



# Pemodelan Kedepan Derivatif Radial Anomali Gravitasi untuk Identifikasi Fitur Geologi Berbentuk Silinder

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

<sup>1,2</sup>Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Mataram, Indonesia.

Received: 04 May 2024

Revised: 21 August 2024

Accepted: 30 August 2024

Corresponding Author:

Muhammad Zuhdi

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

© 2024 Kappa Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v8i2.24770>

**Abstract:** The gravity method is a geophysical method with exploration costs that are quite cheap compared to other geophysical methods. This method is based on the density contrast of the target rock with the surrounding rock. The cylindrical geological feature is one of the targets among various other geological features. This research was conducted to test the ability of radial derivatives of gravity anomalies for targets in the form of cylindrical geological features. Radian derivatives consist of a first derivative and a second derivative. Future modeling of cylindrical geological features is carried out analytically and with finite elements. Both calculations were carried out with a computer program based on Matlab. The results show that there is no difference in results either analytically or finite element wise. This method has been proven to be able to provide clear boundary positions on cylindrical geological features.

**Keywords:** Radial Derivatives; Gravity Anomaly; Cylinder

## Pendahuluan

Metode gravitasi merupakan metode eksplorasi 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 (Telford dkk., 1990). Metode gravitasi merupakan metode geofisika yang pertama kali digunakan minyak bumi eksplorasi (Nabighian dkk, 2005). Interpretasi gravitasi adalah sebuah upaya untuk memperoleh distribusi massa dari data gravitasi yang ada di permukaan. Interpretasi Gravitasi sebenarnya merupakan proses inversi dari teori medan, karena nilai yang diketahui adalah potensinya sedangkan sumbernya adalah sesuatu yang akan dicari (Agung dan Barat 1965).

Metode gravitasi mikro 4D atau dikenal juga dengan time lapse microgravity merupakan

pengembangan dari metode gravitasi dengan dimensi keempat yaitu waktu. Metode ini juga dicirikan oleh pengukuran yang berulang harian, mingguan, bulanan atau tahunan menggunakan pengukuran gravitasi dengan akurasi sangat tinggi didukung dengan pengukuran posisi dan ketinggian dengan akurasi tinggi pula. Kelebihan metode ini adalah pengoperasiannya yang relatif sederhana dan ramah lingkungan (Reynold, 1997).

Metode gravitasi 4D telah banyak digunakan untuk identifikasi dan pemantauan perubahan bawah permukaan. Eiken dkk., 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% (Eiken, dkk 2004). Gettings 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 (Gettings dkk, 2002) Akasaka

## How to Cite:

Zuhdi, M., & Busyairi, A. (2024). Pemodelan Kedepan Derivatif Radial Anomali Gravitasi untuk Identifikasi Fitur Geologi Berbentuk Silinder. *Kappa Journal*, 8(2), 237-242. <https://doi.org/10.29408/kpj.v8i2.24770>

