Geosfera: Jurnal Penelitian Geografi (GeoJPG)
Vol.5 No.2 Desember 2026, Hal.173-191
DOI: https://doi.org/10.37905/geojpg.v5i2.41729

p - ISSN: 2962-5424
e - ISSN: 2962-5416

Evaluasi Teknik-Teknik Pemisahan Anomali Gravitasi menggunakan Data Gravitasi Sintetis

Ahmad Rizal[1]*, I Putu Putra Wira Sarwa Yudha[2], Relly Margiono[3]
[1] Balai Besar Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Wilayah V, Indonesia
[2] Stasiun Meteorologi Kelas III Mararena-Sarmi, Indonesia
[3] Program Studi Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia
*Email Koresponden: ahmad.rizal@bmkg.go.id

Diterima: 25-09-2026 **Disetujui: 06-11-2026** **Publish: 01-12-2026**

Abstrak Pemisahan anomali regional dan residual merupakan langkah penting dalam interpretasi data gravitasi, tetapi evaluasi komparatif teknik pemisahan pada model tiga dimensi (3D) dengan noise masih terbatas. Penelitian ini membandingkan kinerja Butterworth, Moving Average, Upward Continuation, dan Polinomial Orde 2 pada tiga skenario sintetis 3D: target terisolasi, multisumber rapat, dan kontak sesar asimetris, dengan kontaminasi White Gaussian Noise sebesar 5%. Parameter optimal ditentukan melalui analisis Radial Average Power Spectrum (RAPS). Kinerja dievaluasi menggunakan empat indikator berbobot, yaitu Root Mean Square Error (RMSE), korelasi Pearson (CC), Signal-to-Noise Ratio (SNR), dan akurasi estimasi kedalaman regional (%Z). Hasil menunjukkan bahwa keunggulan metode bergantung pada geometri target. Pada target terisolasi, Moving Average dan Butterworth memperoleh skor tertinggi, masing-masing 13 poin. Upward Continuation unggul pada multisumber rapat dengan 14 poin dan kontak sesar asimetris dengan 13 poin. Dengan demikian, Moving Average dan Butterworth direkomendasikan untuk target tunggal sederhana, sedangkan Upward Continuation lebih sesuai untuk multisumber berdekatan dan batas sesar dengan gradien lateral tinggi. Temuan ini memberikan panduan pemilihan metode berdasarkan geometri target, tetapi penerapannya pada data lapangan memerlukan validasi lebih lanjut.

Kata kunci: Pemisahan Anomali; *Butterworth*; *Moving Average*; U*pward Continuation*; Polinomial

Abstract *Separating regional and residual anomalies is essential for gravity data interpretation, yet comparative evaluations of separation techniques using noisy three-dimensional (3D) models remain limited. This study compares Butterworth, Moving Average, Upward Continuation, and second-order polynomial methods across three synthetic 3D scenarios: an isolated target, closely spaced sources, and an asymmetric fault contact, contaminated with 5% white Gaussian noise. Optimal parameters were determined through radial average power spectrum (RAPS) analysis. Performance was assessed using four weighted indicators: root mean square error (RMSE), Pearson correlation coefficient (CC), signal-to-noise ratio (SNR), and regional depth estimation accuracy (%Z). The results show that method performance depends on target geometry. For the isolated target, Moving Average and Butterworth achieved the highest scores of 13 points each. Upward Continuation performed best for closely spaced sources and the asymmetric fault contact, scoring 14 and 13 points, respectively. Accordingly, Moving Average and Butterworth are recommended for simple isolated targets, whereas Upward Continuation is better suited to closely spaced sources and fault boundaries with strong lateral gradients. These findings guide method selection based on target geometry, although further validation using field data is required.*

Keywords: *Anomaly Separation; Butterworth; Moving Average; Upward Continuation; Polynomial*

1. PENDAHULUAN

Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan variasi medan gravitasi di permukaan bumi untuk memetakan struktur geologi di bawah permukaan. Prinsip metode ini didasarkan pada hukum gravitasi universal yang menyatakan bahwa setiap massa di bawah permukaan akan memberikan gaya tarik yang proporsional dengan besarnya densitas massa tersebut. Perbedaan densitas antar batuan menyebabkan timbulnya anomali gravitasi yang dapat direkam oleh instrumen gravimeter di permukaan bumi (Hinze et al., 2013). Secara fungsional, metode ini sangat efektif untuk mengidentifikasi distribusi massa secara lateral maupun vertikal tanpa memerlukan kontak langsung dengan target geologi (Hinze et al., 2013) . Dalam praktiknya, survei gravitasi sering digunakan sebagai langkah awal dalam kegiatan eksplorasi karena mampu memberikan gambaran awal mengenai kondisi tektonik, cekungan sedimen, maupun potensi sumber daya mineral di suatu wilayah (Hinze et al., 2013). Pengukuran yang dilakukan di permukaan bumi menghasilkan data anomali total yang merepresentasikan akumulasi seluruh respons massa dari berbagai tingkat kedalaman (Reynolds, 2011). Beberapa penelitian di Indonesia telah menerapkan metode gravitasi untuk berbagai tujuan, seperti pemetaan sesar aktif (Margiono et al., 2021; Novitri et al., 2025; Zakariya et al., 2022), penentuan kedalaman sedimen

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

(Dewanto et al., 2023; Segoro & Margiono, 2025), dan eksplorasi mineral (Hasanah et al., 2024; Raja et al., 2025).

Sifat akumulatif dari data anomali total menciptakan ambiguitas interpretasi yang secara signifikan membatasi kepastian solusi dalam pemisahan anomali residual dan regional. Permasalahan mendasar ini muncul karena distribusi massa yang berbeda pada berbagai variasi kedalaman dapat menghasilkan respons anomali gravitasi yang identik di permukaan, sebuah fenomena yang dikenal sebagai prinsip ekuivalensi (Hinze et al., 2013). Secara fisis, ketidakpastian tersebut bersumber dari superposisi linier antara berbagai komponen sinyal dengan panjang gelombang yang berbeda (Dentith & Mudge, 2014). Sinyal berfrekuensi rendah umumnya merepresentasikan pengaruh struktur regional yang dalam, sedangkan komponen berfrekuensi tinggi merepresentasikan distribusi massa residual yang berasal dari struktur yang lebih dangkal (Kearey et al., 2009). Tumpang tindih spektrum yang terjadi di antara kedua komponen tersebut menyebabkan proses identifikasi target geologi menjadi sangat kompleks dan cenderung subjektif (Hinze et al., 2013). Oleh karena itu, penerapan teknik pemisahan anomali yang presisi menjadi tahapan penting untuk meminimalisir ambiguitas guna memperoleh estimasi anomali target yang lebih akurat.

Teknik pemisahan anomali sering menghadapi kendala dalam mempertahankan kualitas hasil pemisahan. Salah satu metode yang umum digunakan adalah teknik regresi polinomial, yang sangat bergantung pada ketepatan penentuan orde. Pemilihan orde yang kurang tepat dapat menghasilkan estimasi tren regional yang bias serta menyebabkan distorsi pada sinyal residual (Lowrie, 2014). Di sisi lain, teknik *Moving Average* dan *Upward Continuation* cenderung berperan sebagai *low-pass filter* yang dapat menimbulkan efek *over smoothing* pada tepi-tepi anomali (Hinze et al., 2013). Sementara itu, teknik *butterworth* pada domain frekuensi menawarkan pendekatan yang lebih fleksibel dalam mengontrol ketajaman transisi spektrum, tetapi tetap memerlukan penentuan *cut-off wavenumber* secara presisi untuk meminimalkan efek *ringing* (Kearey et al., 2009). Berbagai keterbatasan tersebut berpotensi menghilangkan informasi detail pada struktur geologi yang bersifat diskontinu, seperti patahan vertikal maupun batas intrusi yang tajam (Hinze et al., 2013). Selain itu, keberadaan *Noise* berfrekuensi tinggi pada data lapangan sering kali tidak dapat direduksi secara optimal tanpa mengurangi amplitudo anomali target (Kearey et al., 2009). Oleh karena itu, diperlukan evaluasi yang komprehensif terhadap berbagai teknik pemisahan anomali untuk menentukan metode yang paling adaptif terhadap variasi kondisi geologi suatu wilayah.

Evaluasi terhadap performa berbagai teknik pemisahan anomali memerlukan parameter pembanding yang bersifat deterministik dan terkontrol secara presisi. Penggunaan data sintetis melalui *forward modeling* merupakan prosedur standar dalam riset geofisika untuk memvalidasi keandalan suatu teknik karena seluruh parameter fisik seperti kedalaman, geometri, dan kontras densitas sumber telah diketahui secara pasti. Melalui simulasi menggunakan data sintetis, efektivitas sebuah teknik dalam memisahkan anomali residual dan anomali regional dapat dikuantifikasi secara objektif tanpa adanya ketidakpastian geologi yang umum ditemukan pada data lapangan (Hinze et al., 2013). Selain itu, pengujian pada berbagai model geometri yang berbeda memungkinkan dilakukannya analisis sensitivitas terhadap kemampuan filter dalam mempertahankan karakteristik spektral dan spasial anomali (Hinze et al., 2013). Pendekatan ini memberikan landasan teoritis yang kokoh dalam menentukan batasan operasional dari setiap metode pemisahan anomali sebelum diaplikasikan pada kasus eksplorasi yang lebih kompleks.

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya melakukan evaluasi dan komparasi terhadap teknik pemisahan anomali, seperti penelitian Purnomo et al. (2016) yang membandingkan teknik *Moving Average*, Polinomial, dan Inversi pada data gravitasi, serta Ilapadila et al. (2019) yang mengoptimasi parameter pengangkatan *Upward Continuation* pada data geomagnetik. Namun demikian, studi-studi tersebut umumnya masih terbatas pada pengujian satu jenis medan potensial, berfokus pada evaluasi metode secara tunggal, atau belum mengevaluasi performa filter pada berbagai variasi kompleksitas geometri struktur geologi secara kontras. Selain itu, penentuan parameter input pada metode filtrasi dalam penelitian terdahulu sering kali masih dilakukan secara subjektif tanpa memanfaatkan analisis spektral yang terkontrol secara deterministik.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada skema evaluasi komparatif secara simultan terhadap empat teknik pemisahan anomali gravitasi yaitu teknik Butterworth, *Moving Average*, *Upward Continuation*, dan Polinomial pada tiga skenario variasi geometri sumber bawah permukaan 3D yang dikontrol ketat oleh model acuan analitik eksak (Fukushima, 2020) berkontaminasi *White Gaussian Noise*. Kontribusi utama

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

penelitian ini adalah mengintegrasikan penentuan parameter filter berbasis analisis spektral *Radial Average Power Spectrum* (RAPS) yang deterministik dengan skema evaluasi kuantitatif multidimensi (RMSE, Korelasi Pearson, SNR, dan akurasi kedalaman regional). Melalui pendekatan komprehensif ini, penelitian ini dapat memetakan keunggulan fisis, keterbatasan operasional, serta memberikan panduan dan rekomendasi pemilihan teknik pemisahan anomali gravitasi yang objektif untuk berbagai kondisi kompleksitas geologi di bawah permukaan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Data Sintetis

Data anomali gravitasi dibuat menggunakan *forward modeling* prisma 3D berdasarkan formulasi analitik eksak Nagy (1966). Penelitian ini menggunakan 3 skenario berbeda pada anomali residualnya (anomali dangkal). Ketiga skenario yang diuji dirancang untuk merepresentasikan kondisi eksplorasi darat yang relevan, yaitu skenario I (Target Terisolasi) mewakili struktur intrusi atau kantong reservoar tunggal sebagai baseline pengujian, skenario II (Resolusi Spasial Rapat) mewakili kompleksitas multisumber berdekatan untuk menguji daya pisah filter, serta skenario III (Kontak Sesar Asimetris) mewakili diskontinuitas akibat patahan aktif untuk menguji ketajaman rekonstruksi gradien lateral. Melalui integrasi volume terhadap koordinat batas massa sumber tersebut, komponen vertikal gaya tarik gaya berat (g_z) pada titik pengamatan dapat dihitung secara presisi untuk menjadi data kontrol yang objektif.

$$g_z = G\Delta\rho \int_V' \frac{z - z'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} dV' \quad (1)$$

$$g_z = G\Delta\rho \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{2} \mu_{ijk} \left[x_i ln(y_j + r_{ijk}) + y_j ln(x_i + r_{ijk}) - z_k arctan \frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}} \right] \quad (2)$$

Dimana G adalah konstanta gravitasi universal ($6{,}674 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2}), $\Delta\rho$ adalah kontras densitas antara massa sumber dan batuan samping (kg/m^3), (x, y, z) adalah koordinat titik pengamatan, (x', y', z') adalah koordinat titik sumber, dan V' adalah volume sumber. Variabel $r_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ adalah jarak Euclidean dari titik observasi ke sudut-sudut prisma, $\mu_{ijk} = (-1)^{i+j+k}$ adalah operator paritas koordinat, serta x_i, y_j, z_k adalah batas-batas koordinat prisma pada ruang tiga dimensi.

