

PENINGKATAN AKURASI COMPLETE BOUGUER ANOMALY MAP PADA DATA TOPEX SATELLITE MENGGUNAKAN KONSTANTA BARU BERDASARKAN MATHEMATICAL DERRIVATIVE

INCREASING THE ACCURACY OF COMPLETE BOUGUER ANOMALY MAP ON TOPEX SATELLITE DATA WITH NEW CONSTANT BASED ON MATHEMATICAL DERRIVATIVE

Aji Darma Maulana* and Aprillia Frinanda Setiawan

Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran"
Yogyakarta

* Email: ajiedarma16@gmail.com

Abstract

The research was conducted using the TOPEX satellite observation gravity data with an area of 37,530 km² in the form of Free Air Anomaly. This analysis-based research is based on the discrepancy between geological dynamics and conventional gravity processing data. By emphasizing on unconventional gravity processing, this analysis aims to obtain quantities that can reduce topographical effects without losing lithological information. Processing is done by comparing several variations of the Bouguer correction treatment on the Free Air Anomaly value. The treatment is in the form of mathematical analysis applied by reducing the range of Bouguer correction values that are too significant as the effect of the mismatch between the conventional Bouguer constant and the measuring distance between the satellite and the rock mass. Several complete Bouguer anomaly maps with different expression patterns were generated as the effect of variations in mathematical analysis. The representation of data that is compatible with actual geological phenomena can be seen in the complete Bouguer anomaly map with a new constant, namely 0.04193/2.5 or 0.016772. It can be seen that the main continuity of the gravity anomaly with a relatively north-south orientation is interpreted as a horizontal fault and several other continuations with a relatively northwest-southeast orientation which are interpreted as accompanying faults. The existence and distribution of density reflecting lithology and faults in the study area has been validated by geological maps and topographical expressions of SRTM data based on gravity anomaly analysis.

Keywords: *Mathematical Analysis, New Constants, Bouguer Correction, Gravity Satellites, Faults.*

Abstrak

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data gravitasi observasi satelit TOPEX dengan luas area sebesar 37.530 km² berupa *Free Air Anomaly*. Penelitian berbasis analisis ini berlandaskan ketidaksesuaian antara dinamika geologi dengan data pengolahan gravitasi *conventional*. Dengan menekankan pada pengolahan gravitasi secara *unconventional*, analisis ini bertujuan untuk mendapatkan besaran yang dapat mereduksi efek topografi tanpa menghilangkan informasi litologi. Pengolahan dilakukan dengan cara membandingkan beberapa variasi perlakuan koreksi *Bouguer* pada nilai *Free Air Anomaly*. Perlakuan tersebut berupa analisis matematis yang diterapkan dengan cara memperkecil rentang nilai koreksi *Bouguer* yang terlalu signifikan sebagai efek dari ketidakcocokan antara konstanta *Bouguer conventional* terhadap jarak ukur antara satelit dengan massa batuan. Dihasilkan beberapa peta *complete bouguer anomaly* dengan pola ekspresi yang berbeda sebagai efek dari variasi analisis matematis. Representasi data yang memiliki kesesuaian dengan fenomena geologi sebenarnya dapat dilihat pada *complete bouguer anomaly map* dengan konstanta baru yaitu 0.04193/2.5 atau 0.016772. Terlihat kemenerusan utama anomali gravitasi dengan orientasi relatif utara-selatan yang diinterpretasikan sebagai sesar mendatar serta beberapa kemenerusan lainnya dengan orientasi relatif barat laut-tenggara yang diinterpretasikan sebagai sesar penyerta. Keberadaan dan persebaran densitas yang mencerminkan litologi maupun sesar pada daerah penelitian telah tervalidasi oleh peta geologi dan ekspresi topografi data SRTM berdasarkan analisis anomali gravitasi.

Kata Kunci: Analisis Matematis, Konstanta Baru, Koreksi Bouguer, Satelit Gravity, Sesar Mendatar.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara Asia yang berada tepat pada batas-batas lempeng paling aktif di dunia. Hal tersebut menyebabkan Indonesia sangat rentan terhadap bencana gunung api, gempa bumi dan bencana rendutan lain yang berhubungan dengan kegempaan seperti tsunami dan likuifaksi. Salah satu bencana tsunami terbesar yang melanda Indonesia adalah tsunami yang diakibatkan letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883 (Harris & Major dalam (Cummins, 2017).