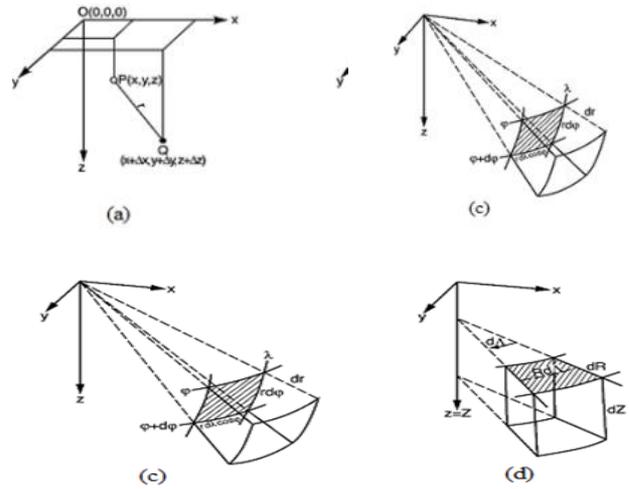
dan Nakanishi (2000) memisahkan anomali gravitasi sumber panas bumi dari pengaruh perubahan air tanah dengan mengkorelasikan data pengeboran dan data curah hujan (a=Akasaka dan Nakanishi Rahman dkk. (2007) berhasil melakukan pemantauan injeksi fluida pada reservoir di Sumatera Selatan dengan menggunakan metode gravitasi 4D (Rahman dkk, 2007). Dafis dkk. (2008), mengukur anomali gravitasi 4D untuk memantau laju injeksi air dalam penyimpanan dan pemulihan akuifer buatan (ASR) akuifer di Leyden Colorado. Ini metode terbukti bahkan sukses ke mendeteksi pergerakan air di dalam akuifer (Dafis dkk., 2008). 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. Zuhdi dan Sismanto (2013) telah membuat model fitur geologi dan perlakuan turunannya secara horizontal. Ricardi dkk, (2022) membuat model gravitasi tidal untuk pertama kalinya. Sprlak dkk. (2018) membuat peta distribusi densitas di bulan menggunakan data gravitasi. Tanzer dkk, membuat model kerak bumi dengan metode gravitasi dengan analisa harmonik. Kumar dkk, (2023) memanfaatkan metode gravitasi dengan gravimeter superconductor untuk meneliti batas akuifer. Kuhn dan Hirt (2016) memanfaatkan derivative kedua dari data gravitasi untuk meetakan topografi.

Di dalam riset ini, metode radial derivative gravitasi akan digunakan untuk mendeteksi fitur geologi dengan bentuk silinder. Fitur geologi yang berbentuk silinder banyak di jumpai di berbagai tempat di belahan dunia. Fitur geologi ini antara lain intrusi magmatic pada gunung api, dataran tinggi gunung api atau yang disebut dengan plateau, lelehan magma pada gunung api lelehan dan intrusi berbagai batuan plutonik. Pemodelan kedepan (Forward Modelling) dilakukan dengan dua cara yaitu analitis dan pemodelan dengan elemen hingga menggunakan proram berbasis Matlab yang algoritmanya dirancang sendiri oleh penulis.

**Metode**

Derivatif Radial adalah turunan nilai anomali gravitasi terhadap jarak horizontal dengan arah radial dari suatu titik tertentu yang dianggap sebagai pusat anomali. Derivatif horizontal suatu anomali gravitasi adalah turunan nilai gravitasi dalam arah garis lurus tertentu. Jika garis lurus tersebut memotong secara tegak lurus suatu batas kontras densitas maka nilai derivatifnya akan benilai besar. Dalam banyak kasus diperlukan derivatif yang selalu tegak lurus atau sebisa mungkin mendekati tegak lurus dengan kontras densitas anomali.

Untuk keperluan tersebut dibuatlah Derivatif Radial. Titik pusat Derivatif Radial dipilih berdasarkan pertimbangan tertentu sehingga titik tersebut dianggap atau dipertimbangkan sebagai pusat anomali yang akan diidentifikasi.



Gambar 1. Koordinat dari elemen massa (a) Koordinat Cartesian x, y, z dan hubungan volum koordinat bola (b) Elemen volum pada koordinat silinder vertikal.(Jacoby and Smilde,2009)

Gambar 1 menunjukkan koordinat kartesian, silinder dan bola serta elemen massa pada koordinat silinder dan bola. Derivatif Radial akan lebih mudah dilakukan dalam koordinat silinder.

Nilai anomali gravitasi  $\Delta g_z(x,y,z)$  yang disebabkan oleh anomali densitas  $\Delta \rho(a,\beta,\gamma)$  dituliskan sebagai :

$$\Delta g_z(x,y,z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta \rho(\alpha,\beta,\gamma)(z-\gamma)}{\{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2\}^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (1)$$

