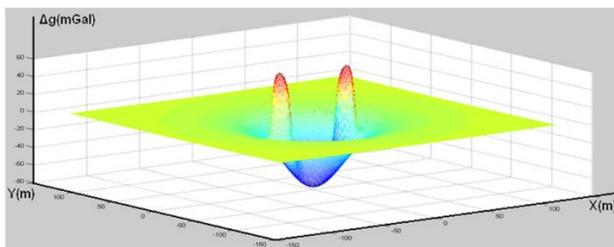
Model dibuat dengan variabel model berdasarkan nilai riil di lapangan yaitu: kedalaman reservoir, kedalaman muka air tanah, porositas batuan di sekitar muka air tanah, saturasi minyak, porositas batuan reservoir, densitas gas, densitas minyak dan densitas yang diinjeksikan. gas.

Kedalaman reservoir yang masuk akal dipilih pada 300 meter, kedalaman permukaan air awal adalah 15 meter, porositas batuan reservoir 30%, porositas batuan di sekitar permukaan air adalah 20%, saturasi minyak adalah 50%, kepadatan air yang mengisi pori-pori adalah 1 g/cc, massa jenis minyak dalam curah reservoir adalah 0,8 g/cc dan massa jenis gas yang diinjeksikan ke dalam curah adalah 0 g/cc. Luas model dipilih sedemikian rupa sehingga nilai gravitasi di tepi model kurang dari 10 persen nilai gravitasi maksimum di tengah model. Luas lahan yang digunakan pada model ini adalah 680 hektar dengan bentuk persegi panjang dengan panjang masing-masing sisinya 2,61 km. Daerah ini masuk akal untuk anomali gravitasi dengan kedalaman sekitar 1 km. Interval grid yang digunakan adalah 10 m, grid pertama pada jarak 0 m

dan grid terakhir pada jarak 2610 m. Dari ukuran grid di atas, respon model berbentuk matriks persegi dengan 261 raw dan 261 kolom.

### Respon Model

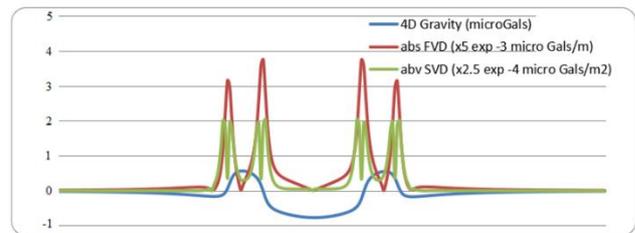
Model perubahan muka air tanah adalah kenaikan muka air tanah setinggi 3 meter berbentuk dua buah lingkaran dengan diameter masing-masing 150 meter dengan jarak masing-masing pusat lingkaran 6,5 km. Penginjeksian gas pada reservoir pada kedalaman 300 meter dengan volume penginjeksian gas sebesar 3.600.000 m<sup>3</sup>.



**Gambar 2.** Peningkatan muka air tanah, injeksi gas dan respon gravitasinya

Model perubahan muka air tanah didasarkan pada asumsi bahwa sebelumnya batuan pengisi fluida di sekitar muka air tanah adalah udara dengan massa jenis 0 g/cc kemudian digantikan oleh air dengan massa jenis 1 g/cc. Porositas batuan di sekitar permukaan air adalah 0,3. Perubahan massa pada reservoir disebabkan adanya penggantian fluida (minyak dan air) yang massa jenisnya 0,9 g/cc menjadi gas yang massa jenisnya 0 g/cc. Anomali gravitasi 4D maksimum di sekitar pusat respon model memiliki nilai hingga 55 mikro Gal dan minimal -77 mikro Gal. Anomali gravitasi 4D dari respon model 3 memiliki rentang -770 mikro Gals hingga 570 mikro Gals. Anomali terbesar pada model ini berada tepat di tengah lingkaran muka air tanah yang mencapai nilai maksimum 570 mikro Gals. Respon anomali pada tepi matriks hanya sebesar 2 mikro Gals. Gambar 2 menunjukkan injeksi gas pada model reservoir dan respon total anomali gravitasi 4D akibat injeksi gas dan peningkatan permukaan air.

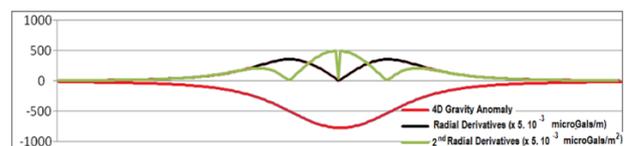
Garis AB merupakan penampang model yang dibuat untuk menunjukkan respon anomali gravitasi dalam 2 dimensi. Pada garis AB dilakukan perlakuan turunan horizontal untuk membantu analisis dua dimensi.



**Gambar 3.** Respon gravitasi selang waktu, turunan radial absolutnya, dan turunan radial kedua penampang AB akibat injeksi gas dan kenaikan muka air tanah.