Selain itu, wilayah Indonesia juga sangat rentan terhadap gempa bumi. Salah satu bencana gempa bumi yang baru terjadi, berdampak besar, serta menimbulkan rangkaian bencana selain gempa itu sendiri adalah gempa Palu 2018 yang memicu timbulnya tsunami. Berdasarkan hasil pemodelan yang dilakukan oleh BMKG, tsunami dengan ketinggian maksimum 3 meter beresiko terjadi di daerah Palu sekitar 10 menit setelah gempa. Berdasarkan ulasan BMKG, gempa memiliki *magnitude* 7.4 dengan OT 17:02:45 WIB, terjadi pada kedalaman 11 km (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi Utara Donggala Sulteng, 2018). Bencana tersebut menyebabkan 2.256 korban jiwa, 1.309 laporan orang hilang, lebih dari 4.600 orang luka berat, lebih dari 36.000 orang luka ringan dan lebih dari 223.000 orang mengungsi.

Fakta di atas menggambarkan tingkat urgensi yang tinggi pada bidang mitigasi bencana. Sehingga diperlukan integrasi dari

berbagai bidang keilmuan untuk dapat mengenali resiko-resiko bencana. Pada penelitian ini digunakan metode geofisika berupa gaya berat (*gravity*), untuk mengetahui geometri dan posisi sesar-sesar penyebab gempa serta menganalisis daerah-daerah yang memiliki resiko likuifaksi tinggi.

Dengan memanfaatkan data sebaran gravitasi satelit TOPEX penelitian ini bertujuan untuk mendeleniasi area yang memiliki nilai gaya berat rendah sebagai perwujudan depresi anomali pada *Complete*

Bouguer Anomaly Map. Dimana depresi anomali tersebut merepresentasikan respon dari rendahnya lito-densitas. Dengan melakukan pengolahan secara *unconventional* menggunakan konstanta *Bouguer* Baru pada data observasi satelit TOPEX FAA (*Free Air Anomaly*), diterapkan koreksi *Bouguer* yang telah menggunakan konstanta tersebut sebagai hasil *output* dari proses derivasi pada variabel geometri dalam persamaan Hukum Newton.

Penelitian ini berfokus pada *data processing* menggunakan analisa matematis pada persamaan Hukum Newton untuk menghasilkan nilai variasi gaya berat yang menggambarkan sirkumstansi geologi daerah penelitian. Dengan menghilangkan pengaruh topografi tanpa menghilangkan informasi lito-densitas. Penelitian ini dilakukan atas dasar ketidaksesuaian antara nilai variasi gaya berat pada data gravitasi *satellite* TOPEX yang dihasilkan menggunakan konstanta *bouguer* yang biasa digunakan (0.04193) terhadap kenampakan geologi seperti struktur berupa sesar dan lito-densitas

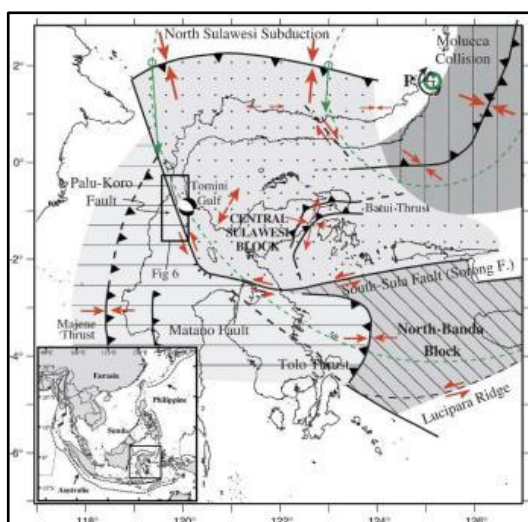
Menggunakan temuan baru yaitu konstanta *bouguer* khusus TOPEX, *Complete Bouguer Anomaly Map* didapatkan sehingga menghasilkan peta yang representatif terhadap fenomena geologi yang ada pada daerah penelitian. Selanjutnya, dilakukan analisis zona-zona dengan densitas rendah untuk menentukan area yang memiliki potensi akan bahaya likuifaksi sebagai dampak rendutan dari proses tektonik tersebut.

GEOLOGI REGIONAL

Sulawesi, sebuah pulau di bagian timur Kepulauan Indonesia dengan luas area sekitar 172.000 km² (pulau utama) dan 188.000 km² dengan kepulauan di sekitarnya (Van Bemmelen, 1949). Sulawesi adalah hasil dari konvergensi aktif tiga lempeng atau *triple junction* yang mempertemukan antara Lempeng Eurasia, Pasifik-Filipina, dan India-Australia (Bellier, et al., 2006; Hall, 2002; Prasetya, De Lange, & Healy, 2001; Socquet, et al., 2006). Berdasarkan studi yang dilakukan oleh beberapa peneliti, didapati bahwa beberapa mikroblok di area

Sulawesi telah mengalami rotasi akibat aktivitas lempeng-lempeng yang kompleks tersebut (Hall, 2002; Socquet, et al., 2006).