dapat diubah ke dalam koordinat silinder, sehingga  $\Delta g_z(x,y,z)$  menjadi  $\Delta g_z(R,z,\lambda)$  dan  $\Delta \rho(R',z',\lambda')$ , dengan hubungan:  $x = R \cos \lambda$ ,  $y = R \sin \lambda$  dan  $z = z$ , sedangkan  $a = R \cos \lambda'$ ,  $\beta = R \sin \lambda'$  dan  $\gamma = z'$ , dengan elemen massa  $\Delta \rho dR dz R d\lambda$  sehingga nilai gravitasi kearah sumbu z dapat dituliskan sebagai:

$$\Delta g_z(R,z,\lambda) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta \rho(R',z',\lambda')(z-z')}{\{(R \cos \lambda - R' \cos \lambda')^2 + (R \sin \lambda - R' \sin \lambda')^2 + (z-z')^2\}^{3/2}} R dR dz' d\lambda' \quad (2)$$

First Derivatif Radial (FRD) dari anomali gravitasi pada koordinat silinder vertikal  $\Delta g_z(R,z,\lambda)$  secara sederhana dapat dituliskan menjadi :

$$FRD = \frac{\partial \Delta g_z(R, z, \lambda)}{\partial R}$$

$$FRD = \frac{\partial}{\partial R} \left[ \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta \rho (R', z', \lambda') (z - z')}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{\frac{3}{2}}} R dR dz d\lambda \right]$$

Sedangkan *second Derivatif Radial (SRD)* secara sederhana dapat dituliskan sebagai:

$$SRD = \frac{\partial^2 \Delta g_z(R, z, \lambda)}{\partial R^2}$$

$$SRD = \frac{\partial^2}{\partial R^2} \left[ \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta \rho (R', z', \lambda') (z - z')}{\{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2\}^{\frac{3}{2}}} R dR dz d\lambda \right]$$

Persamaan (4) adalah persamaan FRD dan SRD dapat dijabarkan secara analitis jika geometri model dari sumber dapat diketahui dan berbentuk sederhana. Rumusan analitis ini berguna untuk mengetahui perilaku grafis dari anomali gravitasinya. Persamaan analitis ini juga dibutuhkan dalam pembuatan model Inversi Radial dari model tersebut.

Derivatif Radial dapat dipandang sebagai *directional derivatif* dengan arah radial yang selalu menjauhi titik pusat tertentu sebagai pusat Radial Derivatif. Jika medan gravitasi  $g$  dianggap sebagai medan scalar pada pada bidang datar  $(x,y)$ , maka laju perubahan nilai  $g_{(x,y)}$  terbesar pada bidang tersebut adalah gradien medan  $g$  yang ditulis sebagai:

$$\nabla g_{(x,y)} = \left( \frac{\partial g_{(x,y)}}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial g_{(x,y)}}{\partial y} \hat{j} \right) \tag{5}$$

Jika arah radial pada pada Derivatif Radial adalah vector  $v$  yang merupakan vector satuan arah, maka Derivatif Radial dari medan  $g_{(x,y)}$  dapat dituliskan dengan:

$$DRg(x, y) = \nabla g_{(x,y)} \cdot v \tag{6}$$

Pada posisi koordinat  $(a,b)$ , gradien medan  $g_{(x,y)}$  menjadi  $\nabla g_{(a,b)}$  dan arah Derivatif Radial menjadi:

$$DRg(a, b) = \nabla g_{(a,b)} \cdot v \tag{7}$$

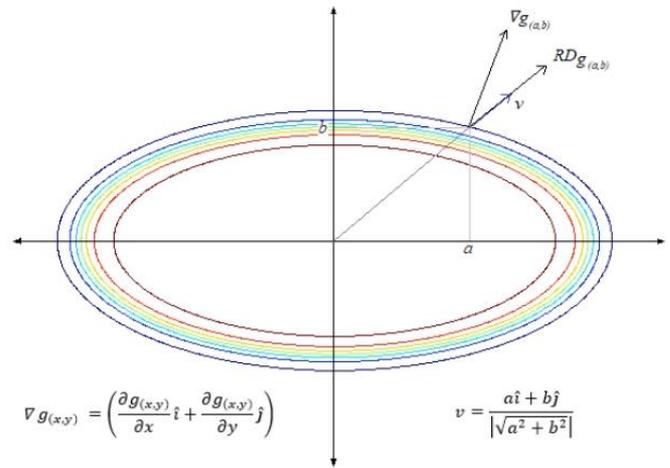
Arah  $v$  selalu menjauhi pusat Derivatif Radial sehingga pada posisi  $(a,b)$ , vector satuan arah  $v$  dapat dituliskan sebagai:

$$v = \frac{a\hat{i} + b\hat{j}}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Dengan demikian Derivatif Radial medan  $g$  di titik  $(a,b)$  dapat dituliskan sebagai:

$$DRg(a, b) = \nabla g_{(a,b)} \cdot \frac{a\hat{i} + b\hat{j}}{\sqrt{a^2 + b^2}} \tag{8}$$

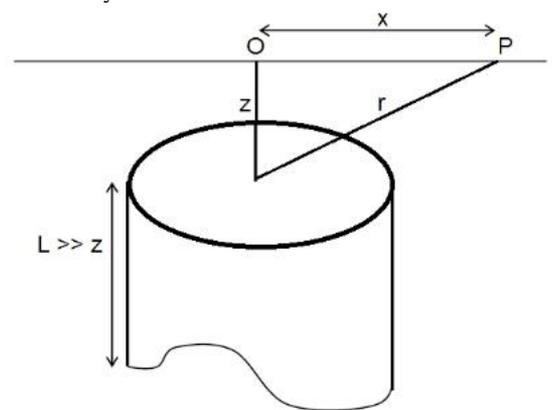
Gambar 2. menunjukkan gradien medan  $g$  yang merupakan directional derivatif kearah vector satuan posisi  $v$ . Nilai perubahan medan gravitasi pada Derivatif Radial selalu lebih kecil dari (3) gradien medan  $g$  pada bidang  $(x,y)$  dan dapat mempunyai nilai maksimal sebesar gradien medan  $g$  tersebut.



Gambar 2. Gradien medan  $g$  dan directional derivatif kearah  $v$

### Hasil dan Pembahasan

Fitur geologi yang berbentuk silinder banyak di jumpai di berbagai tempat di belahan dunia. Fitur geologi ini antara lain intrusi magmatic pada gunung api, dataran tinggi gunung api atau yang disebut dengan plateau, lelehan magma pada gunung api lelehan dan intrusi berbagai batuan plutonik. Syarat utama deteksi fitur geologi berbentuk silinder adalah adanya kontras densitas batuan berbentuk silinder terhadap batuan disekitarnya.



Gambar 4. Pengukuran gravitasi di sekitar silinder panjang tak hingga

Anomali gravitasi pada titik pengukuran di permukaan sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3. diformulasikan oleh Telford dkk. (1990) dengan persamaan (9). Persamaan tersebut berlaku untuk

silinder panjang tak berhingga, atau panjangnya sangat jauh lebih besar dibandingkan kedalaman puncak silinder. Untuk kasus fitur geologi berbentuk silinder dapat di hitung dengan mengurangkan 2 silinder panjang tak hingga yang kedalamannya berbeda.

Gambar 4. menunjukkan pendekatan silinder tipis dengan pengurangan 2 silinder panjang tak hingga. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa ketebalan fitur geologi adalah sebesar  $z_2 - z_1$  dengan kedalaman puncak fitur geologi sebesar  $z_1$ .

Untuk silinder yang panjangnya jauh lebih besar dibandingkan dengan kedalaman puncaknya, jika memenuhi persamaan laplace, dapat dinyatakan  $r > z > R$  dalam bentuk Polinom Legendre dengan formulasi:

$$g(r, \theta) = k \sum_{n=0}^{\infty} b_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta)$$

dengan nilai  $k = 12,77 \cdot 10^{-3} \rho$ ,  $b_n$  adalah koefisien,  $P_n(\cos \theta)$  adalah Polinom Legendre,  $r^2 = x^2 + z^2$ , dan  $\theta = \arctan(x/z)$ . Pada sumbu silinder  $r = z$  sehingga  $\theta = 0$ , maka persamaan menjadi

