



Pemodelan Rasio Gradien Densitas Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan *Trend Surface Analysis* Data Gayaberat

Suharno¹, I Gede Boy Darmawan^{1*}, Ahmad Zaenudin¹, Ordas Dewanto¹, dan Martin Ridwan¹
¹Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung Jl. Sumantri Brojonegoro No.1, Bandar Lampung, Kode Pos 35141

*E-mail korespondensi: igedeboy@staff.unila.ac.id

Abstrak. Pemetaan struktur bawah permukaan terutama struktur sesar telah menjadi salah satu kajian utama dalam berbagai kegiatan eksplorasi sumber daya alam dan mitigasi bencana geologi. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan adalah dengan menggunakan metode geofisika khususnya metode gayaberat. Anomali gayaberat berisi informasi penting terkait rapat massa batuan yang dapat digunakan untuk mendelineasi struktur geologi. Kontras rapat massa atau juga dikenal sebagai kontras densitas batuan dapat ditunjukkan oleh hasil pengukuran gayaberat dengan melakukan analisis tren data permukaan (*trend surface analysis*). Penelitian ini difokuskan pada pengembangan teknik rasio gradien densitas pada data gayaberat sintetis untuk menemukan formula yang mampu mengkarakterisasi sebuah sesar terkait jenis sesar, arah sesar dan dip sesar. Teknik rasio gradien densitas (Rgd) yang dilakukan berdasarkan kurva *horizontal gradient* dan *second vertical derivative* (FHG & SVD) dari metode *trend surface analysis* pada data gayaberat. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, teknik ini hanya dapat menentukan jenis sesar maupun arah sesar jika salah satu informasi tersebut telah diketahui. Sehingga untuk menentukan jenis sesar maka arah sesar harus diketahui dan sebaliknya. Sementara respon rasio gradien densitas untuk menentukan dip sesar menunjukkan pola yang linear dengan besarnya sudut dip dan konsisten terhadap perubahan densitas, namun sangat bergantung pada ketebalan layer dan offset sesar itu sendiri.

Kata kunci: Rasio Gradien Densitas, *Trend Surface Analysis*, *Derivative*.

PENDAHULUAN

Anomali gayaberat berisi informasi penting terkait rapat massa batuan yang dapat digunakan untuk mendelineasi struktur geologi (Dubey dan Tiwari, 2016). Kontras rapat massa atau juga dikenal sebagai kontras densitas batuan dapat ditunjukkan oleh hasil pengukuran gayaberat dengan melakukan analisis tren data permukaan (*trend surface analysis*). Metode analisis tren data permukaan yang telah banyak digunakan adalah dengan teknik derivatif atau turunan yang dirasiokan terhadap perubahan jarak horizontal maupun kedalaman (*horizontal & vertical derivative*). Perubahan densitas terhadap jarak horizontal pada turunan pertama juga disebut sebagai gradien horizontal (*horizontal gradient*) (Zaenudin dkk., 2013). Turunan kedua dari perubahan densitas gayaberat horizontal adalah sama dengan negatif dari turunan kedua densitas gayaberat secara vertikal (*second vertical derivative* atau SVD). Informasi dari hasil *horizontal gradient* dan *second vertical derivative* mampu mendelineasi batas-batas dan kontak struktur geologi di bawah permukaan (Setianingsih dkk., 2013).

Trend surface analysis pada data gayaberat mampu melakukan identifikasi struktur geologi bawah permukaan dengan mendelineasi struktur geologi. Metode gradien data gayaberat merupakan salah satu metode yang cukup sukses dalam mendeteksi keberadaan suatu target tubuh struktur geologi di bawah permukaan (Dubey dan Tiwari, 2016). Meskipun data gayaberat konvensional mampu menunjukkan medan gravitasi dengan baik, tetapi kurang sensitif dalam menentukan batas-batas tubuh struktur, bahkan tidak ada informasi terkait arah struktur tersebut. Terlebih lagi, struktur geologi seperti patahan/sesar seringkali memiliki bentuk yang kompleks dan parameter geofisika seperti densitas/rapat massa yang heterogen (Yao dan Changli, 2007). Sehingga diperlukan teknik analisis yang mampu meningkatkan sensitivitas data gayaberat dalam mengukur dan menginterpretasi komponen struktur geologi seperti metode dekonvolusi (Zhang dkk., 2000) maupun derivatif (Dubey dan Tiwari, 2016; Yao dan Changli, 2007; Mickus dan Hinojosa, 2001; Zaenudin dkk., 2013).