Menurut beberapa peneliti (co: Audley-Charles dkk., 1972; Katili, 1978; Bergman dll) dalam (Hall, 2002) pada Oligosen Akhir-Miosen Awal terdapat tumbukkan antara Blok Sulawesi Barat dan Blok Sulawesi Timur. Hal ini dibuktikan dengan ditemukannya ofiolit dan batuan metamorf ofiolitik yang mengindikasikan umur yang sama (Hall, 2002). Pada Miosen Awal, mikrokontinen dari Australia bertumbukkan dengan Sulawesi di bagian tenggara. Pada Miosen Akhir berkembanglah fase ekstensional yang membentuk beberapa cekungan di area Banda menurut Hall dan Wilson, 2000; Hall, 2002 dalam (Bellier, et al., 2006). Pada Awal Pliosen terjadi kolisi tahap akhir antara Sulawesi *East Arm* dengan blok Baggai-Sula yang menyebabkan berkembangnya struktur-struktur seperti lipatan, sesar naik, serta *uplift* di daerah Sulawesi bagian tengah dan barat (Hall dan Wilson, 2000; Hall, 2002; Van Leeuwen dan Muhardjo, 2005; Bergmen dkk., 1996; Polve dkk., 2001 dalam (Bellier, et al., 2006)). Fase ini juga diperkirakan menjadi tahap awal pembentukan Sesar Palu-Koro (Polve dkk., 2001 dalam (Bellier, et al., 2006)).

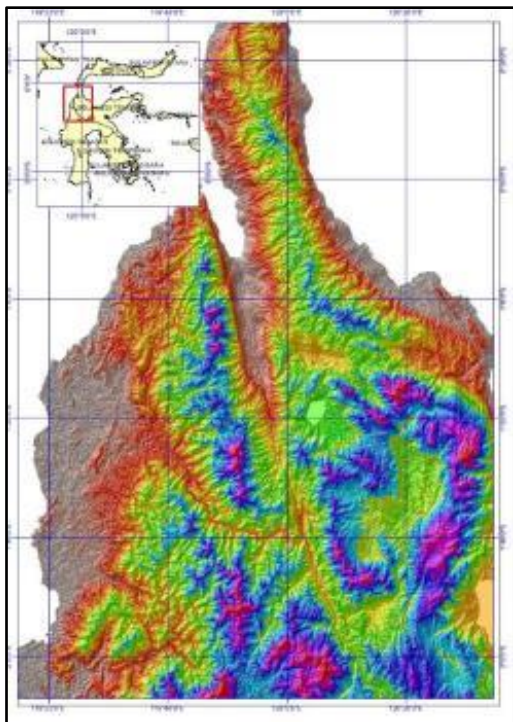


Gambar 1. Tektonik regional Sulawesi. Terjadi subduksi di utara Sulawesi oleh Lempeng Filipina-Pasifik yang menghasilkan North Sulawesi Subduction. Sesar Palu-Koro bercabang menjadi dua, yaitu Sesar Matano dan Sesar Lawanopo.

Sesar Palu-Koro merupakan salah satu sesar terbesar di Sulawesi dengan pergerakan sekitar 42 mm/tahun (Socquet, et al., 2006). Secara geomorfologi, kemenerusan Sesar Palu-Koro dimanifestasikan oleh adanya Cekungan Palu yang dibatasi oleh pegunungan dengan arah relatif barat laut-tenggara (mendekati utara-selatan) yang membentuk *wine glass valley* dan *triangular facet* pada dasar pegunungan (Tjia dan Zakaria, 1974; Beaudouin, 1998 dalam (Bellier, et al., 2006)). Hal ini membuat daerah Sulawesi Tengah, terutama di area Sesar Palu-Koro memiliki resiko tinggi terhadap gempa dan bencana-bencana alam lain yang berhubungan dengan gempa seperti tsunami dan likuifaksi. Setidaknya 19 gempa bumi yang bersifat merusak telah terjadi dalam kurun waktu 1910 hingga 2013 (Supartoyo, Sulaiman, & Junaedi, 2014). Enam gempa berpotensi tsunami pernah terjadi di Selat Makassar dan beberapa di antaranya berhubungan dengan Selat Palu-Koro (Socquet, Hollingsworth, Pathier, & Bouchon, 2019).

METODE

Penelitian ini memanfaatkan data observasi gravitasi satelit TOPEX yang telah dilakukan oleh NASA dengan luas area penelitian sebesar 175.629 m x 215.199 m atau 37.274 km². Penelitian dilakukan di daerah Sulawesi Tengah dengan tujuan mendeleniasi struktur sesar besar Palu Koro serta melakukan zonasi sebagai referensi area rawan bencana berdasarkan lito-densitas yang dicerminkan oleh variasi nilai gravitasi pada daerah tersebut (Gambar 2).