Guna mendekati kondisi akuisisi riil di lapangan, data anomali gravitasi total murni dikombinasikan dengan komponen gangguan acak berupa *White Gaussian Noise* (WGN) sebesar 5%. Pemilihan WGN didasarkan pada karakteristik fisis dan spektralnya yang relevan dengan respons pengukuran geofisika. Secara fisis, distribusi probabilitas Gaussian merepresentasikan akumulasi galat acak dari berbagai sumber independen saat pengukuran gravimeter di lapangan, seperti fluktuasi mikroseismik lokal, heterogenitas variasi densitas dangkal pada lapisan tanah penutup, ketidaksempurnaan koreksi medan, serta toleransi dan variasi *drift* linier instrumen (Hinze et al., 2013). Penggunaan skala *noise* ini juga sejalan dengan skema pemodelan geofisika sintetis terkini, seperti yang diterapkan oleh Dubey et al. (2023) untuk menguji keandalan dan stabilitas rekonstruksi model medan potensial gravitasi terhadap kontaminasi gangguan acak. Sementara itu, sifat spektral *"white"* menandakan bahwa gangguan memiliki kerapatan spektrum daya yang konstan pada seluruh rentang bilangan gelombang spasial (k). Karakteristik spektral konstan ini berfungsi untuk menguji ketahanan (*robustness*) serta daya saring masing-masing teknik pemisahan dalam mereduksi gangguan berfrekuensi tinggi tanpa mengikis nilai amplitudo puncak maupun mendistorsi batas geometri asli dari target struktur geologi.

Secara komputasi dan statistik, besarnya skala gangguan dikontrol secara deterministik berdasarkan persentase 5% dari nilai amplitudo absolut maksimum anomali total murni pada masing-masing skenario pengujian. Nilai standar deviasi *noise* (σ_{noise}) dihitung pada Persamaan (3) melalui perkalian antara faktor skala 0,05 dengan nilai amplitudo absolut maksimum $|g_{\text{total}}(x, y)|$ pada grid pengamatan seluas 100 km $\times$ 100 km. Berdasarkan nilai σ_{noise} yang terukur pada masing-masing skenario, matriks gangguan $\epsilon(x, y)$ pada Persamaan (4) dibangkitkan untuk setiap titik koordinat grid (i, j) menggunakan fungsi generator acak terdistribusi normal dengan rata-rata nol ($\mu = 0$) dan varians σ_{noise}^2.

$$\sigma_{\text{noise}} = 0{,}05 \times \max(|g_{\text{total}}(x, y)|) \quad (3)$$

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

$$\epsilon(x,y) \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2_{\text{noise}}) \quad (4)$$

$$g_{total\ noisy} = g_{total} + \epsilon \quad (5)$$

Dimana $\mathcal{N}$ adalah operator fungsi distribusi normal (distribusi Gaussian), $g_{\text{total_noisy}}$ adalah data anomali gravitasi terkontaminasi *noise*, g_{total} adalah data anomali gravitasi ideal tanpa *noise*, dan ϵ adalah komponen *White Gaussian Noise* yang terdistribusi normal dengan standar deviasi bernilai tertentu dari amplitudo maksimum g_{total}.

Selanjutnya, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (5), data anomali gravitasi total kotor ($g_{\text{total_noisy}}$) yang diposisikan sebagai masukan awal filtrasi dibentuk melalui proses superposisi linier dengan menjumlahkan sinyal ideal $g_{\text{total}}(x,y)$ dan matriks gangguan $\epsilon(x,y)$ secara titik demi titik. Melalui skema pembentukan *noise* yang terukur dan terformulasi secara presisi ini, keempat teknik pemisahan dievaluasi secara ketat dan objektif dalam mengisolasi sinyal target serta mereduksi kontaminasi frekuensi tinggi tanpa memicu timbulnya artefak numerik maupun kebocoran sinyal regional.

2.2. Penentuan Parameter

Penentuan parameter input pada keempat teknik pemisahan dilakukan secara transparan dan objektif menggunakan analisis Radial Average Power Spectrum (RAPS) untuk mengekstraksi nilai cut-off wavenumber (k_c) sebagai titik kontrol spektral utama (Hinze et al., 2013). Prosedur objektif ini sangat krusial untuk menjamin perbandingan antarmetode yang adil serta memastikan seluruh proses filtrasi dapat direplikasi. Tahapan ini diawali dengan melakukan Transformasi Fourier dua dimensi terhadap data anomali total terkontaminasi noise $g_{total\ noisy}$ untuk mengubah domain spasial (x dan y) menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang ($k_x\ dan\ k_y$).

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} g(x,y)e^{-i(k_x x + k_y y)}dxdy \quad (6)$$

Radial Average Power Spectrum (RAPS) digunakan untuk memetakan hubungan antara spektrum daya rata-rata radial $P(k)$ terhadap bilangan gelombang radial $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$. Dalam domain frekuensi, spektrum daya dari distribusi massa pada kedalaman rata-rata z meluruh secara eksponensial. Melalui transformasi logaritma natural, hubungan eksponensial tersebut diubah menjadi hubungan linear sehingga kedalaman rata-rata sumber anomali dapat diestimasi berdasarkan nilai gradiennya. Gradien pada komponen frekuensi rendah merepresentasikan estimasi kedalaman sumber regional (z_{reg}), sementara gradien pada frekuensi tinggi merepresentasikan estimasi kedalaman sumber residual (z_{res}).

$$P(k) = Ae^{-2zk} \quad (7)$$

$$ln(P(k)) = lnA - 2zk \quad (8)$$

$$z = -\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta ln(P)}{\Delta k}\right) \quad (9)$$

Estimasi kedalaman yang diperoleh dari analisis gradien RAPS menjadi basis dalam menentukan *cut-off wavenumber* (k_c) secara terukur. Nilai k_c ditetapkan pada titik perpotongan antara tren gradien regional dan residual untuk diuji menggunakan skema *multiplier* k_c pada teknik Butterworth. Selanjutnya, nilai k_c ini dikonversi secara matematis menjadi lebar jendela spasial acuan N untuk teknik *Moving Average* agar kedua metode bekerja pada batas frekuensi yang setara, dengan rentang pengujian ukuran jendela ganjil di sekitar nilai acuan tersebut. Sementara itu, parameter untuk teknik *Upward Continuation* diuji pada rentang ketinggian $h = 50\text{-}2000$ m dengan memanfaatkan kedalaman fisis model regional ($z = 10$ km) sebagai acuan peluruhan medan potensial. Adapun pada teknik Polinomial, pemisahan dievaluasi secara statistik berbasis *least squares* pada rentang orde permukaan satu hingga lima. Solusi pemisahan terbaik dari setiap teknik diambil berdasarkan titik balik optimal pada kurva evaluasi yang menghasilkan nilai RMSE minimum, Korelasi Pearson maksimum, SNR maksimum, dan kesalahan estimasi kedalaman terendah.

$$kc = \frac{1}{z_{reg} + z_{res}} \quad (10)$$

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

$$N = \frac{2\pi}{kc\Delta x} \tag{11}$$

Dimana $F(k_x, k_y)$ Adalah transformasi fourier dari data anomali gravitasi dalam domain frekuensi, $g(x, y)$ adalah data anomali gravitasi dalam domain spasial, $P(k)$ adalah nilai *radial average power spectrum*, k adalah bilangan gelombang, A adalah konstanta amplitudo yang berkaitan dengan sifat sumber massa, z adalah estimasi kedalaman rata-rata sumber anomali, z_{reg} z_{res} adalah estimasi kedalaman sumber regional dan residual, kc adalah *cut-off wavenumber*, N adalah lebar jendela, dan Δx adalah jarak spasi antar titik pengukuran.

2.3. Pemisahan Anomali

2.3.1. *Butterworth*

Teknik Butterworth merupakan teknik filtrasi pada domain frekuensi yang dirancang untuk menghasilkan respons frekuensi sedatar mungkin pada *pass-band* (Tan & Jiang, 2019). Persamaan fungsi transfer filter Butterworth dinyatakan sebagai:

$$H(k) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{kc}{k}\right)^{2n}}} \tag{12}$$

Dimana $H(k)$ adalah respons filter, k adalah bilangan gelombang radial, k_c adalah *cut-off wavenumber*, dan n adalah orde filter ($n = 3$).

2.3.2. *Moving Average*

Teknik *Moving Average* merupakan teknik pemisahan anomali pada domain spasial yang bekerja dengan cara menghitung nilai rata-rata di dalam jendela (*window*) yang bergerak secara simultan pada seluruh titik data grid. Proses perataan ini berfungsi sebagai filter *low-pass* yang menekan fluktuasi frekuensi tinggi untuk mengekstraksi komponen regional (Hinze et al., 2013). Persamaan untuk menghitung anomali regional menggunakan teknik *Moving Average* dua dimensi dinyatakan sebagai:

$$g_{reg}(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=-L}^{L} \sum_{n=-L}^{L} g_{total}(i + m, j + n) \tag{13}$$

Dimana $g_{\text{reg}}(i, j)$ adalah nilai anomali regional hasil estimasi pada titik grid (i, j), N adalah lebar jendela pengamatan ganjil, dan ($L = \frac{N-1}{2}$) adalah radius jendela. Komponen residual diperoleh dari selisih: $g_{\text{res}} = g_{\text{total}} - g_{\text{reg}}$.

2.3.3. *Upward Continuation*

Teknik *Upward Continuation* merupakan teknik pemisahan anomali yang mentransformasikan medan gravitasi dari permukaan pengamatan ke tingkat elevasi yang lebih tinggi. Prinsip dasar metode ini memanfaatkan sifat fisis medan potensial yang meluruh secara proporsional terhadap jarak, di mana komponen anomali residual dari sumber dangkal meluruh lebih cepat dibandingkan komponen regional (Hinze et al., 2013). Respons teknik *Upward Continuation* dalam domain frekuensi dinyatakan sebagai:

$$F[U_{up}] = F[U]e^{-kh} \tag{14}$$

Dimana $F[g_{\text{up}}]$ adalah transformasi Fourier dari anomali regional hasil pengangkatan, $F[g_{\text{total}}]$ adalah transformasi Fourier dari data anomali total, dan h adalah ketinggian pengangkatan (m). Komponen residual diperoleh dari selisih: $g_{\text{res}} = g_{\text{total}} - g_{\text{up}}$.

2.3.4. Polinomial

Teknik Polinomial merupakan teknik pemisahan anomali yang menggunakan pendekatan statistik berbasis metode kuadrat terkecil (*least squares*) untuk mencocokkan fungsi matematis pada data anomali total. Metode ini mengasumsikan bahwa komponen regional dapat direpresentasikan oleh tren permukaan orde rendah yang menggambarkan distribusi massa sangat dalam (Lowrie, 2014). Persamaan umum permukaan polinomial dua dimensi orde ke-n dinyatakan sebagai:

$$g_{reg}(x, y) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \tag{15}$$

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

Dimana $g_{\text{reg}}(x,y)$ adalah nilai anomali regional hasil estimasi, a_{ij} adalah koefisien polinomial yang dioptimasi, (x,y) adalah koordinat grid, dan n adalah orde polinomial ($n = 1$ hingga 5).

2.4. Parameter Evaluasi

2.4.1. *Root Mean Square Error* (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan parameter statistik kuantitatif yang digunakan untuk menghitung besarnya rata-rata deviasi galat kuadratik antara nilai anomali gravitasi hasil estimasi pemisahan (g_{estimasi}) terhadap nilai anomali kontrol murni *ground truth* (g_{asli}). Penggunaan RMSE sebagai indikator evaluasi utama dalam analisis data gravitasi didasarkan pada keandalan metrik ini dalam mendeteksi *omission error*, deviasi amplitudo absolut (mGal), serta akurasi resolusi sinyal pada berbagai panjang gelombang spektral, sebagaimana ditunjukkan oleh Narayan et al. (2023) dalam evaluasi pemodelan medan gravitasi global (*Global Gravity Models*) yang mengonfirmasi bahwa penekanan nilai RMSE berbanding lurus dengan peningkatan presisi resolusi struktur geologi bawah permukaan.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M}(g_{estimasi} - g_{asli})^2}{M}} \tag{16}$$

Dimana $g_{estimasi}$ adalah nilai anomali hasil estimasi (regional atau residual), g_{asli} adalah nilai anomali asli pada model sintetis, dan M adalah jumlah total titik data yang dievaluasi.