Dalam pemanfaatan metode *second vertical derivative* pada data gayaberat selama ini hanya berpedoman pada kurva nilai maksimum dan nilai minimum hasil derivatif. Kurangnya penelitian mengenai hubungan antara lebar simpangan kurva dengan maksimum kurva, atau hubungan rasio antara kurva nilai maksimum dan nilai minimum terhadap dip sesar maupun jarak pergeseran sesar (*fault offset*). Sehingga kajian mengenai metode rasio gradien densitas data gayaberat sangat diperlukan untuk meningkatkan kemampuan pengukuran geofisika dalam mengidentifikasi karakteristik suatu struktur geologi bawah permukaan, khususnya sesar. Dengan memanfaatkan data sintetis di laboratorium, beberapa model struktur sesar dapat dibuat dan data respon medan gayaberat yang dihasilkan akan dianalisis dengan teknik rasio gradien densitas.

Penelitian ini akan difokuskan pada pengembangan teknik rasio gradien densitas pada data gayaberat sintetis profil dua dimensi (2D) untuk menemukan formula yang mampu mengkarakterisasi sebuah sesar terkait arah sesar, dip sesar dan pergeseran sesar. Teknik rasio yang akan dilakukan berdasarkan kurva *horizontal gradient* dan *second horizontal derivative* (FHG & SVD) dari metode *trend surface analysis* pada data gayaberat. Hasil yang diharapkan dari teknik ini adalah kemampuannya dalam menentukan lokasi dan karakteristik sesar berdasarkan hasil pengukuran gayaberat. Sehingga teknik ini dapat digunakan untuk mengevaluasi keberadaan struktur geologi bawah permukaan dari data-data gayaberat sekunder hasil pengukuran yang pernah dilakukan maupun data gayaberat primer.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian untuk pemodelan rasio gradien densitas struktur bawah permukaan berdasarkan *trend surface analysis* data gayaberat meliputi pemodelan 2D data sintetis struktur sesar bawah permukaan dengan berbagai jenis varian sudut, arah kemiringan (dip) dan jenis sesar, analisis derivatif pertama dan kedua serta formulasi rasio gradien densitas.

Trend Surface Analysis

Ambiguitas dari data area yang selalu muncul dapat diatasi dengan mengurangi pola variasi regional yang halus dan lebih luas dari pola non-sistematis dan lokal (Chayes dan Suzuki, 1963; Krumbein, 1956). Dengan menganggap mekanisme atau penyebab pada komponen yang berbeda, sehingga efek ini terlihat lebih halus, distribusi efek yang teratur yang dikenal dengan istilah tren permukaan (*Trend Surface*) (Whitten, 1959). Informasi yang terkandung dalam data mapping 2D/kontur dianalisis dengan metode yang berbeda antara *trends-surface mapping* dengan metode mapping konvensional (Chorley dan Haggett, 1965).

Pengembangan *trend-surface analysis* banyak dilakukan dengan metode *Euler Deconvolution* maupun metode *Derivative*, baik horizontal maupun vertikal derivatif. (Zhang dkk, 2000). Derivatif pertama merupakan pengukuran kemiringan (*slope*) sedangkan derivatif kedua merupakan pengukuran perubahan kemiringan (perubahan *slope*) dari data medan potensial seperti gravitasi (Gonenc, 2014). Derivatif vertikal pertama (*first vertical derivative*) pada medan gravitasi merupakan transformasi yang bermanfaat untuk penentuan struktur-struktur dangkal yang memiliki kontras densitas yang lemah.