Gambar 2. Topografi area penelitian. Peta ini dibuat berdasarkan data SRTM. Area berwarna ungu merupakan area dengan elevasi tinggi sedangkan area dengan warna abu-abu merupakan area dengan elevasi rendah.

Metode gravitasi

Metode Gravitasi adalah salah satu metode geofisika yang mengukur variasi medan gravitasi bumi akibat perbedaan nilai densitas dari material dibawah permukaan (Reynolds, 2011). Teori yang mendasari Metode Gravitasi adalah Hukum gravitasi oleh Sir Isaac Newton (1642-1727) yang menyatakan bahwa gaya antara dua buah partikel bermassa m_1 dan m_2 berbanding langsung dengan hasil kali kedua massa tersebut dibagi dengan kuadrat jaraknya, seperti pada persamaan berikut:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

$$E(r) = -G \frac{m_1}{r^2} \hat{r} \quad (3.2)$$

$$g = -G \frac{\rho V}{R^2} \quad (3.3)$$

Dari persamaan diatas diketahui bahwa nilai percepatan gravitasi sebanding dengan nilai densitas benda.

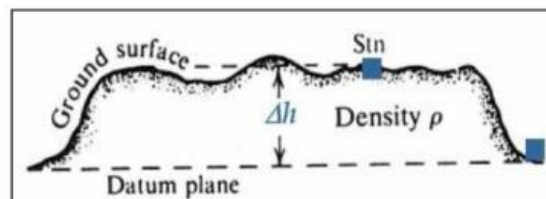
Keterangan :

- F = gaya (N)
- G = konstanta Gravitasi
 $= 6.673 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$
- m_1 = massa benda m_1 (kg)
- m_2 = massa benda m_2 (kg)
- R = jarak antar pusat massa benda (m)
- g = percepatan (m/s^2)
- V = Volume (m^3)
- ρ = Densitas Batuan (g/cc)

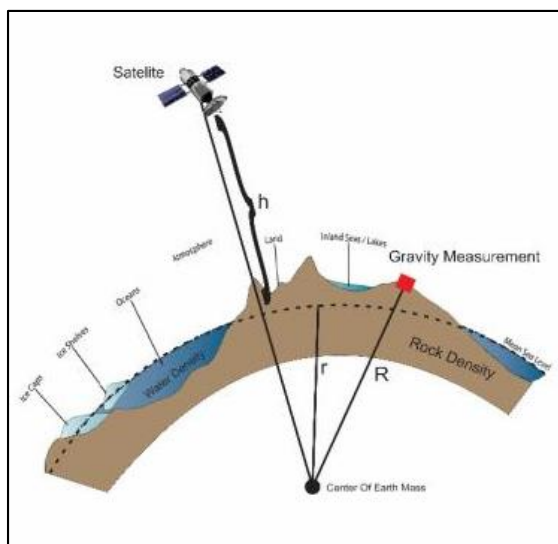
Penurunan konstanta koreksi bouguer baru

Hukum Gravitasi yang telah dikemukakan oleh Newton (1642-1727), menjadi dasar utama pemikiran pada penelitian ini. Dalam penerapan pada bidang kebumihuman rumusan tersebut telah dilakukan derivasi hingga menghasilkan gradien gravitasi terhadap perubahan jarak pengukuran dengan pusat massa bumi. Terdapat dua macam gradien gravitasi yang dihasilkan yaitu konstanta FAC (*Free Air Corection*), 0.3087 dan Konstanta BC (*Bouguer Corection*) 0.04193.

Kedua konstanta tersebut merupakan konstanta yang dihasilkan berdasarkan perhitungan *derivative* pada datum *mean sea level* atau pada keadaan teoritis jarak pengukuran dengan radius ($r = 6371 \text{ km}$). Dimana FAC adalah sebuah koreksi nilai gravitasi yang mengkompensasi variasi nilai gaya berat yang tidak diperlukan, dikarenakan perbedaan ketinggian pengukuran. Pada FAC derivasi yang dilakukan hanya memperhitungkan ketinggian titik ukur saja dengan mengabaikan variasi kelebihan dan kekurangan massa batuan. Sedangkan Koreksi *Bouguer* adalah koreksi yang dihasilkan dari proses derivasi dengan memperhitungkan variasi tarikan massa batuan yang ada dipermukaan bumi.



Gambar 3. Ilustrasi penurunan konstanta koreksi bouguer ground measurement



Gambar 4. Perbedaan pengukuran *ground gravity* dengan *satellite gravity*. Pengukuran gravitasi permukaan memiliki konstanta yang lebih besar dibandingkan pengukuran gravitasi satelit.