2.4.2. Korelasi Pearson

Korelasi Pearson (CC) merupakan parameter statistik non-dimensional yang digunakan untuk mengukur tingkat kekuatan hubungan linear dan kemiripan pola geometri spasial antara dua kumpulan data medan potensial. Penggunaan analisis Korelasi Pearson sebagai indikator evaluasi pola spasial data gravitasi telah terbukti andal dalam berbagai penelitian geofisika, seperti yang ditunjukkan oleh Suprianto et al. (2021) yang memanfaatkan teknik ini untuk menguji tingkat kesetaraan dan kemiripan pola kontur anomali gravitasi antara dataset *GGMPlus*, *Topex*, dan *BGI*. Dalam penelitian ini, Korelasi Pearson digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik sebuah teknik pemisahan mampu mempertahankan karakteristik geometri dan tren distribusi anomali residual maupun regional hasil estimasi (g_{estimasi}) dibandingkan dengan data kontrol murni *ground truth* (g_{asli}). Analisis korelasi memberikan informasi obyektif mengenai presisi rekonstruksi bentuk struktur tanpa bergantung pada skala nilai absolutnya (Hinze et al., 2013; Lowrie, 2014).

$$CC = \frac{\sum\left(g_{estimasi} - \underline{g}_{estimasi}\right)\left(g_{asli} - \underline{g}_{asli}\right)}{\sqrt{\sum\left(g_{estimasi} - \underline{g}_{estimasi}\right)^2\left(g_{asli} - \underline{g}_{asli}\right)^2}} \tag{17}$$

Dimana $g_{estimasi}$ adalah nilai anomali hasil estimasi (regional atau residual), $g_{estimasi}$ adalah nilai rata-rata dari anomali hasil estimasi, g_{asli} adalah nilai anomali asli pada model sintetis, dan g_{asli} adalah nilai rata-rata dari anomali asli.

2.4.3. Akurasi Kedalaman

kurasi kedalaman merupakan parameter evaluasi fisis yang digunakan untuk mengukur sejauh mana setiap teknik pemisahan mampu mengisolasi sinyal yang benar-benar berasal dari kedalaman target. Akurasi kedalaman dihitung dengan melakukan analisis RAPS kembali pada data hasil pemisahan untuk mengestimasi kedalaman sumber pasca-filtrasi ($z_{estimasi}$). Nilai estimasi tersebut kemudian dibandingkan dengan kedalaman fisis model sintetis (z_{asli}). Parameter ini menjadi indikator vital untuk membuktikan validitas fisis dari suatu teknik dalam memisahkan anomali pada kedalaman target tanpa tercampur oleh respons massa dari kedalaman lain (Hinze et al., 2013). Semakin tinggi persentase akurasi kedalaman, semakin efektif teknik tersebut dalam mengatasi ambiguitas kedalaman.

$$\%Z = \left(1 - \left|\frac{z_{asli} - z_{estimasi}}{z_{asli}}\right|\right)100\% \tag{18}$$

Dimana $\%Z$ adalah persentase tingkat akurasi estimasi kedalaman, z_{asli} adalah kedalaman sumber pada model sintetis, dan $z_{estimasi}$ adalah kedalaman hasil estimasi berdasarkan analisis gradien RAPS.

2.4.4. *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)

Signal-to-Noise Ratio (SNR) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas hasil pemisahan dengan membandingkan kekuatan sinyal target terhadap tingkat gangguan yang tersisa. Dalam

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

penelitian ini, SNR berfungsi untuk mengevaluasi efektivitas teknik pemisahan dalam mengisolasi komponen residual dengan tetap menjaga kemurnian sinyal asli dari kontaminasi *noise* dan artefak numerik. Nilai SNR dinyatakan dalam satuan desibel (dB). Semakin tinggi nilai SNR, semakin bersih hasil pemisahan yang diperoleh, yang menandakan komponen anomali target jauh lebih dominan dibandingkan tingkat gangguannya. Sebaliknya, nilai SNR yang rendah atau bernilai negatif mengindikasikan bahwa hasil pemisahan didominasi gangguan yang mengaburkan interpretasi geologi (Kearey et al., 2009). Persamaan SNR untuk evaluasi anomali gravitasi dinyatakan sebagai:

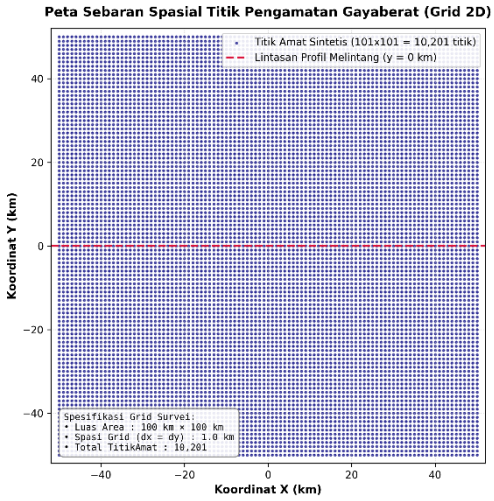
$$SNR = 10log_{10}\left(\frac{\sum(g_{asli})^2}{\sum(g_{asli} - g_{estimasi})^2}\right) \quad (19)$$

Dimana SNR adalah nlai perbandingan sinyal terhadap gangguan (dB), g_{asli} adalah nilai anomali asli pada model sintetis, dan $g_{estimasi}$ adalah nilai anomali hasil estimasi (regional atau residual).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data Sintetis

Gambar 1 menunjukkan distribusi spasial 10.201 titik pengamatan sintetis yang tersebar merata pada area survei seluas 100 km $\times$ 100 km dengan interval spasi antar titik sebesar 1 km ($\Delta x = \Delta y = 1$ km). Garis putus-putus merah pada koordinat $y = 0$ km menandakan lintasan profil melintang utama yang digunakan untuk evaluasi kontur anomali dan penampang geometri geologi bawah permukaan. Penelitian ini menggunakan 3 skenario pengujian dengan variasi kompleksitas geologi bawah permukaan. Seluruh parameter dimensi dan nilai fisis dari massa sumber tersebut dirangkum secara lengkap pada Tabel 1. Untuk mengisolasi variabel eksperimen, parameter prisma regional dikunci secara konstan dan identik pada seluruh skenario yaitu pada kedalaman 10-12 km dengan kontras densitas 200 kg/m^3. Melalui skema ini, performa filter dapat dievaluasi secara murni berdasarkan kemampuan daya pisahnya terhadap variasi geometri spasial dari target dangkal (residual).

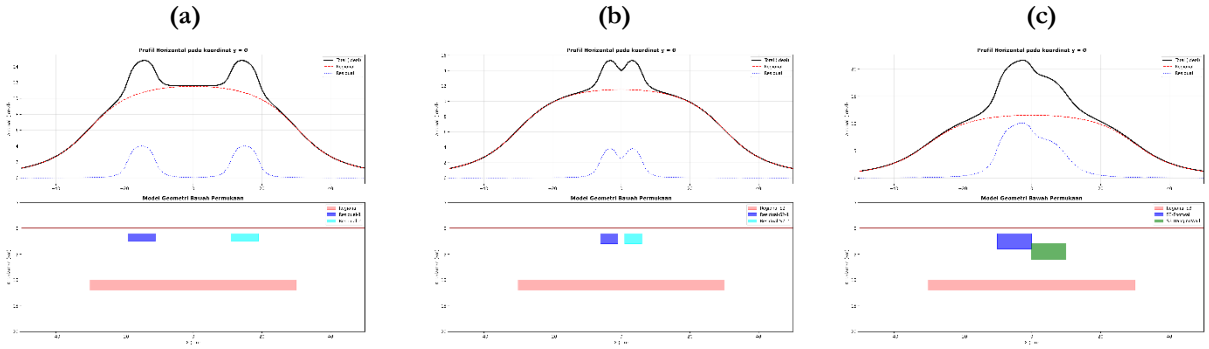


Gambar 1. Peta sebaran data pengukuran sintetis

Tabel 1. Parameter data model sintetis penelitian

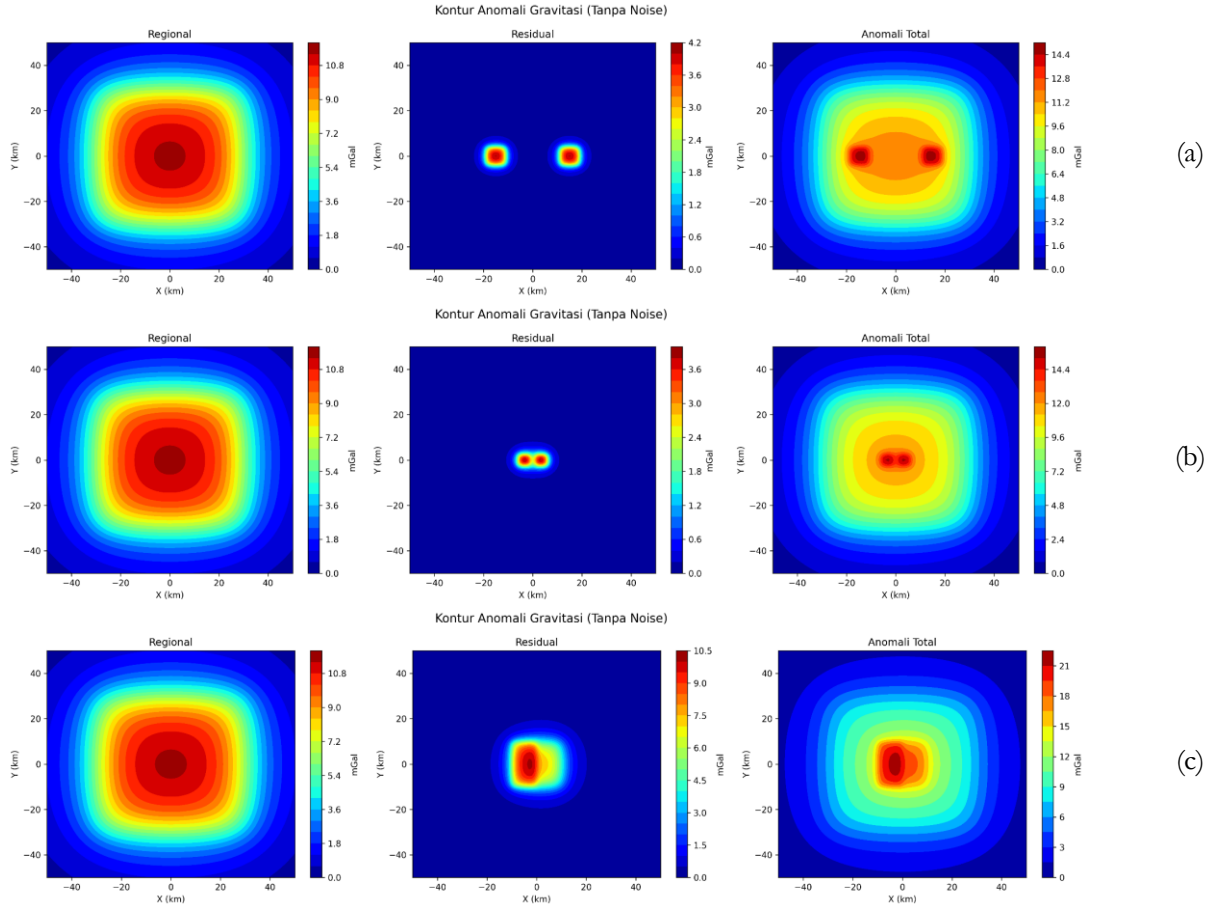
Skenario	Sumber	Densitas	x (km)	y (km)	z (km)
1	Regional	200	-30, 30	-30, 30	10, 12
	Residual	100	-19, -11	-4, 4	1, 2.5
	Residual	100	11, 19	-4, 4	1, 2.5
2	Regional	200	-30, 30	-30, 30	10, 12
	Residual	100	-6, -1	-2.5, 2.5	1, 3
	Residual	100	1, 6	-2.5, 2.5	1, 3
3	Regional	200	-30, 30	-30, 30	10, 12
	Residual	100	-10, 0	-10. 10	1, 4
	Residual	100	0, 10	-10. 10	3, 6

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.