Rasio Gradien Densitas

Kegiatan pengolahan dan analisis data akan difokuskan pada model 2D sesar naik dan sesar turun dengan arah kemiringan yang berbeda. Faktor besarnya sudut kemiringan sesar (dip) dibuat dalam empat varian yaitu 30, 45, 60 dan 90 derajat berlaku untuk kedua jenis sesar dan arah kemiringannya. Penelitian ini juga akan menganalisis pengaruh perbedaan nilai densitas serta perbedaan ketebalan lapisan/layer batuan terhadap nilai respon rasio gradien dari nilai *Second Vertical Derivative* (SVD). Untuk mendapatkan respon nilai *vertical derivative* dapat dilakukan dengan menjauhkan massa potensial dari permukaan bumi. Oleh karena itu, diperlukan transformasi nilai gayaberat

permukaan dengan persamaan Laplace's sebagai berikut: $\nabla^2 \Delta g = 0$, maka $\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0$

(1)

berdasarkan persamaan tersebut, jika kita hanya meninjau perubahan medan gravitasi pada arah horizontal x dan vertikal z , maka derivative kedua arah y mempunyai nilai konstan sehingga persamaan (1) menjadi:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \approx -\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (2)$$

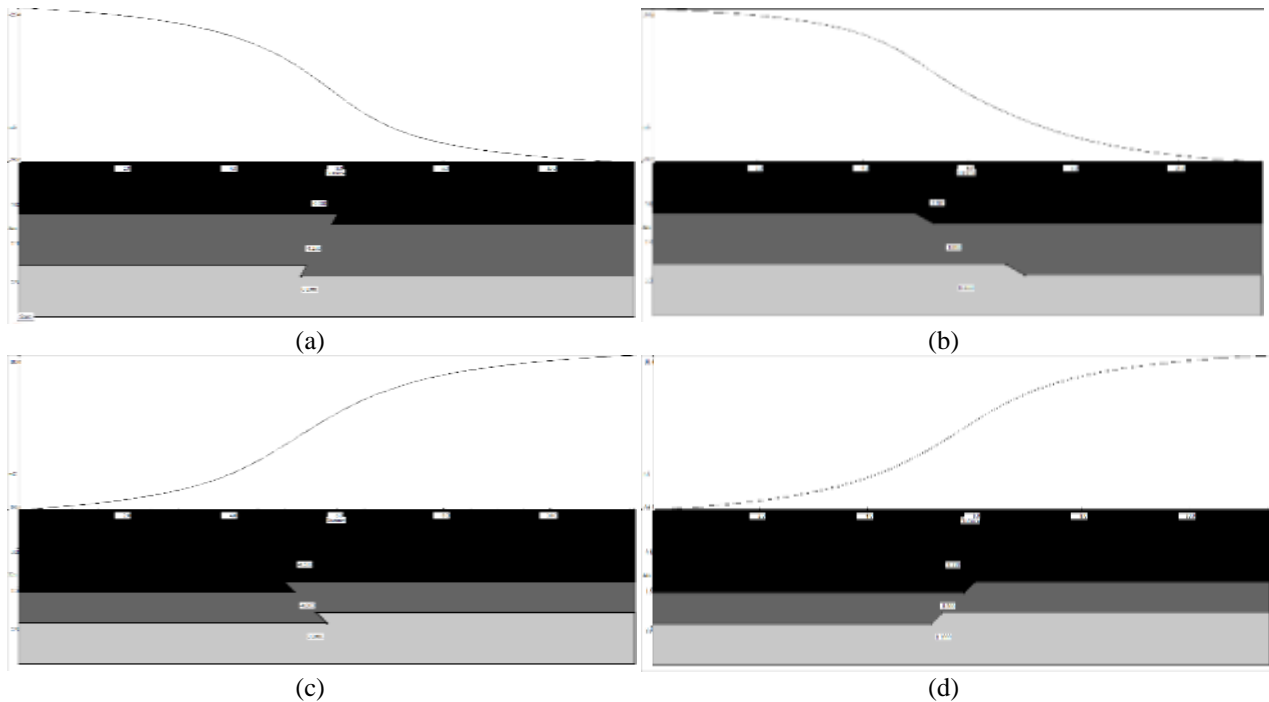
dari persamaan di atas, kita memperoleh nilai *Second Horizontal Derivative* dari suatu anomali gayaberat permukaan sama dengan nilai negatif dari derivatif kedua pada sumbu horizontalnya (Blakely, 1996; Reynolds, 1997). Untuk mendapatkan derivatif horizontal ke arah sumbu x pada data lintasan, maka nilai g di setiap stasiun pengukuran dengan jarak tertentu Δx dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} = \frac{g_{i+1} - g_i}{\Delta x} = \frac{\frac{g_{i+1} - g_i}{\Delta x} - \left(\frac{g_i - g_{i-1}}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{g_{i+1} + g_{i-1} - 2g_i}{\Delta x^2} \quad (3)$$