Berdasarkan pernyataan Newton yang telah dikemukakan seharusnya konstanta *Bouguer* (0,04193) tidak relevan terhadap pengolahan data gravitasi satelit TOPEX dikarenakan semakin jauh titik pengukuran dari pusat massa bumi ataupun pusat massa batuan maka nilai gravitasi yang dihasilkan juga akan semakin kecil. Sehingga hasil anomali *Bouguer* yang didapatkan tidak merepresentasikan kondisi geologi yang sebenarnya baik berupa lito-densitas ataupun kelurusan-kelurusan sesar, atau data *overcorrected*. Oleh karena itu dilakukan penelitian untuk menemukan konstanta *Bouguer* baru yang diterapkan pada data satelit TOPEX yang akan dijelaskan pada Gambar 3 dan 4.

Pengukuran gravitasi permukaan

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{Gm}{r_1^2} dr \quad (3.4)$$

Dimana r_1 adalah elevasi dari pengukuran gravitasi permukaan.

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G\rho v}{r_1^2} dr \quad (3.5)$$

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G\rho \frac{4}{3}\pi r_2^3}{r_1^2} dr, \quad (3.6)$$

Dimana r_2 adalah radius dari geometri massa batuan

$$\frac{dg}{dr} 1 = \frac{G\rho 4\pi r_2^2}{2r_1} dr \quad (3.7)$$

$$g_B = 2\pi G\rho r$$

$$g_B = 2\pi G\rho H \text{ (mGal)} \quad (3.8)$$

$$g_B = 0.04193 \rho H \text{ (mGal)} \quad (3.9)$$

Dengan r_1 dan r_2 diganti dengan H dengan asumsi pada pengukuran gravitasi permukaan kedua radius tersebut adalah sama.

Pengukuran gravitasi satelit

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{Gm}{r_1^2} dr \quad (3.10)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G\rho v}{r_1^2} dr \quad (3.11)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G\rho \frac{4}{3}\pi r_2^3}{r_1^2} dr \quad (3.12)$$

Berdasarkan Gambar 3 elevasi pengukuran *gravity satellite* adalah $(r+h)$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G\rho \frac{4}{3}\pi r_2^3}{(r+h)^2} dr \quad (3.13)$$

$$\frac{dg}{dr} 2 = \frac{G\rho 4\pi r_2^2}{2(r+h)} dr \quad (3.14)$$

Dilakukan perbandingan antara persamaan (3.7) dan persamaan (3.14)

$$\frac{dg_1}{dr} = \frac{G\rho 4\pi r_2^2}{2r_1} dr$$

$$\frac{dg_2}{dr} = \frac{G\rho 4\pi r_2^2}{2(r+h)} dr \quad (3.15)$$

$$\frac{dg_1}{dr} = \frac{\frac{1}{r_1} dr}{\frac{1}{(r+h)} dr} \quad (3.16)$$

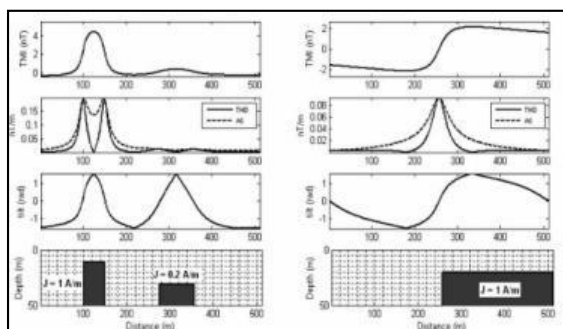
$$\frac{dg_1}{dg_2} = \frac{(r+h)}{r} \quad (3.17)$$

Dari persamaan (3.17) diketahui bahwa pengukuran gravitasi permukaan (*ground measurement*) memiliki konstanta koreksi *Bouguer* yang lebih besar dibandingkan pengukuran gravitasi *satellite*. Namun terdapat suatu permasalahan yaitu tidak ada informasi khusus mengenai data *altitude* dari pengukuran gravitasi *satellite* TOPEX. Sehingga tidak dapat dilakukan perhitungan pada hasil derivasi secara pasti.

Filter tilt derivative

Filter *tilt derivative* digunakan untuk mempertegas batas anomali gravitasi dimana berguna untuk melakukan identifikasi struktur yang berkembang di daerah penelitian.. Filter ini membatasi frekuensi anomali residual yang masuk dengan menerapkan fungsi tangensial. Filter ini memasukkan dua keseimbangan efek

pemfilteran yaitu *vertical derivative* dan *total horizontal derivative*. Whitehead & Musselman (2007), menganjurkan penggunaan filter *Tilt-Derivatives* untuk pemetaan struktur (Gambar 4).