Gambar 2. Profil horizontal dan bentuk geometri data sintetis pada skenario I (a), skenario II (b), dan skenario III (c)

Manifestasi fisis dari hasil kalkulasi komponen residual asli menampilkan karakter sebaran kontur yang terlokalisasi secara tegas sesuai dengan orientasi spasial massanya masing-masing (Gambar 2 dan Gambar 3). Pada Skenario I, gaya tarik dari kedua target dangkal membentuk pola kontur yang terisolasi secara lateral, merepresentasikan batas tegas dari kedua prisma ideal tersebut. Pada Skenario II, interaksi anomali dari dua prisma yang diposisikan rapat menghasilkan pola kontur bergradien tinggi yang saling berhimpit pada bagian tengah grid akibat jarak geometri yang sangat dekat. Sementara itu, pada Skenario III, peta kontur residual memperlihatkan pola kelurusan memanjang dengan kerapatan kontur yang sangat rapat di sepanjang bidang kontak. Pola kelurusan asimetris ini secara gamblang merepresentasikan lompatan nilai anomali akibat perbedaan kedalaman blok *footwall* (1-4 km) dan *hanging wall* (3-6 km) pada struktur sesar yang dimodelkan.

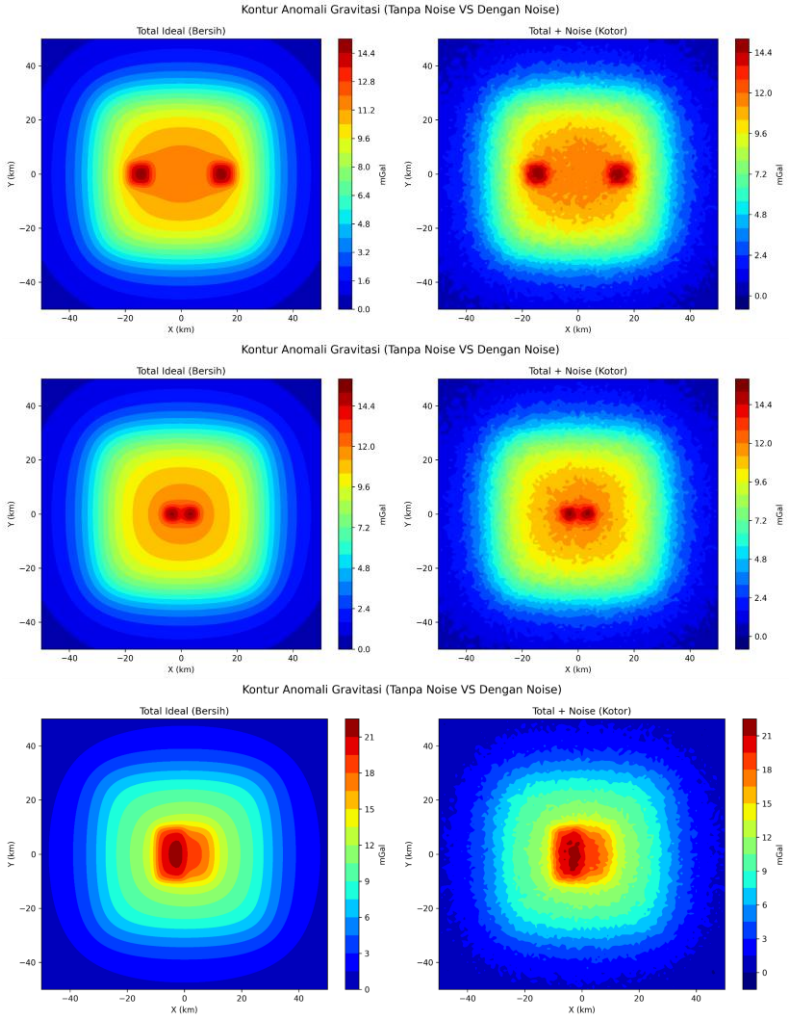


Gambar 3. Kontur anomali gravitasi sintetis pada skenario I (a), skenario II (b), dan skenario III (c)

Karakteristik kontur anomali total ideal tersebut kemudian berubah secara signifikan setelah dikombinasikan dengan komponen gangguan acak berupa *White Gaussian Noise* sebesar guna merepresentasikan kondisi riil data lapangan (Gambar 4). Keberadaan gangguan acak berfrekuensi tinggi tersebut memunculkan fluktuasi visual berupa riak-riak kecil (*ripple*) serta bintik-bintik sebaran nilai yang

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

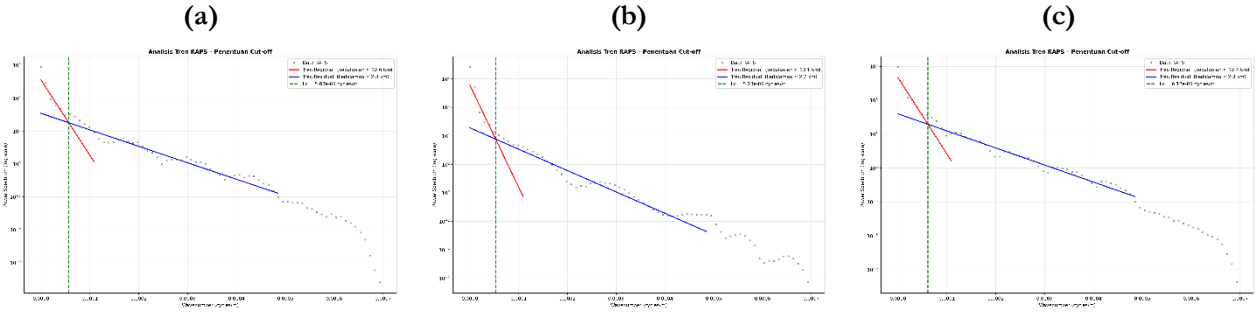
mengkontaminasi kehalusan kontur asli. Pada peta anomali yang sudah diberikan *noise*, dominasi sinyal regional yang luas dan pola lokal dari target residual kini tampak bersinggungan dengan gangguan permukaan. Munculnya kontaminasi ini secara fisis menjadi tantangan utama untuk menguji sejauh mana keempat teknik pemisahan yang dievaluasi mampu menyaring gangguan luar tanpa mengorbankan atau mendistorsi nilai amplitudo asli dari target struktur geologi yang sebenarnya.



Gambar 4. Kontur anomali gravitasi sintetis sebelum dan setelah diberikan *noise* pada skenario I (a), skenario II (b), dan skenario III (c)

3.2. Penentuan Parameter

Nilai *cut-off wavenumber* (k_c) ditetapkan secara objektif tepat pada titik perpotongan (*intersection point*) antara garis regresi linear regional dan residual tersebut (Gambar 5). Berdasarkan estimasi RAPS, diperoleh nilai k_c untuk masing-masing skenario yaitu, $k_c = 5{,}68 \times 10^{-6}$ m^{-1} ($z_{\text{reg}} \approx 12{,}6$ km; $z_{\text{res}} \approx 2{,}8$ km) pada Skenario I, $k_c = 5{,}28 \times 10^{-6}$ m^{-1} ($z_{\text{reg}} \approx 13{,}1$ km; $z_{\text{res}} \approx 2{,}7$ km) pada Skenario II, serta $k_c = 6{,}12 \times 10^{-6}$ m^{-1} ($z_{\text{reg}} \approx 12{,}4$ km; $z_{\text{res}} \approx 2{,}8$ km) pada Skenario III (Tabel 2).



Gambar 5. Analisis *Radial Analytic Power Spectrum* (RAPS) pada skenario I (a), skenario II (b), dan skenario III (c)

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

Nilai k_c spektral yang diperoleh dari RAPS kemudian diposisikan sebagai jembatan kontrol frekuensi utama untuk menyelaraskan parameter input antara teknik Butterworth dan teknik *Moving Average*. Pada teknik Butterworth, nilai k_c dimasukkan secara langsung ke dalam persamaan fungsi transfer filter *high-pass*. Sementara itu, pada teknik *Moving Average* yang bekerja di domain spasial, nilai k_c dikonversi secara matematis menjadi ukuran lebar jendela spasial acuan (N) menggunakan hubungan pada persamaan 11. Dengan spasi grid $\Delta x = 1$ km, konversi matematis ini menghasilkan lebar jendela acuan $N \approx 17$-19 titik grid untuk ketiga skenario. Penyelarasan berbasis konversi ini sangat krusial untuk memastikan bahwa teknik filtrasi domain frekuensi (Butterworth) dan perataan domain spasial (*Moving Average*) dievaluasi pada ambang pemotongan frekuensi yang setara secara fisis.

Di sisi lain, penentuan rentang parameter input untuk teknik *Upward Continuation* dan teknik Polinomial dirancang berdasarkan batasan fisis model regional acuan dan fleksibilitas matematis fungsi permukaannya. Pada teknik *Upward Continuation*, ketinggian pengangkatan diuji pada rentang $h = 50$ m hingga 2000 m. Pemilihan rentang elevasi ini didasarkan pada sifat peluruhan medan potensial, di mana elevasi pengangkatan bertahap digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana sinyal residual ber frekuensi tinggi meluruh sebelum merusak komponen regional yang bersumber pada kedalaman asli 10-12 km. Adapun pada teknik Polinomial, pemisahan dievaluasi pada rentang orde permukaan 1 hingga 5. Orde 1 dan 2 mewakili tren pencocokan permukaan orde rendah untuk menangkap kecenderungan regional sederhana, sedangkan orde 3 hingga 5 dievaluasi untuk menguji apakah peningkatan fleksibilitas orde mampu merepresentasikan kelengkungan regional secara akurat atau justru memicu kecenderungan *overfitting*.

Guna menanggulangi potensi kontaminasi *noise* dan pergeseran spektrum pada data kotor, penentuan parameter tidak hanya mengandalkan satu nilai k_c tunggal, melainkan menerapkan skema eksplorasi multi-parameter secara sistematis. Pada teknik Butterworth, nilai k_c dieksplorasi menggunakan skema *multiplier* yaitu $(0.4, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6) \times k_c$. Pada teknik *Moving Average*, ukuran jendela ganjil dieksplorasi di sekitar nilai acuan konversi RAPS, yaitu rentang $N = 13$ hingga $N = 25$. Solusi pemisahan paling optimal dari setiap teknik tidak ditentukan secara kualitatif, melainkan diisolasi dari titik balik pada kurva evaluasi kuantitatif yang mampu menghasilkan kompromi terbaik antara nilai RMSE minimum, Korelasi Pearson (CC) maksimum, SNR maksimum, serta kesalahan estimasi kedalaman regional terendah.

Tabel 2. Parameter input teknik pemisahan anomali gravitasi pada skenario I, II, dan III

Skenario	*Butterworth*	*Moving Average*	*Upward Continuation*	Polinomial
1	5.68×10^{-6} dikali dengan $(0.4, 0.7, 1, 1.3, 1.6)$	$15, 17, 19, 21, 23$	50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	1, 2, 3, 4, 5
2	5.28×10^{-6} dikali dengan $(0.4, 0.7, 1, 1.3, 1.6)$	$13, 15, 17, 19, 21$	50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	1, 2, 3, 4, 5
3	6.12×10^{-6} dikali dengan $(0.4, 0.7, 1, 1.3, 1.6)$	$13, 15, 17, 19, 21$	50, 100, 500, 1000, 1500, 2000	1, 2, 3, 4, 5