Dengan melakukan pemodelan rasio gradien nilai *Second Vertical Derivative* (SVD) akan diperoleh formulasi hubungan antara nilai rasio dengan sudut kemiringan sesar. Formulasi ini dapat digunakan untuk menentukan seberapa besar sudut yang dibentuk oleh struktur bawah permukaan. Untuk melakukan uji validasi, maka dilakukan rasio gradien dan *trend surface analysis* pada data sekunder hasil pengukuran di lapangan panas bumi Ulubelu. Diharapkan dari penelitian ini dapat tervalidasi formula rasio gradien dari *trend surface analysis* data permukaan gayaberat untuk mengkarakterisasi jenis sesar, arah kemiringan dan besar sudut dip struktur sesar di bawah permukaan. Formulasi ini akan sangat membantu dalam membuat pemodelan 2D struktur bawah permukaan atau bahkan pengembangan untuk analisis kontur map dan model 3D data gayaberat.

Model Sintetis Sesar

Beberapa model sintetis struktur sesar dari data gayaberat dibuat untuk mendapatkan respon permukaan yang akan dianalisis dengan metode derivatif. Model dibuat konsisten hanya pada tiga layer/lapisan batuan dengan kontras densitas. Variasi jenis sesar hanya dilakukan pada dua jenis sesar yaitu sesar naik dan sesar turun dengan arah kemiringan dari kanan maupun dari kiri. Variasi dip/kemiringan sesar juga dibuat dalam empat jenis yaitu berturut-turut 30°, 45°, 60° dan 90°. Berikut adalah beberapa gambar model sintetis sesar yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3. Beberapa model sintetis yang dipergunakan dalam penelitian ini salah satunya (a) model sesar naik dip 60°, (b) model sesar normal dip 30°, (c, d) model sesar naik dan sesar normal dip 45° dengan perbedaan tebal lapisan.

Setiap dip sesar dibuat dengan arah bidang sesar dari kedua sisi yaitu dari sisi kiri maupun dari sisi kanan. Hal ini digunakan untuk mengetahui konsistensi nilai rasio gradien terhadap arah kemiringan bidang sesar. Variasi nilai kontras densitas juga diterapkan pada model sintetis untuk mendapatkan respon perubahan densitas bawah permukaan terhadap nilai rasio gradiennya. Variasi terakhir adalah dengan membuat perbedaan ketebala lapisan/layer pada model sintetis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap respon nilai rasio gradien densitasnya.

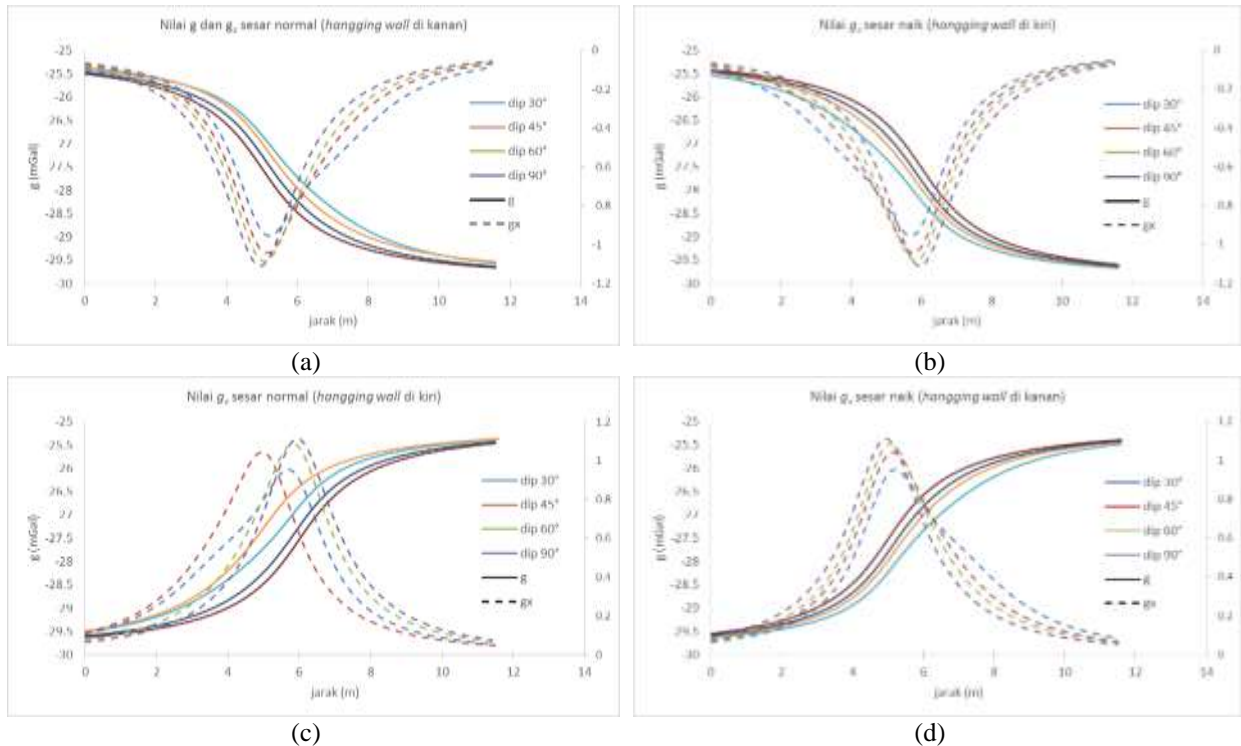
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan sintetis gayaberas yang telah diproses dengan metode derivatif menghasilkan tiga komponen derivatif yaitu derivatif horizontal tingkat satu (g_x) dan derivatif vertikal tingkat dua (g_{zz}). Berikut ini adalah hasil derivatif dari sesar normal yang disajikan dalam Tabel 1.