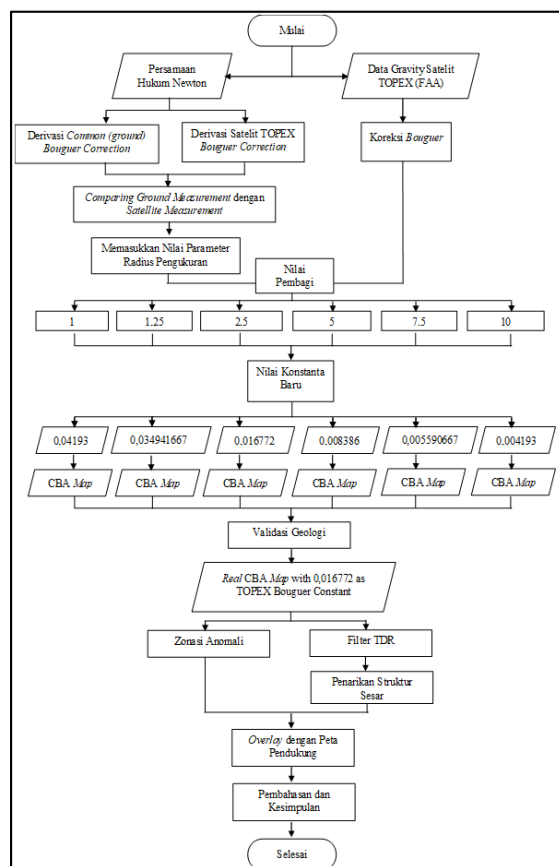


Gambar 4. Penerapan filter *Tilt Derivative* Sumber (Arisoy, M. Ö., & Dikmen, Ü., 2013)

Diagram Alir Pengolahan

Data hasil satelit TOPEX merupakan data FAA (*Free Air Anomaly*) yang akan dilakukan pengolahan koreksi *Bouguer* untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly*. Ketika pengolahan data gravitasi dilakukan menggunakan konstanta koreksi *Bouguer* 0,04193 data CBA yang didapatkan tidak menggambarkan keadaan lito-densitas dan sirkumtansi geologi daerah penelitian sebagaimana mestinya. Data yang dihasilkan justru menjadi data rusak dan rancu, karena fungsi topografi pada koreksi bouger terlalu dominan sehingga hasil reduksi justru menampilkan bentukan topografi terbalik.

Daerah penelitian memiliki rentang nilai elevasi sebesar 4923 meter, dengan elevasi maksimal 2397 meter dan elevasi minimal -2526 meter. Hal tersebut yang menyebabkan nilai koreksi *Bouguer* menggunakan konstanta 0,04193 juga memiliki rentang yang cukup besar dengan nilai maksimal 241.21 mGal dan nilai minimal -254.19 mGal. Data FAA yang didapat memiliki rentang yang lebih kecil, yaitu 249.7 mGal hingga -74.3 mGal. Sehingga apabila dilakukan reduksi menggunakan nilai koreksi *Bouguer*, malah menunjukkan ekspresi topografi yang terbalik. Hal dikarenakan nilai koreksi *Bouguer* yang terlalu besar akan mengurangkan nilai observasi. Sehingga nilai akhir yang didapatkan berubah menjadi sangat kecil.



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan perbandingan persamaan hasil derivasi pengukuran gravitasi permukaan terhadap pengukuran gravitasi satelit, dengan memasukkan nilai jari-jari bumi (r) sebesar 6371 km dan ketinggian (h) stasiun pengukuran TOPEX sebesar 1340 km didapatkan nilai pembagi (*divider*) untuk *Common Bouguer Constant*. Nilai pembagi (*divider*) tersebut memiliki kisaran antara 1.25 sampai 10 satuan. Nilai tersebut digunakan sebagai referensi dalam menentukan konstanta *Bouguer* baru khusus *satellite* TOPEX yang merupakan hasil dari rentang nilai koreksi *Bouguer* (sebelumnya) yang telah diperkecil. Cara memperkecil rentang koreksi *Bouguer* ialah dengan membagi nilai koreksi dengan beberapa nilai pembagi (*divider*) terhadap konstanta *Bouguer* yang telah ditemukan sebelumnya. Pada penelitian ini menggunakan nilai pembagi sebagai berikut, 1.25, 2.5, 5, dan 7.5 (Gambar 6).

Nilai konstanta yang telah diperkecil digunakan untuk mereduksi FAA (*Free Air*

Anomaly) yang masih dipengaruhi nilai gravitasi akibat kelebihan massa. Koreksi *Bouguer* yang dilakukan merupakan pengurangan kelebihan massa batuan dan massa tubuh air laut. Hasil dari koreksi dilakukan pembuatan peta sebaran nilai gravitasi dengan pemerian skala warna berdasarkan prinsip distribusi normal untuk mempermudah membedakan nilai *high anomaly* dan *low anomaly*. Dilakukan perbandingan kelima peta yang telah dihasilkan serta memvalidasi setiap peta terhadap data pemetaan geologi berupa litologi dan sebaran struktur.