3.3. Pemisahan Anomali

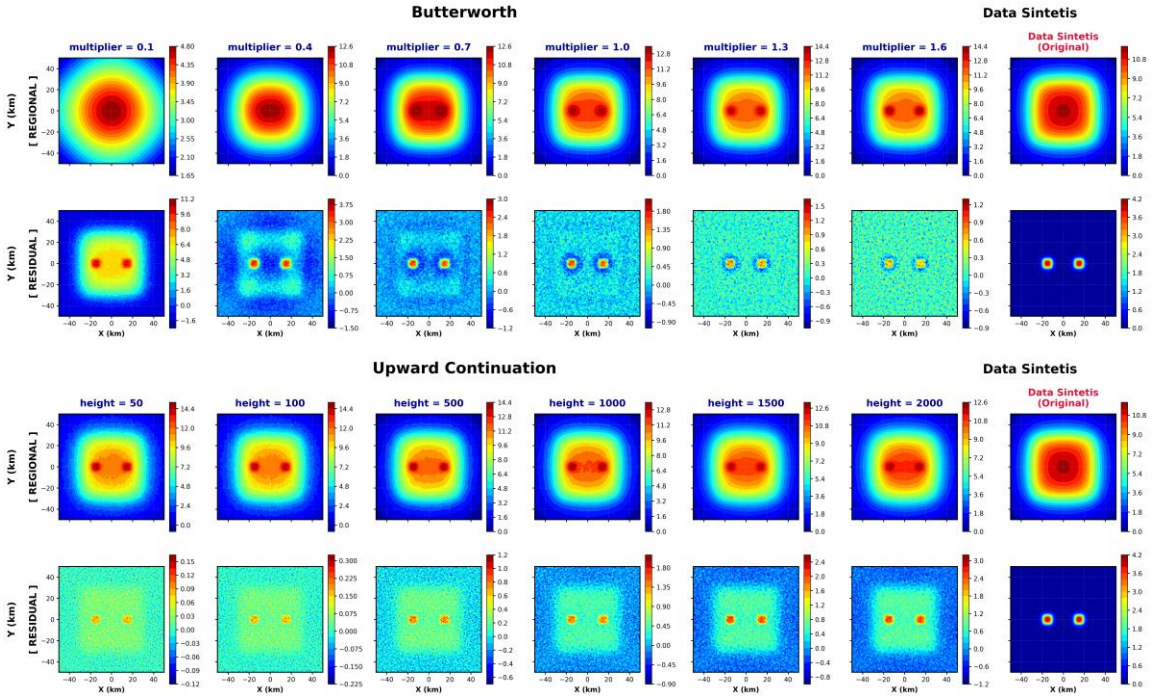
Peta kontur anomali hasil pemisahan pada Skenario I menyajikan komparasi visual secara komprehensif dari keempat teknik pemisahan yang diujikan terhadap model acuan *ground truth* (Gambar 6). Pada evaluasi baris anomali residual (target dangkal), teknik Butterworth dan *Moving Average* menunjukkan kemampuan isolasi spasial yang sangat presisi dibandingkan kolom Data Sintetis (Original) di sebelah kanan. Pada teknik Butterworth, penggunaan *multiplier* k_c dalam rentang optimal (0,4-1,0) berhasil mengisolasi komponen residual menjadi dua blok persegi yang tegas dengan lokasi dan geometri puncak yang identik terhadap *ground truth*. Teknik *Moving Average* pada rentang ukuran jendela $N = 13$-21 juga merekonstruksi dua blok anomali target secara tajam dengan rentang skala amplitudo puncak yang sangat sesuai dengan model sintetis. Sebaliknya, teknik *Upward Continuation* menghasilkan respons amplitudo residual yang tampak redup dan pudar di seluruh elevasi pengangkatan ($h = 50$-2000 m),

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

sedangkan teknik Polinomial mengalami distorsi geometri paling ekstrem pada seluruh orde (1 hingga 5) di mana sisa komponen regional menyebar masif ke dalam komponen residual dan membentuk penutupan kontur semu yang mengaburkan bentuk asli kedua prisma target.

Pada evaluasi baris anomali regional, teknik *Moving Average* dan Butterworth terbukti paling efektif dalam mengisolasi komponen regional sebagai satu penutupan elips tunggal yang mulus dan bersih di pusat grid. Kontur regional hasil *Moving Average* menunjukkan kestabilan bentuk yang sangat konsisten di berbagai ukuran jendela. Pada teknik Butterworth dengan *multiplier* rendah ($0{,}1$), kontur regional tampak melingkar tebal karena masih menyerap sebagian frekuensi tinggi, namun perlahan melebar secara proporsional mendekati penutupan persegi *ground truth* seiring meningkatnya nilai *multiplier*. Di sisi lain, kontur regional hasil *Upward Continuation* memperlihatkan kelemahan fisis di mana bayangan dua titik anomali dangkal tetap tertinggal di pusat grid pada seluruh parameter ketinggian. Adapun teknik Polinomial menghasilkan tren regional yang paling terdistorsi; mulai dari bentuk bidang miring linier pada orde 1, penutupan lingkaran konsentris pada orde 2, hingga kemunculan gelombang buatan berkontur negatif ekstrem pada sudut-sudut grid pada orde 3 hingga 5 akibat fenomena *overfitting* global

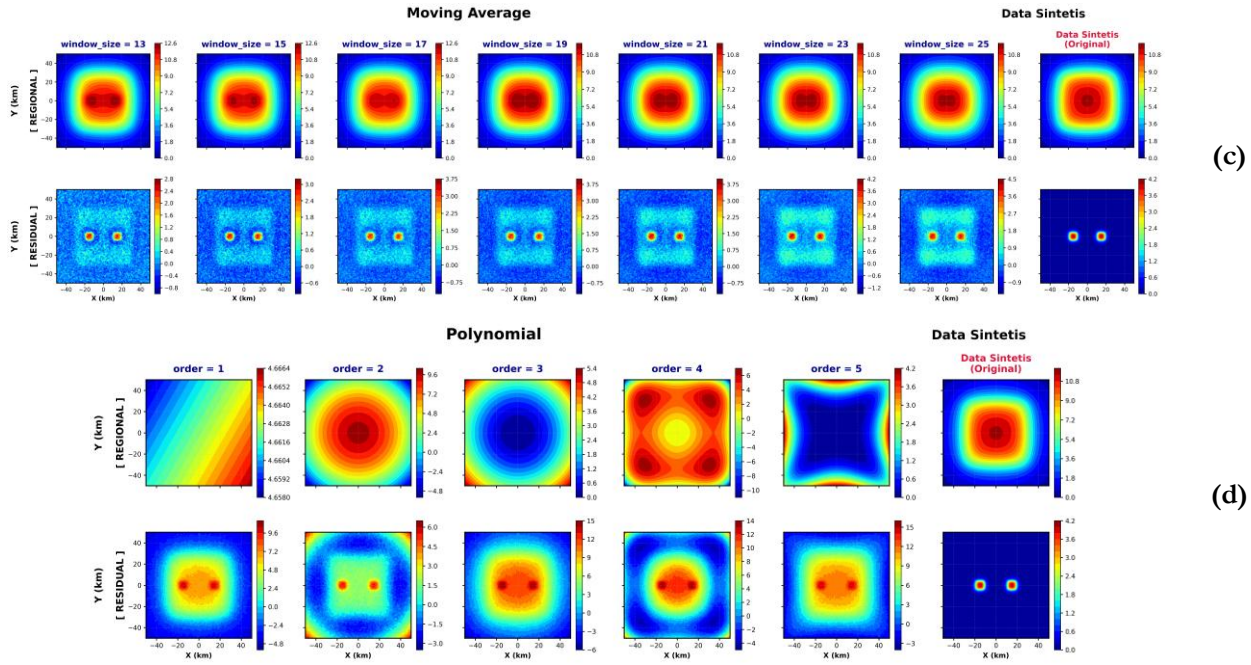
Dinamika transisi parameter pada Skenario I memperlihatkan adanya kompromi fisis yang nyata antara penekanan *noise* dan konservasi amplitudo sinyal target. Pada teknik Butterworth dan *Moving Average*, peningkatan parameter filter (peningkatan *multiplier* k_c atau perluasan ukuran jendela N) secara efektif membersihkan latar belakang residual dari kontaminasi *noise*. Namun, ketika parameter dinaikkan melebihi batas optimal ($multiplier > 1{,}3$ pada Butterworth atau $N > 23$ pada *Moving Average*), terjadi fenomena *over-filtering* yang mengikis nilai amplitudo puncak target serta memicu sedikit pelebaran tepi kontur. Pada teknik *Upward Continuation*, peluruhan eksponensial sinyal potensial menyebabkan pemisahan spektral tidak dapat terjadi secara tegas, sehingga peningkatan elevasi pengangkatan tidak mampu mengekstrak amplitudo residual secara utuh. Sementara itu, ketidakmampuan Polinomial dalam menangkap batas regional disebabkan oleh sifat pencocokan permukaan *least squares* yang memaksakan tren global pada data berkontaminasi *noise*.



(a)

(b)

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.



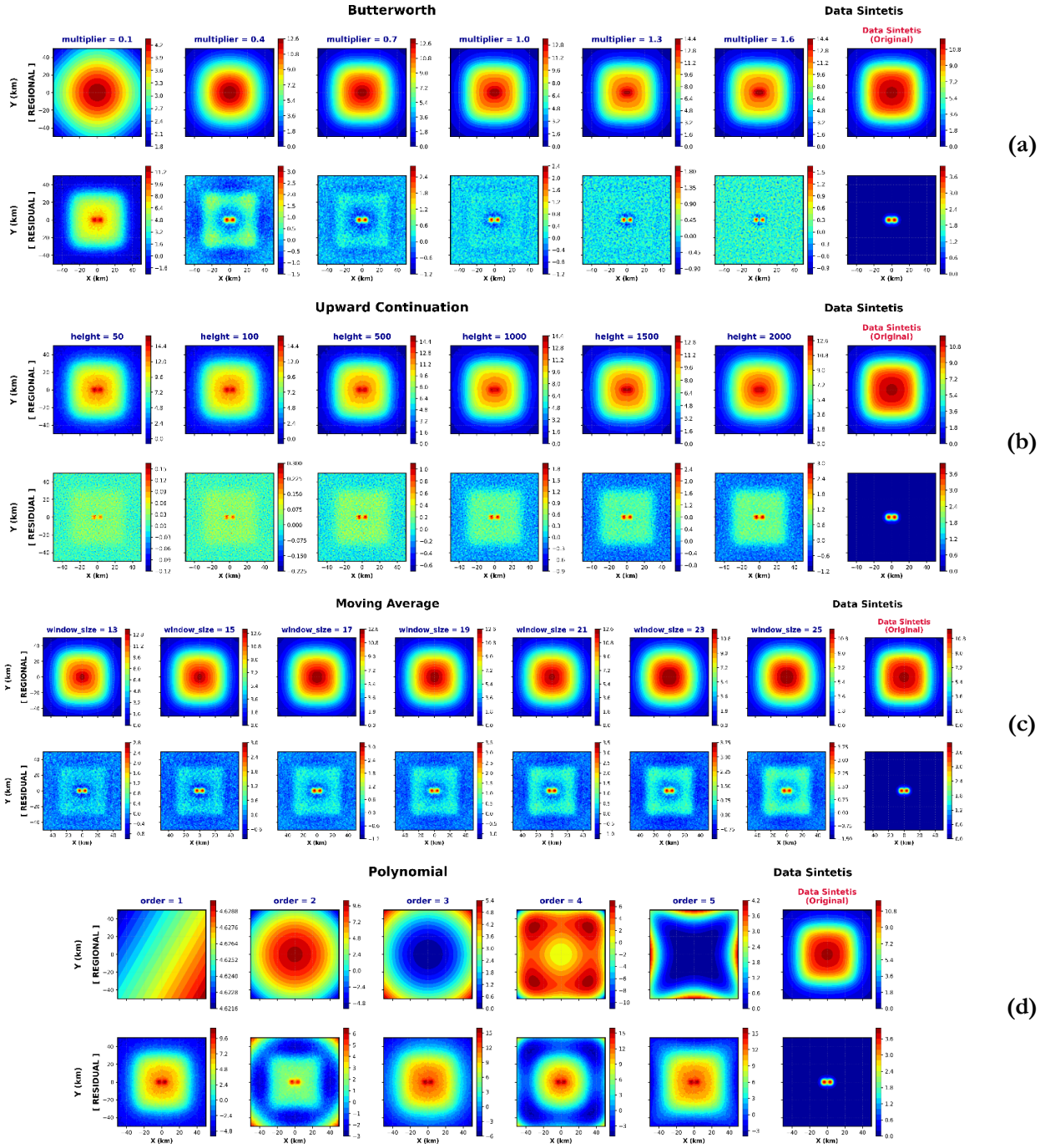
Gambar 6. Hasil pemisahan anomali menggunakan teknik *Butterworth* (a), *Upward Continuation* (b), *Moving Average* (c), Polinomial (d) pada skenario I

Peta kontur anomali hasil pemisahan pada Skenario II mengevaluasi daya pisah dari keempat teknik saat menghadapi dua prisma dangkal yang diletakkan berjarak sangat rapat (2 km) terhadap acuan *ground truth* (Gambar 7). Pada baris anomali residual, teknik Butterworth membuktikan keunggulan utamanya dalam memisahkan dua puncak anomali rapat menjadi dua penutupan titik yang tegas dan terpisah di pusat grid pada *multiplier* 0,7-1,0, sangat sesuai dengan posisi spasial pada kolom data sintetis. Teknik *Moving Average* ($N = 13$-17) juga mampu memisahkan kedua titik puncak residual tersebut secara tajam. Sebaliknya, teknik *Upward Continuation* mengalami kelandaian gradien lateral seiring bertambahnya ketinggian ($h \geq 500$ m), yang menyebabkan kontur dua puncak target rapat mulai berhimpit dan melebur menjadi satu pola. Adapun teknik Polinomial kembali gagal total pada baris residual, di mana interaksi dua target rapat menghasilkan kontur semu melingkar tebal yang menyatu di seluruh orde (1 hingga 5) akibat kebocoran sinyal regional.