TABEL 1. Data hasil derivatif model sintetis untuk sesar normal/turun dengan nilai derivatif horizontal tingkat satu (g_x) dan derivatif vertikal tingkat dua (g_{zz}).

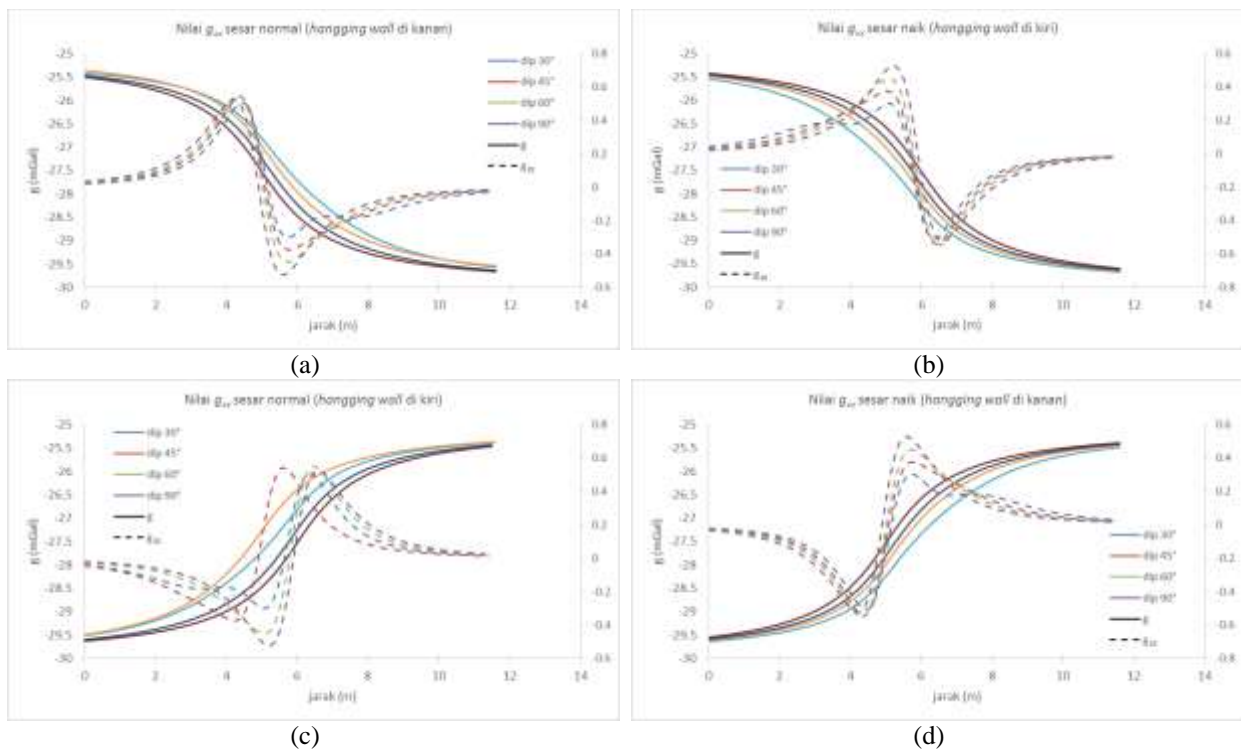
Dip (°)	Sesar Turun (Hangging Wall Kanan)			Sesar Turun (Hangging Wall Kiri)			Sesar Naik (Hangging Wall Kanan)			Sesar Naik (Hangging Wall Kiri)		
	g_x		g_{zz}	g_x		g_{zz}	g_x		g_{zz}	g_x		g_{zz}
	puncak	min	maks	puncak	min	maks	puncak	min	maks	puncak	min	maks
30	-0.954	-0.301	0.507	0.954	-0.301	0.506	-0.955	-0.507	0.301	0.954	-0.507	0.301
45	-1.043	-0.374	0.540	1.042	-0.375	0.540	-1.042	-0.541	0.375	1.042	-0.541	0.374
60	-1.085	-0.449	0.549	1.085	-0.449	0.550	-1.085	-0.550	0.449	1.085	-0.549	0.449
90	-1.109	-0.526	0.527	1.109	-0.527	0.525	-1.109	-0.527	0.527	1.109	-0.526	0.527