Setelah dihasilkan satu konstanta yang dapat menggambarkan sirkumstansi dan fenomena geologi secara akurat, hasil pengolahan data gravitasi satelit tersebut diinterpretasi dan dianalisis. Interpretasi bertujuan untuk menghasilkan peta zonasi anomali dan peta deliniasi struktur. Analisis matematis juga dilakukan dengan menerapkan filter *tilt derivative* untuk mempertegas depresi anomali yang diinterpretasikan sebagai kemenerusan struktur sesar berdasarkan data gravitasi.

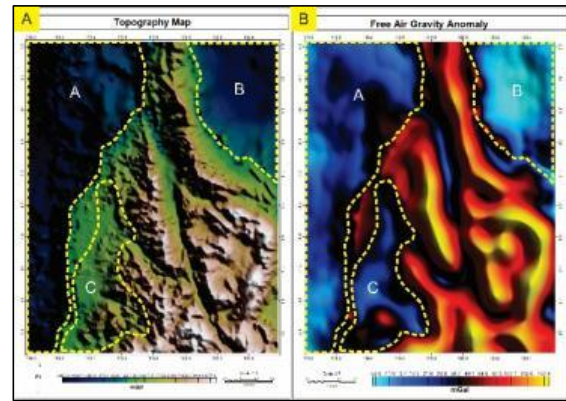
Selanjutnya, dari hasil analisis dan interpretasi dilakukan proses *Map Overlay* dengan citra satelit dan peta geologi untuk menguji kesesuaian hasil pemrosesan data gravitasi dengan keadaan geologi yang sebenarnya. Tahap terakhir adalah pembuatan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis FAA (*Free Air Anomaly*) dan Peta Topografi

Peta pada Gambar 7 merupakan peta topografi dan peta FAA (*Free Air Anomaly*) dari pengukuran gravitasi dan *altitude* satelit TOPEX. Peta tersebut masih dipengaruhi efek topografi pada nilai pengukuran gravitasi, yang disebabkan oleh variasi kelebihan dan kekurangan massa. Topografi daerah penelitian masih memberikan efek yang terlalu kuat sehingga peta yang dihasilkan kurang merepresentasikan lito-densitas dan fenomena geologi sebagaimana mestinya. Pengaruh topografi yang masih

sangat kuat tersebut, dipresentasikan oleh geometri data gravitasi TOPEX yang menunjukkan kemiripan dengan pola ekspresi topografi. Dimana *High Anomaly* bertepatan dengan *High Altitude* dan *Low Anomaly* bertepatan pada *Low Altitude*.



Gambar 7. Analisis *Free Air Anomaly* (A) Peta Topografi (B) Peta FAA (*Free Air Anomaly*).

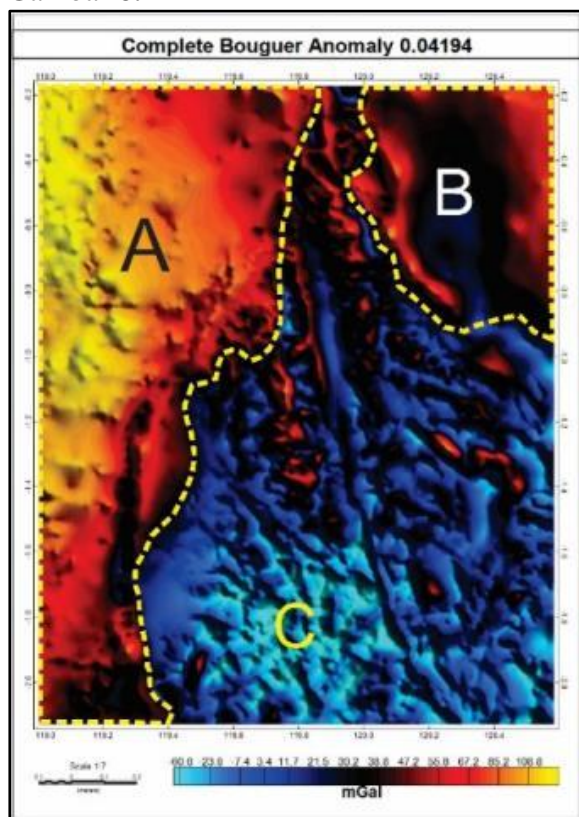
Komparasi Peta dan Grafik Hasil Pengolahan

Setelah 2 buah rangkaian derivasi Hukum Newton diaplikasikan pada *Ground Gravity Measurement* yang menghasilkan *Common Bouguer Constant*, juga pada *Satellite Gravity Measurement*, kedua persamaan tersebut dibandingkan. Ternyata nilai konstanta *Bouguer* untuk pengukuran permukaan lebih besar dibandingkan pengukuran satelit. Hal tersebut tertera dalam penurunan rumus pada bagian landasan teori.