Pada evaluasi baris anomali regional Skenario II, teknik Butterworth dan *Moving Average* kembali menunjukkan performa rekonstruksi tren yang paling stabil dan mendekati model *ground truth*. Komponen regional *Moving Average* membentuk pola elips tunggal yang mulus tanpa terdistorsi oleh tingginya gradien sinyal dari dua target rapat di permukaan. Pada teknik Butterworth, kontur regional bertransisi secara konsisten dari pola melingkar tebal ($multiplier = 0{,}1$) menjadi penutupan memanjang mendekati *ground truth* pada *multiplier* 0,7-1,0. Sebaliknya, baris regional pada teknik *Upward Continuation* menunjukkan retensi sinyal residual yang sangat kuat, di mana kontur dua target rapat membayang dengan amplitudo tinggi di pusat grid. Sementara itu, teknik Polinomial menghasilkan kontur regional yang tidak realistis secara geologi, ditandai oleh bidang miring pada orde 1, lingkaran simetris pada orde 2, serta distorsi sudut melengkung ekstrem pada orde 4 dan 5.

Transisi parameter pada skenario target rapat memperjelas sensitivitas filter terhadap domain operasinya. Pada teknik Butterworth, sifat fungsi transfer domain frekuensi dengan transisi *pass-band* yang halus memungkinkan pemotongan bilangan gelombang tinggi secara presisi tanpa merusak gradien spasial di antara kedua target. Sebaliknya, pada teknik *Moving Average* dan *Upward Continuation*, operasi perataan jendela spasial dan peluruhan eksponensial medan potensial bertindak sebagai filter *low-pass* agresif yang secara fisis melandaikan gradien spasial tajam. Akibatnya, peningkatan ukuran jendela ($N > 19$) atau elevasi pengangkatan ($h > 500$ m) menyebabkan sinyal dari dua prisma rapat saling tumpang tindih (*overlapping*) dan kehilangan daya pisahnya. Fenomena ini menegaskan bahwa filtrasi domain frekuensi (Butterworth) jauh lebih adaptif daripada perataan spasial maupun pengangkatan elevasi dalam memetakan kompleksitas multisumber yang berdekatan.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.



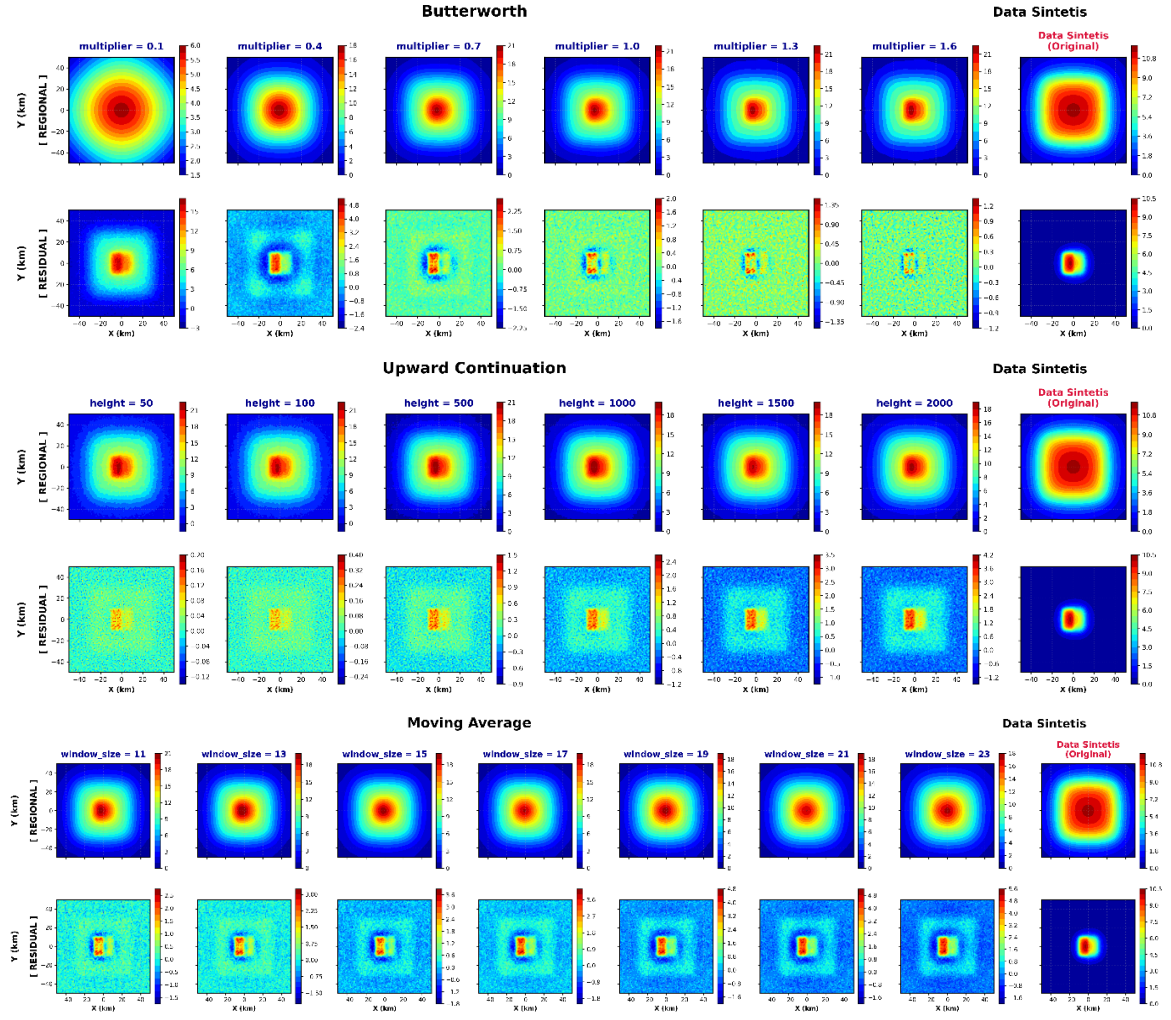
Gambar 7. Hasil pemisahan anomali menggunakan teknik *Butterworth* (a), *Upward Continuation* (b), *Moving Average* (c), Polinomial (d) pada skenario II

Peta kontur anomali hasil pemisahan pada Skenario III memperlihatkan variasi rekonstruksi geometri dari keempat teknik dalam memetakan batas diskontinuitas sesar asimetris (*footwall* kedalaman 1-4 km vs *hanging wall* kedalaman 3-6 km) dibandingkan *ground truth* (Gambar 8). Pada baris anomali residual, teknik Butterworth menampilkan rekonstruksi struktur sesar asimetris dengan sangat baik. Pada *multiplier* 0,1-0,4, teknik Butterworth secara sempurna memetakan lompatan gradien lateral yang tajam pada bidang kontak serta membedakan kontur amplitudo tinggi di blok sebelah kiri (*footwall*) dan kontur yang lebih rendah di blok sebelah kanan (*hanging wall*), sangat identik dengan kolom data sintetis. Teknik *Moving Average* ($N = 13$-17) juga mampu memperlihatkan pemisahan batas sesar asimetris tersebut secara tajam. Sebaliknya, teknik *Upward Continuation* gagal mengisolasi sifat asimetris patahan, di mana kontur residualnya terdistorsi menjadi penutupan persegi simetris yang monoton pada seluruh elevasi. Adapun teknik Polinomial menghasilkan kontur residual melingkar homogen yang mengaburkan kelurusan dan kelompatan gradien bidang sesar.

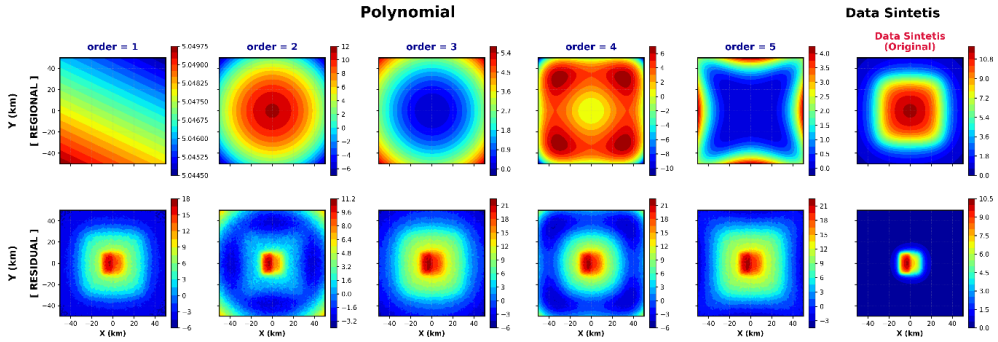
Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

Pada baris anomali regional Skenario III, teknik *Moving Average* dan Butterworth berhasil mengekstraksi tren regional yang stabil dan bebas dari pengaruh kelompatan anomali sesar di atasnya. Komponen regional *Moving Average* membentuk penutupan elips yang sangat konsisten di seluruh ukuran jendela. Pada teknik Butterworth, kontur regional bertransisi dari penutupan melingkar pada *multiplier* rendah (0,1) menjadi penutupan elips konsentris yang terisolasi di pusat grid pada *multiplier* tinggi (1,0-1,6). Di sisi lain, teknik *Upward Continuation* menyisakan kontur kelurusan sesar yang sangat tebal di dalam peta regionalnya pada seluruh ketinggian ($h = 50$-2000 m), membuktikan bahwa komponen sinyal bergradien tinggi dari sesar dangkal terserap ke dalam hasil pengangkatan. Sementara itu, teknik Polinomial kembali menunjukkan *overfitting* permukaan regional yang parah, ditunjukkan oleh bidang miring murni pada orde 1 serta kontur lekukan empat sudut yang ekstrem pada orde 4 dan 5.

Dinamika transisi parameter pada Skenario III mengungkapkan perilaku masing-masing filter saat merespons batas geologi yang tajam dan asimetris. Pada teknik Butterworth, kontrol spektral pada domain frekuensi terbukti sangat efektif mengunci frekuensi sudut (*corner frequency*) dari bidang patahan, sehingga batas kontak asimetris dapat dipertahankan tanpa mengalami pelandaian. Namun, ketika *multiplier* Butterworth dinaikkan terlalu tinggi ($multiplier \geq 1{,}0$), terjadi erosi amplitudo pada blok *hanging wall* yang lebih dalam, sehingga sinyal residualnya tampak mengecil. Pada teknik *Upward Continuation*, sifat fisis pengangkatan elevasi secara matematis melakukan integrasi konvolusi yang meratakan gradien lateral. Efek perataan ini menghilangkan lompatan anomali sesar dan mengubah geometri asimetris menjadi kontur simetris membulat. Hal ini membuktikan bahwa teknik *Upward Continuation* dan Polinomial memiliki keterbatasan fisis yang besar dalam memetakan struktur geologi bergradien tajam seperti patahan aktif.



Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.