Hasil derivatif di atas kemudian diplot dalam grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Analisis respon permukaan pada data derivatif pertama bidang horizontal menunjukkan adanya puncak kurva pada batas kontak densitas. Hal ini dapat menjadi petunjuk awal adanya struktur di daerah tersebut. Akan tetapi, kurva



Gambar 2. Kurva gayaberat (g) model sintesis sesar dilambangkan dengan garis tegas dan nilai horizontal derivatif pertama (g_x) yang dilambangkan dengan garis putus-putus (a, c) sesar normal (b, d) sesar naik.

tersebut juga menunjukkan kesamaan respon pada sesar naik dengan sesar turun jika posisi hanging wall berada pada sisi yang berlawanan, sementara untuk sisi yang sama, puncak derivatif ini dapat membedakan antara sesar naik atau sesar turun. Respon ini tidak dapat digunakan untuk menentukan jenis sesar maupun arah kemiringan (dip) jika kedua informasi ini salah satunya tidak diketahui. Jika salah satu informasi sesar,



Gambar 3. Kurva gayaberat (g) model sintesis sesar dilambangkan dengan garis tegas dan nilai vertikal derivatif kedua (g_{zz}) yang dilambangkan dengan garis putus-putus (a, c) sesar normal (b, d) sesar naik.

baik jenis sesar maupun dip diketahui, maka kita dapat memanfaatkan respon tersebut untuk mengetahui jenis sesar atau dip yang belum diketahui. Untuk mengetahui karakteristik respon vertikal derivatif kedua, maka data sintesis model sesar diproses untuk derivatif dan kurvanya disajikan dalam Gambar 3. Respon serupa juga ditunjukkan oleh hasil vertikal derivatif kedua pada sesar naik dengan sesar turun jika posisi hanging wall berada pada sisi yang berlawanan, sementara untuk sisi yang sama, puncak derivatif ini dapat membedakan antara sesar naik atau sesar turun. Sehingga formula $SVD_{max} > SVD_{min} = \text{sesar normal}$ atau sebaliknya menjadi ambigu. Teknik *Second Horizontal Derivative* (SVD) menjadi terbatas penggunaannya pada struktur yang sederhana dan untuk interpretasi kualitatif saja (Sumintadireja dkk, 2018).