$$g = k \left( \frac{b_0 P_0}{z} + \frac{b_1 P_1}{z^2} + \frac{b_2 P_2}{z^3} + \frac{b_3 P_3}{z^4} + \dots \right)$$

$$g = k \left( \frac{b_0}{z} + \frac{b_1}{z^2} + \frac{b_2}{z^3} + \frac{b_3}{z^4} + \dots \right)$$

dengan  $P_0, P_1, P_2$  dan seterusnya adalah Polinom Legendre dengan nilai 1.

Untuk nilai  $L$  mendekati tak berhingga, maka diperoleh persamaan

$$g = 12,77 \times 10^{-3} \rho \left( \sqrt{x^2 + z^2} - z \right) \tag{11}$$

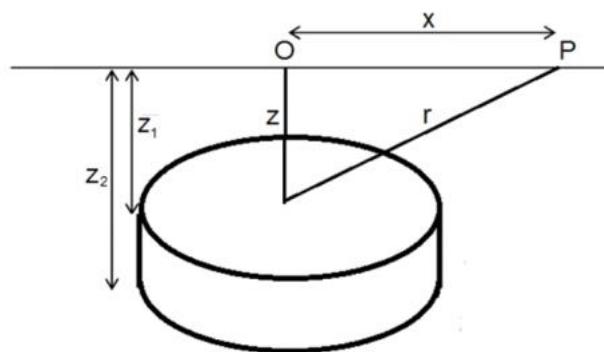
Ekspansi persamaan (11) dalam bentuk  $(R/z)$  didapatkan

$$g = k \left( \frac{R^2}{2z} - \frac{R^4}{8z^3} + \frac{R^6}{16z^5} - \frac{5R^8}{128z^7} + \dots \right) \tag{12}$$

Nilai  $b_n = 0$  berlaku untuk  $n$  ganjil, sedangkan  $b_0 = R^2/2$ ,  $b_2 = -R^4/8$ ,  $b_4 = R^6/16$ ,  $b_6 = 5R^8/128$  dan seterusnya. Sehingga  $g(r, \theta)$  di luar sumbu silinder menjadi

$$g(r, \theta) = 12,77 \times 10^{-3} \rho R \left( \frac{1}{2} \left( \frac{R}{r} \right) - \frac{1}{8} \left( \frac{R}{r} \right)^3 P_2(\mu) + \frac{1}{16} \left( \frac{R}{r} \right)^5 P_4(\mu) - \dots \right) \tag{13}$$

dengan nilai  $\mu = \cos \theta$ .



Gambar 4. Pendekatan Silinder tipis dengan selisih 2 buah silinder panjang ke bawah tak hingga

Untuk silinder kecil atau batang vertikal dengan luas penampang  $A$ , kedalaman  $z$  dan panjang  $L$ , dapat di rumuskan sebagai

$$g = 2.03 \times 10^{-3} A \rho \left[ \frac{1}{(x^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{1}{\{(z + L)^2 + x^2\}^{0.5}} \right]$$

dengan mengganti  $r = (x^2 + z^2)^{1/2}$ , didapatkan

$$g(r, \theta) = 6.4 \times 10^{-3} \rho R^2 \left\{ \frac{1}{(x^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{R^2 P_2(\mu)}{4(x^2 + z^2)^{1.5}} + \frac{R^4 P_4(\mu)}{16(x^2 + z^2)^{2.5}} - \dots \right\}$$

persamaan memiliki ketepatan yang lebih bagus dibandingkan persamaan (14) Persamaan ini dipilih karena lebih sederhana.