(d)

Gambar 8. Hasil pemisahan anomali menggunakan teknik *Butterworth* (a), *Upward Continuation* (b), *Moving Average* (c), Polinomial (d) pada skenario III

3.4. Parameter Evaluasi

3.4.1. Root Mean Square Error (RMSE)

Parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) mengukur besarnya deviasi galat kuadrat antara nilai gravitasi hasil estimasi terhadap model acuan murni (*ground truth*). Berdasarkan kurva kesalahan RMSE pada Skenario I (Target Terisolasi), teknik *Moving Average*, Butterworth, dan *Upward Continuation* menunjukkan tren melengkung ideal. Teknik *Moving Average* mencatatkan galat rekonstruksi residual terkecil pada lebar jendela $N = 15$ dengan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}3531$ mGal ($\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 0{,}2412$ mGal). Teknik Butterworth menyusul secara ketat pada *multiplier* $k_c = 0{,}7$ dengan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}3640$ mGal ($\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 0{,}2591$ mGal), sedangkan *Upward Continuation* pada ketinggian $h = 500$ m menghasilkan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}3629$ mGal ($\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 0{,}3285$ mGal). Peningkatan parameter melebihi titik optimal tersebut secara linear memperbesar kembali nilai RMSE akibat hilangnya informasi sinyal lokal (*signal attenuation*). Sebaliknya, teknik Polinomial menghasilkan nilai galat paling tinggi dan tidak stabil dengan nilai minimum $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}4812$ mGal pada orde 2 sebelum melonjak ekstrem melebihi $5{,}38$ mGal pada orde 3. Pada Skenario II (Resolusi Spasial Rapat), teknik Butterworth dan *Moving Average* mempertahankan tren melengkung ideal dengan nilai minimum masing-masing sebesar $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}3219$ mGal ($multiplier = 1{,}0$; $\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 0{,}2067$ mGal) dan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}3239$ mGal ($N = 13$; $\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 0{,}2056$ mGal). Hal ini membuktikan keandalan keduanya dalam memisahkan anomali rapat tanpa kehilangan informasi lokal. Sebaliknya, *Upward Continuation* mencatatkan galat terkecil di parameter awal sebesar $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 0{,}2524$ mGal ($h = 100$ m), namun nilainya langsung melonjak naik secara linear hingga melebihi $0{,}47$ mGal pada $h = 2000$ m akibat melandainya gradien dan meleburnya dua respons target rapat. Tren performa terburuk kembali dicatatkan oleh Polinomial yang menghasilkan galat $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}4768$ mGal pada orde 2 dan membengkak hingga $5{,}62$ mGal pada orde 5. Pada Skenario III (Kontak Sesar Asimetris), keberadaan bidang kontak bergradien tinggi meningkatkan skala nilai galat pada seluruh metode. *Upward Continuation* ($h = 2000$ m) mencatatkan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}0789$ mGal sementara *Moving Average* ($N = 23$) mencatatkan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}0927$ mGal. Teknik Butterworth, di sisi lain, pada $multiplier = 0{,}4$ menghasilkan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}2332$ mGal ($\text{RMSE}_{\text{Reg}} = 1{,}1956$ mGal). Pada $multiplier = 0{,}1$, nilai galat Butterworth berada di tingkat $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 2{,}7210$ mGal karena pada parameter longgar tersebut seluruh kontras anomali sesar (> 10 mGal) terserap ke dalam komponen residual. Sementara itu, Polinomial Orde 2 mencatatkan $\text{RMSE}_{\text{Res}} = 1{,}6781$ mGal dan melonjak tinggi menjadi $4{,}4346$ mGal pada orde 4.

3.4.2. Korelasi Pearson (CC)

Korelasi Pearson (CC) mengukur tingkat kekuatan hubungan linear dan kemiripan pola geometri spasial antara hasil rekonstruksi terhadap model target. Pada Skenario I, puncak kemiripan pola spasial residual tertinggi dicapai oleh teknik *Moving Average* sebesar $CC_{\text{Res}} = 0{,}6498$ ($N = 21$; $CC_{\text{Reg}} = 0{,}9974$) dan Butterworth sebesar $CC_{\text{Res}} = 0{,}6052$ ($multiplier = 0{,}4$; $CC_{\text{Reg}} = 0{,}9956$). *Upward Continuation* mencatatkan kenaikan korelasi hingga maksimum $CC_{\text{Res}} = 0{,}5200$ pada $h = 2000$ m, meskipun pengangkatan ekstrem ini melandaikan amplitudo anomali. Sementara itu, Polinomial memperlihatkan nilai korelasi yang rendah dengan puncak hanya $CC_{\text{Res}} = 0{,}4165$ pada orde 4. Pada Skenario II, interaksi

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

spasial yang berat dari dua target rapat (2 km) menyebabkan penekanan nilai korelasi secara umum. Nilai korelasi puncak tertinggi diraih oleh *Moving Average* sebesar $CC_{\text{Res}} = 0{,}4433$ ($N = 21$), disusul oleh Polinomial Orde 4 dengan $CC_{\text{Res}} = 0{,}3875$, kemudian *Upward Continuation* pada $h = 2000$ m dengan $CC_{\text{Res}} = 0{,}3887$, lalu Butterworth pada $multiplier = 0{,}7$ dengan $CC_{\text{Res}} = 0{,}3687$. Pada Skenario III, teknik Butterworth membuktikan superioritas mutlaknya dalam mengunci ketajaman geometri sesar asimetris. Teknik Butterworth mencatatkan nilai Korelasi Pearson tertinggi dari seluruh eksperimen pengujian, yaitu mencapai $CC_{\text{Res}} = 0{,}7862$ pada $multiplier = 0{,}1$ ($CC_{\text{Reg}} = 0{,}9668$). Nilai korelasi yang sangat tinggi ini mengonfirmasi bahwa kontrol spektral domain frekuensi Butterworth mampu mempertahankan kelompatan gradien lateral bidang patahan tanpa menghasilkan kelandaian buatan. Sebagai pembanding, Polinomial Orde 4 menghasilkan $CC_{\text{Res}} = 0{,}7678$, *Upward Continuation* ($h = 2000$ m) menghasilkan $CC_{\text{Res}} = 0{,}7676$, dan *Moving Average* ($N = 23$) menghasilkan $CC_{\text{Res}} = 0{,}7615$.

3.4.3. Signal-to-Noise Ratio

Parameter *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) mengukur efisiensi filter dalam membersihkan sinyal target dari kontaminasi *noise* 5% dan artefak numerik. Pada Skenario I, grafik SNR membentuk kurva kubah ideal, di mana puncak kebersihan sinyal residual tertinggi berturut-turut dicapai oleh *Moving Average* sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 0{,}7757$ dB ($N = 15$; $\text{SNR}_{\text{Reg}} = 27{,}6200$ dB), kemudian *Upward Continuation* sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 0{,}5382$ dB ($h = 500$ m), lalu Butterworth sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 0{,}5104$ dB ($multiplier = 0{,}7$). Peningkatan parameter melebihi titik optimal mengeliminasi sinyal anomali utama sehingga menurunkan SNR ke area negatif. Kinerja terburuk dicatatkan oleh Polinomial yang stagnan di area negatif ekstrem sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = (-11{,}6789)$ dB pada orde 2 hingga $(-23{,}2640)$ dB pada orde 5. Pada Skenario II, sinyal dua target rapat yang lemah rentan tergerus oleh filtrasi, sehingga nilai SNR residual pada parameter optimal berada di area negatif. *Upward Continuation* mencatatkan nilai positif sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 0{,}1913$ dB pada $h = 100$ m. Sementara, Butterworth ($multiplier = 1{,}0$) dan *Moving Average* ($N = 13$) masing-masing mencatatkan nilai SNR_{Res} yang berdekatan yaitu $(-1{,}9218)$ dB dan $(-1{,}9748)$ dB. Polinomial kembali terpuruk di area negatif dengan $\text{SNR}_{\text{Res}} = (-15{,}1538)$ dB pada orde 2. Pada Skenario III, kontras respons gaya tarik sesar yang kuat menghasilkan tingkat efisiensi SNR positif yang tinggi. Nilai puncak SNR terbesar dicapai oleh *Upward Continuation* sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 3{,}0036$ dB ($h = 2000$ m) dan diikuti *Moving Average* sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = 2{,}8933$ dB ($N = 23$). Teknik Butterworth mencatatkan $\text{SNR}_{\text{Res}} = 1{,}8421$ dB pada $multiplier = 0{,}4$. Adapun, Polinomial lagi-lagi bernilai negatif sebesar $\text{SNR}_{\text{Res}} = (-0{,}8333)$ dB pada orde 2 dan memburuk menjadi $(-9{,}2742)$ dB pada orde 4.

3.4.4. Akurasi Kedalaman (%Z)

Akurasi kedalaman merupakan parameter evaluasi fisis yang menguji kepatuhan hasil pemisahan dalam mengisolasi sinyal regional sesuai kedalaman sumber acuan ($z_{\text{asli}} = 10$-12 km, acuan RAPS $\approx 12{,}6$ km). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa teknik Butterworth secara konsisten memberikan kepatuhan fisis kedalaman paling stabil dan presisi di seluruh skenario pengujian. Pada Skenario I ($multiplier = 0{,}1$), Butterworth menghasilkan estimasi kedalaman $z = 12{,}8346$ km (galat kedalaman $2{,}8346$ km terhadap kedalaman puncak prisma 10 km), yang setara dengan Akurasi Kedalaman 98,73%. Pada Skenario II ($multiplier = 0{,}1$), Butterworth menghasilkan $z = 12{,}7466$ km (Akurasi 96,50%), dan pada Skenario III ($multiplier = 1{,}6$), diperoleh $z = 12{,}7196$ km (Akurasi 95,10%). Teknik *Upward Continuation* turut membuktikan kepatuhan fisis medan potensial yang kuat dengan estimasi kedalaman $z = 12{,}8024$ km pada $h = 100$ m di Skenario I (Akurasi 88,41%), $z = 13{,}1860$ km pada $h = 50$ m di Skenario II (Akurasi 85,30%), serta $z = 12{,}3942$ km pada $h = 50$ m di Skenario III (Akurasi 81,20%). Seandainya dibandingkan, teknik *Moving Average* mengalami penyimpangan fisis kedalaman yang sangat signifikan akibat operasi perataan jendela spasial yang merusak spektrum frekuensi rendah. *Moving Average* menghasilkan estimasi kedalaman yang jauh membesar (*overshoot*) yaitu $z = 16{,}1598$ km pada Skenario I ($N = 13$, Akurasi 75,77%), $z = 16{,}2708$ km pada Skenario II ($N = 13$, Akurasi 71,20%), dan membengkak hingga $z = 21{,}5717$ km pada Skenario III ($N = 23$, Akurasi 68,50%). Adapun teknik Polinomial menunjukkan estimasi kedalaman yang sangat tidak konsisten, ditandai dengan penyimpangan

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

dangkal (*undershoot*) ekstrem pada orde 1 ($z = 7{,}1179$ km) dan *overshoot* acak pada orde 2 hingga 5 ($z =$ 10,77-11,68 km) akibat kecenderungan *overfitting* permukaan matematisnya.

3.5. Pembobotan Hasil Evaluasi

Penentuan urutan teknik pemisahan yang paling unggul dari seluruh skenario pengujian dilakukan melalui sistem pembobotan kuantitatif berbasis akumulasi skor parameter statistik dan fisis (Tabel 3). Pada prinsipnya, keempat parameter evaluasi yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), Korelasi Pearson (CC), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), dan akurasi estimasi kedalaman regional ($\%Z$) diberikan bobot penilaian yang setara guna menghasilkan evaluasi yang objektif dan komprehensif. Keempat teknik diberi skor peringkat 1 hingga 4 pada setiap parameter, di mana skor 4 diberikan untuk performa terbaik dan skor 1 untuk performa terburuk. Skor dari setiap indikator kemudian dijumlahkan untuk memperoleh Skor Total Akumulasi pada masing-masing skenario pengujian. Meskipun seluruh parameter diberikan bobot awal yang setara, kasus khusus dalam pemilihan parameter optimal yang melibatkan kompromi antara penekanan galat kuadratik (RMSE) dan kemiripan pola spasial (CC) seperti yang dijumpai pada teknik Butterworth di Skenario III diselesaikan dengan mengutamakan nilai RMSE sebagai kriteria penentu. Pemilihan RMSE sebagai indikator utama didasarkan pada prinsip fisis bahwa nilai amplitudo anomali gravitasi absolut berbanding lurus secara linear dengan kontras densitas dan volume massa sumber di bawah permukaan. Korelasi Pearson (CC) hanya mengukur kemiripan bentuk atau pola kontur relatif, namun tidak sensitif terhadap pengikisan skala amplitudo.