Pada penampang AB terlihat nilai gravitasi time lapse maksimum sebesar 57 mikro Gals. Nilai ini ditunjukkan dengan garis biru pada grafik. Turunan radial respon menunjukkan kemiringan respon model, nilai turunan radial pertama ditunjukkan dengan garis hitam sedangkan nilai turunan radial kedua diwakili dengan garis merah. Nilai maksimum turunan pertama sebesar 19 mikro gal/meter sedangkan nilai maksimum turunan kedua sebesar 100 mikro gal/meter<sup>2</sup>.

Turunan radial dari anomali gaya berat mikro 4D adalah kemiringan anomali gravitasi. Untuk sumber dangkal nilai turunan radialnya jauh lebih besar dibandingkan nilai turunan radial untuk sumber dalam, meskipun nilai anomali keduanya mewakili nilai yang hampir sama. Sebagai nilai turunan radial, nilai Turunan Radial Kedua anomali dangkal juga jauh lebih tinggi dibandingkan anomali sumber dalam.



**Gambar 4.** Respon gravitasi time lapse, nilai absolut turunan radial dan turunan radial kedua akibat injeksi gas ke dalam reservoir.

Secara grafis kurva turunan radial absolut dan kurva turunan radial kedua absolut tersedia untuk mencari anomali batas vertikal. Hal ini disebabkan oleh simetri kurvanya. Terdapat korelasi yang sangat baik antara sumber anomali dengan kurva.

Nilai kurva turunan radial absolut yang mendekati nol pada grafik sangat jelas menunjukkan pusat sumber anomali sedangkan puncaknya sesuai dengan batas sumber anomali. Kurva turunan radial kedua absolut dengan jelas menunjukkan pusat simetri yang berhubungan langsung dengan pusat sumber anomali sedangkan batas vertikal sumber anomali diwakili oleh nilai nol (perubahan tajam) kurva.

Turunan radial secara umum dapat menjadi metode baru untuk menginterpretasikan anomali

timelapse atau anomali gravitasi konvensional, tanpa memerlukan data lapangan tambahan lainnya. Metode ini tersedia untuk identifikasi sumber anomali lapisan tunggal dengan kepadatan perbedaan lateral. Jadi, turunan radial tidak hanya untuk gaya berat mikro timelapse, tetapi juga tersedia untuk analisis anomali gravitasi konvensional.

## Kesimpulan

Respon model anomali gravitasi 4D akibat injeksi gas dan peningkatan permukaan air memiliki kisaran orde yang sama dengan ratusan mikro Gal. Nilai turunan radial dan turunan radial kedua pada kedua model sangat jauh berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa nilai FHD dan SHD dapat menampilkan karakteristik kedalaman sumber.

Secara grafis kurva turunan radial absolut dan kurva turunan radial kedua absolut tersedia untuk mencari anomali batas vertikal. Hal ini disebabkan oleh simetri kurvanya. Terdapat korelasi yang sangat baik antara sumber anomali dengan kurva. Turunan radial tidak hanya digunakan untuk gravitasi makro timelapse, namun juga tersedia untuk analisis anomali gravitasi konvensional.

## Referensi

- [1]. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherif, R.E., and Keys, D.A., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [2]. Nabighian, M.N., Ander, M.E., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Pearson, W.C., Pierce, J.W., Phillips, J.D., and Ruder, M.E., 2005, *75<sup>th</sup> Anniversary: Historical development of the gravity method in exploration*, *Geophysics*, Vol. 70 (6), P 63ND-89ND.
- [3]. Grand, F.S. and West, G.F., 1965, "Interpretation Theory injeksi Applied Geophysics", McGraw Hill Inc.
- [4]. Reynolds, J.M., 1997, "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons, Chichester
- [5]. Eiken, O., Zumbege, M., and Stenvold, T., (2004) "Gravimetric monitoring of gas production from the Troll field" SEG Int'l Exposition and 74th Annual Meeting, Denver, Colorado.
- [6]. 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
- [7]. Akasaka, C., and Nakanishi, S., 2000 "Evaluation of Microgravity Background at the Undisturbed Oguni Geothermal Field, Japan." Proceedings, Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.
- [8]. 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.
- [9]. 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
- [10]. Sarkowi, M., Kadir, W.G.A., Santoso Dj., 2005, *Strategy of 4D Microgravity Survey for the Monitoring of Fluid Dynamics in the Subsurface*, Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005
- [11]. Zuhdi, M., Sismanto. 2013, *Response Of Time Lapse Gravity Anomaly Model Of Gas Injection In Reservoir And Water Table Changes On It's Near Surface*, Proceedings of Basic Sciences Conference 2013, Brawijaya University.
- [12]. Kadir, W.G.A, 1996, *Dekonvolusi anomali gayaberat bouguer dan derivatif vertikal orde dua dengan menggunakan persamaan dasar potensial, studi kasus : P. Sumatra*, Fakultas Pascasarjana, ITB.