Model sesar yang diproses selanjutnya adalah model sintesis awal, model sintesis dengan beda densitas dari model awal terhadap masing-masing layer/lapisan serta perbedaan ketebalan lapisan. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan formula yang dapat digunakan untuk menentukan besarnya sudut kemiringan sesar (dip) berdasarkan nilai rasio gradien densitas (*Rgd*) dengan formulasi rasio sebagai berikut:

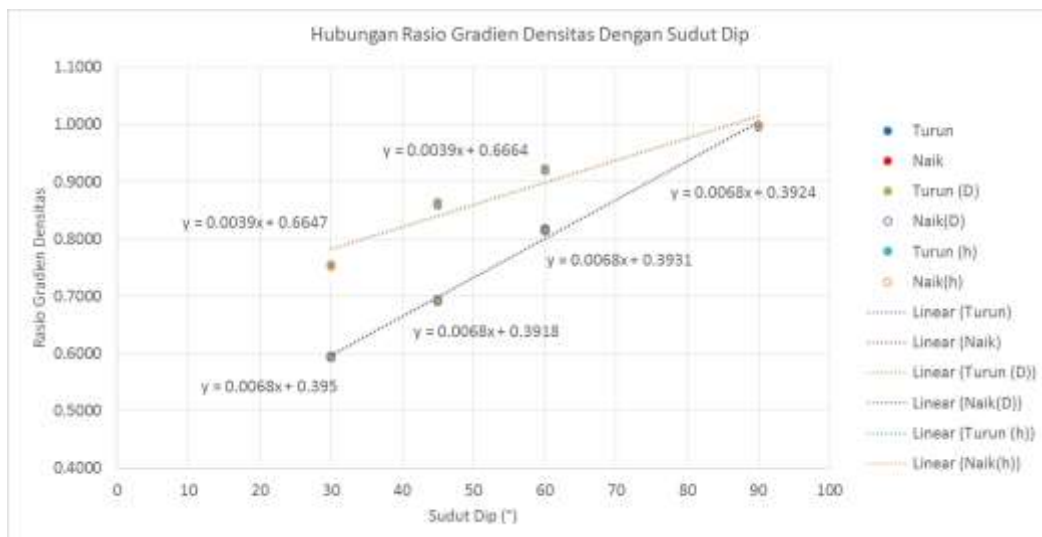
$$Rgd = \frac{\min(\text{abs}(\min \text{ and } \max(g_{zz})))}{\max(\text{abs}(\min \text{ and } \max(g_{zz})))} \quad (4)$$

dengan *min and max* g_{zz} adalah nilai minimum dan nilai maksimum dari g_{zz} atau *SVD*, dan hasilnya disajikan dalam Tabel 2 berikut ini. Untuk mendapatkan formula rasio, maka seluruh hasil rasio gradien densitas

TABEL 2. Data hasil rasio gradien densitas dari derivatif vertikal tingkat dua (g_{zz}) untuk seluruh model sintesis sesar.

Sudut dip	Data Awal	(<i>Rgd</i>)	Δ Densitas (<i>Rgd</i>)		Δ Tebal Lapisan (<i>Rgd</i>)		Posisi Hanging Wall
	Turun	Naik	Turun (D)	Naik (D)	Turun (h)	Naik (h)	
30°	0.5937	0.5937	0.5929	0.5948	0.7553	0.7530	kiri
30°	0.5949	0.5937	0.5960	0.5948	0.7530	0.7545	kanan
45°	0.6926	0.6932	0.6907	0.6915	0.8642	0.8646	kiri
45°	0.6944	0.6913	0.6910	0.6918	0.8592	0.8646	kanan
60°	0.8179	0.8164	0.8166	0.8146	0.9202	0.9229	kiri
60°	0.8164	0.8179	0.8146	0.8177	0.9200	0.9229	kanan
90°	0.9981	1.0000	1.0000	0.9989	1.0000	0.9971	kiri
90°	0.9962	0.9981	0.9989	0.9989	0.9971	1.0000	kanan

diplot dalam kurva yang disajikan dalam Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Kurva rasio gradien densitas semua model sesar sintesis dengan formula regresi linear untuk memprediksi hubungan antara nilai *Rgd* dengan dip sesar.