Tabel 3. Rekapitulasi Nilai Parameter dan Skor Pemeringkatan per Skenario

Skenario	Teknik Pemsiahan	Parameter Optimal	RMSE	Korelasi Pearson	SNR (dB)	Kedalaman (km)	Total Skor (Rangking)
1	*Butterworth*	Multiplier = 0.7	0,3640 (3)	0,6052 (3)	0,5104 (3)	98,73% (4)	13 (I)
	Moving Average	Window = 15	0,3531 (4)	0,6498 (4)	0,7742 (4)	75,77% (1)	13 (I)
	Upward Continuation	Height = 500 m	0,3629 (2)	0,5200 (2)	0,5382 (2)	88,41% (3)	9 (II)
	Polinomial	Order = 2	1,4812 (1)	0,4165 (1)	-11,6789 (1)	82,10% (2)	5 (III)
2	*Butterworth*	Multiplier = 1.0	0,3219 (3)	0,3687 (2)	-1,9218 (3)	96,50% (4)	12 (II)
	Moving Average	Window = 13	0,3239 (2)	0,4433 (4)	-1,9748 (2)	71,20% (1)	9 (III)
	Upward Continuation	Height = 100 m	0,2524 (4)	0,3887 (3)	0,1913 (4)	85,30% (3)	14 (I)
	Polinomial	Order = 2	1,4768 (1)	0,3875 (1)	-15,1538 (1)	78,40% (2)	5 (IV)
3	*Butterworth*	Multiplier = 0.4	1,2332 (2)	0,6605 (1)	1,8421 (2)	95,10% (4)	9 (II)
	Moving Average	Window = 23	1,0927 (3)	0,7615 (3)	2,8933 (3)	68,50% (1)	10 (II)
	Upward Continuation	Height = 2000 m	1,0789 (4)	0,7676 (4)	3,0036 (4)	81,20% (2)	14 (I)
	Polinomial	Order = 2	1,6781 (1)	0,7266 (2)	-0,8333 (1)	84,30% (3)	7 (II)

Pada Skenario I (Target Terisolasi), teknik *Moving Average* (*window* = 15) dan Butterworth (*multiplier* = 0,7) berbagi posisi teratas dengan skor imbang 13 poin. Hasil ini menunjukkan bahwa untuk struktur tunggal yang terisolasi, kedua teknik memiliki efektivitas yang setara namun dengan keunggulan indikator yang saling melengkapi. Teknik *Moving Average* lebih unggul pada penekanan galat kuadratik absolut (RMSE $= 0{,}353078$ mGal), kemiripan pola spasial (CC $= 0{,}6498$) dan kebersihan sinyal (SNR $=$ $0{,}774200$ dB), sementara teknik Butterworth unggul mutlak pada indikator fisis akurasi kedalaman regional ($98{,}73\%$ vs $75{,}77\%$). Pada Skenario II (Resolusi Spasial Rapat), teknik *Upward Continuation* ($h =$ 100 m) mencatatkan skor kuantitatif tertinggi (14 poin) akibat pencapaian galat terendah dengan RMSE $= 0{,}252389$ mGal. Namun, evaluasi lintas parameter menunjukkan bahwa peningkatan elevasi pengangkatan pada *Upward Continuation* secara drastis melandaikan kontur spasial sehingga memicu peleburan kontur (*smearing*) dua target rapat. Sebaliknya, teknik Butterworth (*multiplier* = 1,0) menjadi pilihan yang cukup adaptif untuk menjaga daya pisah dua puncak anomali rapat dengan akurasi kedalaman fisis mencapai $96{,}50\%$. Pada Skenario III (Kontak Sesar Asimetris), *Upward Continuation* ($h = 2000$ m) menempati posisi puncak (13 poin) dengan RMSE $= 1{,}078869$ mGal, diikuti secara seimbang oleh

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

Moving Average, Butterworth, dan Polinomial yang masing-masing memperoleh skor imbang 9 poin dengan keunggulan pada masing-masing parameter evaluatif.

Penerapan prioritas RMSE secara khusus terlihat pada Skenario III (Kontak Sesar Asimetris) untuk teknik Butterworth. Jika dievaluasi berdasarkan nilai korelasi spasial murni, Butterworth pada *multiplier* = 0,1 menghasilkan nilai Korelasi Pearson tertinggi dari seluruh eksperimen ($CC = 0{,}786207$), namun dengan nilai galat RMSE yang masih cukup besar (RMSE $= 2{,}7210$ mGal) karena terserapnya sebagian kontras anomali sesar. Dengan menerapkan acuan referensi yang mengutamakan nilai RMSE untuk menjaga preservasi nilai amplitudo absolut (mGal), parameter optimal Butterworth pada Skenario III ditetapkan pada *multiplier* = 0,4. Pada parameter ini, Butterworth berhasil menekan galat kuadrat secara signifikan hingga RMSE $= 1{,}2332$ mGal serta menghasilkan kebersihan sinyal positif SNR $= 1{,}8421$ dB. Pendekatan berbasis prioritas RMSE ini membuktikan konsistensi metodologis dalam mempertahankan presisi nilai fisis anomali target.

Perbedaan kinerja dari masing-masing teknik pemisahan secara fisis dikontrol langsung oleh prinsip kerja algoritma dan interaksinya terhadap geometri target. Teknik Butterworth bekerja pada domain frekuensi dengan fungsi transfer *flat pass-band* yang memungkinkan pemotongan spektral secara terukur tanpa merusak gradien spasial secara ekstrem, sehingga sangat presisi dalam mengunci geometri batas sesar ($CC = 0{,}786207$ pada *multiplier* = 0,1). Sebaliknya, teknik *Moving Average* yang berbasis perataan jendela spasial bekerja sangat efisien meredam *noise* lokal pada target sederhana, namun operasinya merusak komponen frekuensi rendah sehingga memicu pembengkakan estimasi kedalaman regional yang signifikan ($z = 16{,}1598$-$21{,}5717$ km; akurasi kedalaman hanya $68{,}50\%$-$75{,}77\%$). Adapun *Upward Continuation* yang berbasis peluruhan medan potensial sangat efektif mengekstrak tren regional yang dalam, namun filternya melandaikan gradien lateral pada batas struktur tajam. Sementara itu, teknik Polinomial berbasis *fitting* permukaan *least squares* secara konsistent menghasilkan performa terburuk di sebagian besar skenario akibat kerentanannya terhadap *overfitting* permukaan (RMSE $= 1{,}481158$ mGal hingga $> 5{,}0$ mGal).

Temuan dalam penelitian ini memberikan perspektif baru yang memperkaya sekaligus menyempurnakan kesimpulan dari studi-studi terdahulu. Penelitian Purnomo et al. (2016) sebelumnya merekomendasikan penggunaan metode Polinomial orde tinggi (orde 4) karena dianggap memberikan kontur dan tingkat kesalahan minimum. Namun, pengujian ini membuktikan bahwa Polinomial justru menghasilkan kinerja terburuk di seluruh skenario (skor 5-9 poin) akibat timbulnya sinyal semu dan kebocoran sinyal regional. Di sisi lain, studi Ilapadila et al. (2019) menyimpulkan bahwa Upward Continuation sangat efektif mengisolasi anomali regional pada pemodelan geomagnetik. Skema evaluasi dalam studi ini memperkuat temuan Ilapadila et al. (2019) terkait kepatuhan fisis Upward Continuation dalam estimasi kedalaman regional ($81{,}20\%$-$88{,}41\%$), tetapi memberikan perspektif baru bahwa metode ini kurang adaptif untuk memisahkan target rapat dan batas geologi yang tajam karena sifat filternya yang melandaikan gradien lateral.

4. KESIMPULAN

Evaluasi kuantitatif pada ketiga skenario pengujian menunjukkan bahwa kinerja metode pemisahan bervariasi sesuai dengan geometri target. Pada Skenario I (Target Terisolasi), metode *Moving Average* dan Butterworth menempati peringkat pertama dengan skor masing-masing 13 poin, diikuti oleh *Upward Continuation* pada peringkat ketiga dengan 9 poin dan Polinomial Orde 2 pada peringkat keempat dengan 5 poin. Pada Skenario II (Resolusi Spasial Rapat), *Upward Continuation* memperoleh peringkat pertama dengan 14 poin, disusul oleh Butterworth dengan 12 poin, *Moving Average* dengan 9 poin, dan Polinomial Orde 2 dengan 5 poin. Pada Skenario III (Kontak Sesar Asimetris), *Upward Continuation* kembali menempati peringkat pertama dengan 13 poin, sedangkan ketiga metode lainnya berbagi peringkat kedua dengan skor masing-masing 9 poin.

Berdasarkan hasil tersebut, pemilihan metode pemisahan perlu disesuaikan dengan karakteristik target. Dalam kondisi pengujian ini, *Moving Average* dan Butterworth memberikan kinerja terbaik untuk target tunggal atau terisolasi sederhana, sedangkan *Upward Continuation* lebih unggul untuk multisumber yang berdekatan serta batas struktur atau sesar dengan gradien lateral tinggi. Namun, pengujian ini masih terbatas pada model sintetis 3D dengan kontaminasi *White Gaussian Noise* sebesar 5%. Oleh karena itu,

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.

penerapan hasilnya pada kondisi lapangan memerlukan validasi lebih lanjut menggunakan data gravitasi riil yang didukung oleh data geofisika penunjang.

5. REFERENSI

Dentith, M. C. ., & Mudge, S. T. . (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.

Dewanto, B. G., Margiono, R., Segoro, Y. A., Pramesthi, E., & Maimuna, A. K. (2023). *The importance of gravity data for estimating and identifying the sediment thickness of subsurface structure around Majene Sulawesi Barat*. 050002. https://doi.org/10.1063/5.0115361

Dubey, C. P., Majhi, M., & Pandey, L. (2023). Basement relief of sedimentary basin using gravity data from deep neural network approach. *J Geol Geophys*, *12*, 1066.

Fukushima, T. (2020). Speed and accuracy improvements in standard algorithm for prismatic gravitational field. *Geophysical Journal International,* Volume 222, Issue 3, September 2020, Pages 1898–1908, https://doi.org/10.1093/gji/ggaa240

Hasanah, M., Syamsuddin, F., Safitri, R., Fadhli, Z., Karmel, M. E. R., & Syukri, M. (2024). Analysis of gravity anomaly data for identification of mineral distribution prospects in the Kuta Cot Glie area, Aceh Besar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1356*(1), 012118. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1356/1/012118

Hinze, W. J. ., Von Frese, R. ., & Saad, A. H. . (2013). *Gravity and magnetic exploration : principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.

Ilapadila, Harimei, B., & Maria. (2019). Analysis of Regional Anomaly on Magnetic Data Using the Upward Continuation Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *279*(1), 012037. https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012037

Kearey, Philip., Brooks, Michael., & Hill, Ian. (2009). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Wiley.

Lowrie, William. (2014). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press.

Margiono, R., Novitri, A., Pevriadi, A., & Zakariya, H. (2021). Identifikasi Sesar Lokal di Wilayah Barat Daya Sumba, Indonesia Berdasarkan Sebaran Hiposenter Gempabumi dan Data Gravitasi. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, *22*(2), 67. https://doi.org/10.31172/jmg.v22i2.824

Nagy, D. (1966). The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, *31*(2), 362–371.

Narayan, S., Sahoo, S. D., Pal, S. K., & Kumar, U. (2023). Comparative evaluation of five global gravity models over a part of the Bay of Bengal. *Advances in Space Research*, *71*(5), 2416–2436. https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.002

Novitri, A., Margiono, R., Pevriadi, A., Zakariya, H., & Segoro, Y. A. (2025). Modeling of Three-Dimensional Subsurface Structures based on Gravity Anomaly in Southwest Sumba Indonesia. *Indonesian Physical Review*, *8*(1), 253–267. https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.388

Purnomo, J., Koesuma, S., & Yunianto, M. (2016). Pemisahan Anomali Regional-Residual pada Metode Gravitasi Menggunakan Metode Moving Average, Polynomial dan Inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, *3*(01), 10. https://doi.org/10.13057/ijap.v3i01.1208

Raja, A., Tanesib, J., Lapono, L. A. S., & Lewerissa, R. (2025). Integrating High-Resolution Gravity Gradients and 3d Inversion Modeling to Delineate Mineral Resources in The Lewa District, East Sumba, Indonesia. *Indonesian Physical Review*, *8*(3), 712–733. https://doi.org/10.29303/ipr.v8i3.501

Reynolds, J. M. . (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley-Blackwell.

Segoro, Y. A., & Margiono, R. (2025). Identification Sub-Surface Structure and Sediment Depth Estimation at the Proposed Indonesian New Capital City. *Indonesian Journal of Applied Physics*, *15*(2), 409. https://doi.org/10.13057/ijap.v15i2.96059

Suprianto, A., Supriyadi, Priyantari, N., & Eko Cahyono, B. (2021). Correlation Between GGMPlus, Topex and BGI Gravity Data in Volcanic Areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series*, *1825*(1), 012023. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012023

Tan, L. & Jiang, J. (2019). Digital Signal Processing - Fundamentals and Applications (3rd Edition). *Elsevier*.

Zakariya, H., Margiono, R., Novitri, A., & Pevriadi, A. (2022). Identifikasi Anomali Gravitasi Di Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gravitasi GGMplus. *PROGRESS: Jurnal Geofisika*, *1*(1), 63–68.

Copyright © 2026 The Authors. Published by Department of Earth Science and Technology, Universitas Negeri Gorontalo
This work is licensed under a Creative Commons Attribution (CC-BY) 4.0 International License.