Untuk nilai  $z < R$  pendekatan lain dari persamaan (15) bukan dengan bentuk  $R/z$  tetapi dalam bentuk  $z/R$  didapatkan:

$$g = 12,77 \times 10^{-3} \rho R^2 \left( 1 - \frac{z}{R} + \frac{z^2}{2R^2} - \frac{z^4}{8R^4} + \frac{z^6}{16R^6} \right)$$

untuk  $z < r < R$ , persamaan nilai di luar sumbu dapat dinyatakan dalam bentuk

$$g(r, \theta) = k \sum_{m=0}^{\infty} a_m r^m P_m(\mu) = k \{ a_0 + a_1 r P_1(\mu) + a_2 r^2 P_2(\mu) + a_3 r^3 P_3(\mu) + \dots \}$$

Sehingga koefisien pada sumbu ( $r = z, \theta = 0$ ) didapatkan

$$a_0 = R, a_1 = -1, a_2 = 1/2R, a_3 = a_5 = a_{2n+1} = 0, a_4 = 1/8 R^3, \dots$$

Jadi untuk di luar sumbu  $z$ , persamaan untuk  $z \leq r \leq R$ , menjadi

$$g(r, \theta) = 2\pi G \rho R \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right) P_1(\mu) + \frac{1}{2} \left( \frac{r}{R} \right)^2 P_2(\mu) - \frac{1}{8} \left( \frac{r}{R} \right)^4 P_4(\mu) + \dots \right\}$$

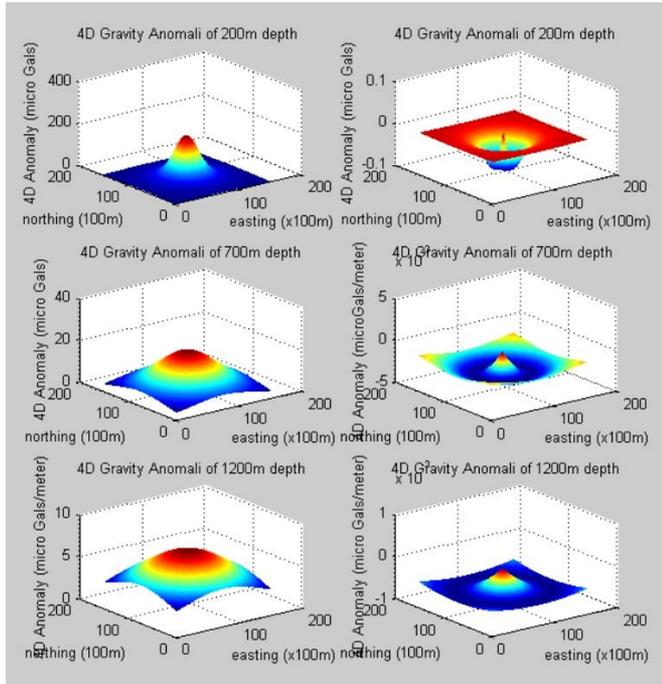
Pada gambar 4. tampak bahwa arah radial adalah arah  $x$ . Dengan mengganti  $r$  pada tiap suku

persamaan (18) dengan  $x^2 + z^2$  dan menderivatif tiap suku tersebut didapatkan:

$$\frac{\partial g}{\partial x}(x, \theta) = 2\pi G\rho R \left\{ 1 - \left( \frac{1}{R\sqrt{x^2+z^2}} - \frac{x^2}{R(x^2+z^2)^{3/2}} \right) P_1(\mu) + \frac{1}{2} \left( \frac{2x}{R^2} \right) P_2(\mu) - \frac{1}{2} \left( \frac{x^2+z^2}{R^4} \right) P_4(\mu) + \dots \right\}$$

Untuk nilai  $R$  antara  $r$  dan  $z$ , dengan  $r < R < z$ , kita gunakan deret yang berbeda yaitu dengan persamaan:

$$g(r, \theta) = 2\pi G\rho R \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{R}{r} \right) + \frac{1}{8} \left( \frac{R}{r} \right)^3 P_2(\mu) - \frac{1}{16} \left( \frac{R}{r} \right)^5 P_4(\mu) + \dots \right\}$$



Gambar 5. Anomali gravitasi fitur geologi bentuk silinder dan Derivatif Radial untuk berbagai kedalaman dihitung secara analitis