Kurva hasil analisis rasio gradien densitas menunjukkan pola linearitas antara nilai *Rgd* dengan sudut dip dari model sintesis sesar. Jenis sesar, arah sesar dan perbedaan densitas masing-masing model sesar terbukti tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai rasio. Namun perbedaan ketebalan lapisan/layer menyebabkan dispersi terhadap garis linear sebelumnya. Sehingga meskipun nilai rasio menunjukkan konsistensi dan linearitas namun tidak dapat digunakan untuk menentukan dip tanpa memperhatikan dispersi dari efek perbedaan ketebalan lapisan/layer batuan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan terhadap nilai derivatif dan rasio gradien densitas pada seluruh model sintesis sesar normal dan naik menunjukkan keterbatasan teknik analisis derivatif pada data gayaberat. Meskipun mampu menunjukkan adanya sesar dari kontras densitas, namun teknik ini belum mampu untuk mengkarakterisasi sesar tersebut. Namun jika salah satu karakteristik sesar diketahui maka teknik ini dapat diterapkan. Sementara nilai rasio gradien densitas menunjukkan konsistensi pada semua model sesar, kecuali pada variasi ketebalan layer. Perbedaan ketebalan layer menyebabkan dispersi garis pada sudut dip rendah dan konsisten pada dip tinggi. Meskipun demikian teknik rasio ini masih perlu pengujian pada model yang lebih bervariasi untuk mengetahui karakteristik dispersi terhadap berbagai ketebalan layer.

Teknik derivatif masih dapat digunakan pada tingkatan struktur yang lebih sederhana untuk mengetahui keberadaan sesar, meskipun untuk SVD diperlukan informasi awal terkait jenis atau arah sesar agar dapat dilakukan analisis selanjutnya dan mengurangi ambiguitasnya. Oleh karena itu, penelitian ini masih harus dilanjutkan untuk mendapatkan respon rasio yang lebih akurat dan konsisten, terutama dengan teknik selain derivatif. Uji analisis pada peta kontur gaya berat juga diperlukan untuk melihat apakah teknik ini dapat digunakan untuk mengekstrak informasi lainnya dari struktur bawah permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu serta Fakultas Teknik Unila atas hibah DIPA FT untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Blakely, R. J. (1996) *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Chayes, F., and Suzuki, Y. (1963) Geological contours and trend surfaces: discussion, *J. Petrology*, 4, 307-319.
- Chorley, R. J., and Haggett, P. (1965) Trend-Surface Mapping in Geographical Research, *Transactions of the Institute of British Geographers*, 37, 47-67.
- Dubey, C. P., and Tiwari, V. M. (2016) Computation of the gravity field and its gradient: some applications, *Computers and Geosciences*, 88, 83-96.
- Gonenc, T. (2014) Investigation of distribution of embedded shallow structures using the first order vertical derivative of gravity data, *Journal of Applied Geophysics*, 104, 44 –57.
- Krumbein, W. C. (1956) Regional and local components in facies maps, *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 40, 2163-2259.
- Mickus, K. L., and Hinojosa, J. H. (2001) The complete gravity gradient tensor derived from the vertical component of gravity: a Fourier transform technique, *Journal of Applied Geophysics*, 46, 159-174.
- Reynolds, J. M. (1997) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Inc., England.
- Setianingsih, Efendi, R., Kadir, W. G. A., Santoso, D., Abdullah, C. I., Alawiyah, S. (2013) Gravity gradient technique to identify fracture zones in Palu Koro strike-slip fault, *Procedia Environmental Sciences*, 17, 248 – 255.
- Sumintadireja, P., Dahrin, D., dan Grandis, H. (2018) A note on the use of the second vertical derivative (SVD) of gravity data with reference to Indonesian Cases, *J. Eng. Technol. Sci*, 50, 127-139.
- Whitten, E. H. T. (1959) Composition trends in a granite: modal variation and ghost stratigraphy in part of the Donegal Granite, *Eire, J. Geophys. Res.*, 64, 835-846.
- Yao, L., and Changli, Y. (2007) Forward Modeling of Gravity, Gravity Gradients, and Magnetic Anomalies due to Complex Bodies, *Journal of China University of Geosciences*, 18, 280-286.
- Zaenudin, A., Sarkowi, M., Suharno (2013) Pemodelan sintetik gradien gayaberat untuk identifikasi sesar, *Seminar Nasional Sains & Teknologi V Lembaga Penelitian Universitas Lampung*, 19-20 November, .
- Zhang, C., Mushayandebvu, M. F., Reid, A. B., Fairhead, J. D., Odegard, M. E. (2000) Euler deconvolution of gravity tensor gradient data, *Geophysics*, 65, 512-520.