Sebagaimana penggantian  $r$  pada tiap suku persamaan (20), maka  $r$  pada persamaan (16) juga diganti dengan  $x^2 + z^2$  dan Derivatif Radial didapatkan dengan menderivatif tiap suku tersebut sehingga didapatkan:

$$g(r, \theta) = 2\pi G\rho R \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{-Rx}{(x^2+z^2)^{3/2}} \right) + \frac{3}{8} \left( \frac{-R^3x}{(x^2+z^2)^{5/2}} \right) P_2(\mu) - \frac{15}{16} \left( \frac{R^5x}{(x^2+y^2)^{3/2}} \right) P_4(\mu) + \dots \right\}$$

Gambar 5. menunjukkan anomali fitur geologi dengan berbagai kedalaman serta Derivatif Radial untuk berbagai kedalaman yang sesuai dihitung secara analitis.

**Kesimpulan**

First Radial Derivatif (FRD) adalah turunan horizontal pertama dalam arah radial konsentris terhadap titik tertentu yang dianggap mewakili pusat anomali. Secara visual FRD dapat menunjukkan batas kontras densitas

dengan cukup baik. Melakukan FRD pada anomali gravitasi dapat memberikan tambahan banyak informasi tentang batas kontras densitas di daerah tersebut. Second Derivatif Radial (SRD) adalah turunan horizontal kedua dalam arah radial konsentris terhadap titik tertentu yang dianggap mewakili pusat anomali atau pusat massa yang di eksplorasi. Secara visual FRD dapat menunjukkan batas kontras densitas dengan sangat tajam. Untuk menambah ketajaman anomali, maka dapat dilakukan cutting pada nilai SRD. Dengan perlakuan cutting, SRD dari anomali akan menunjukkan secara visual batas yang sangat tegas dari kontras densitas. Melakukan FRD pada anomali gravitasi dapat memberikan tambahan banyak informasi tentang batas kontras densitas melalui tampilan visual. Metode SRD ini akan memperkaya instrument interpretasi anomali gravitasi, khususnya anomali kontras densitas secara vertikal.

**Daftar Pustaka**

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.

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

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.

Grand, F.S. and West, G.F., 1965, "Interpretation Theory injeksi Applied Geophysics", McGraw Hill Inc..

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

Kumar, S., Rosat, S., Hinderer, J., Mouyen, M., Boy, J.P. And. Israil, M., 2023, Delineation of Aquifer Boundary by Two Vertical Superconducting Gravimeters in a Karst Hydrosystem, France, Pure Appl. Geophys. 180 (2023), 611-628 <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03186-7>

- Kuhn, M. and Hirt, C., 2016, Topographic gravitational potential up to second-order derivatives: an examination of approximation errors caused by rock-equivalent topography (RET), *J Geod* (2016) 90:883–902, DOI 10.1007/s00190-016-0917-6
- 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, 75th Anniversary: Historical development of the gravity method in exploration, *Geophysics*, Vol. 70 (6), P 63ND-89ND.
- 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.
- Reynolds, J.M., 1997, "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons, Chichester
- Riccardi, U., Hinderer, J., Zahran, K., Issawy, E., Rosat, S., Littel, F., and Ali, s., 2022, A First Reliable Gravity Tidal Model for Lake Nasser Region (Egypt). *Pure Appl. Geophysics*. 180 (2023), 661–682 2022 <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03087-9>.
- 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
- Šprlák, M., Han, S.C., and Featherstone, W. E, 2018, Forward modelling of global gravity fields with 3D density structures and an application to the high-resolution (~ 2 km) gravity fields of the Moon. *Journal of Geodesy* (2018) 92:847–862 <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1098-7>
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherif, R.E., and Keys, D.A., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge
- Tenzer, R., Novák, P., Vajda, P., Gladkikh, V and Hamayun, H., 2022, *Spectral harmonic analysis and synthesis of Earth's crust gravity field*. *Comput Geosci* (2012) 16:193–207. DOI 10.1007/s10596-011-9264-0
- 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 Univeristy