Oleh sebab itu terjadi peristiwa *overcorrected* pada pengolahan gravitasi menggunakan konstanta *Bouguer* yang biasa digunakan (0.04193). Nilai *overcorrected* tersebut secara teori dikarenakan adanya ketidakcocokan operasi reduksi pada koreksi *Bouguer*. Dimana *altitude* pengukuran satelit menyebabkan nilai pembacaan gravitasi menjadi semakin kecil yang disebabkan oleh jarak pisah kedua benda bermassa. Pernyataan tersebut sesuai dengan prinsip gravitasi Newtonian.

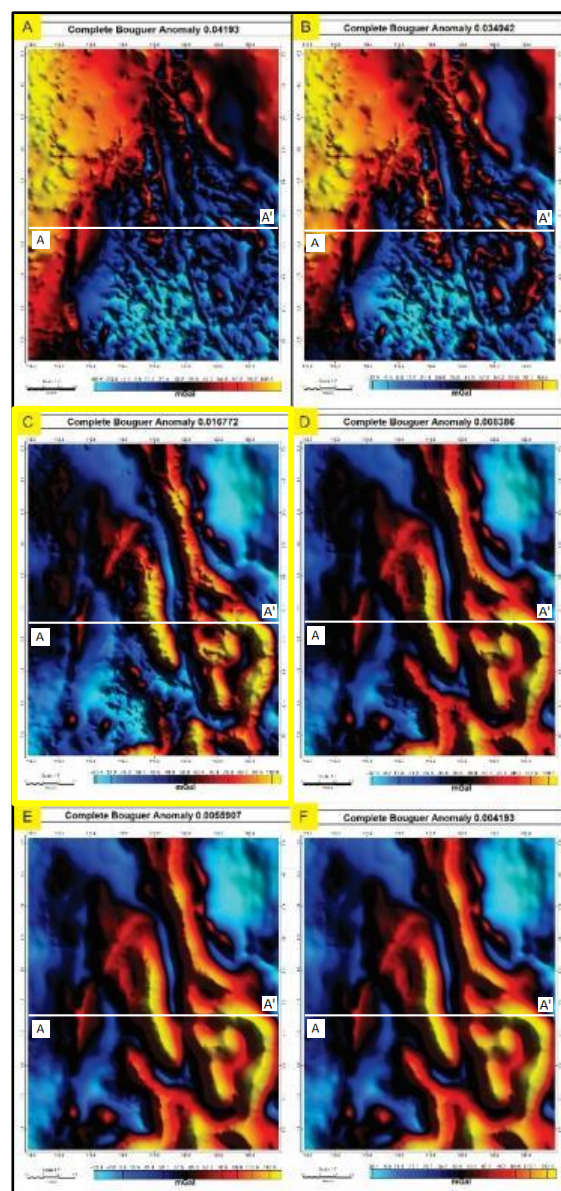
Pada pengukuran gravitasi satelit TOPEX, nilai koreksi pada *common Bouguer constant* tidak memperhitungkan perbedaan jarak antara stasiun TOPEX dengan pusat massa bumi. Sehingga operasi koreksi *Bouguer*

yang diberikan terlalu besar. Peristiwa *overcorrected* tersebut ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. *Overcorrected Complete Bouguer Map*

Pada peta yang ditunjukkan **Gambar 8.** diatas setelah dilakukan koreksi *Bouguer* menggunakan konstanta **0,04193** justru menampakkan sebuah bentuk yang menunjukkan topografi terbalik. Bentuk topografi terbalik tersebut ditunjukkan pada area (A) dan area (B) yang memiliki nilai variasi gravitasi yang tinggi secara signifikan. Dimana kedua area tersebut pada peta topografi adalah morfologi cekungan laut. Kemudian pada area (C) terlihat bentukan yang acak dan cenderung menampakkan sesuatu yang rancu dengan banyaknya *closure* (kontur tertutup) yang tercipta. Oleh sebab itu dilakukan pengecilan rentang koreksi *Bouguer* dengan beberapa nilai pembagi (*divider*) yang didapatkan dari perbandingan penurunan rumus pada pengukuran gravitasi permukaan dan pengukuran gravitasi satelit.



Gambar 9. Perbandingan Peta Hasil Pengolahan Menggunakan Variasi Konstanta *Bouguer* Baru (A) CBA Map dengan *common (ground) Bouguer constant (0.04193)*, (B) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.034942), (C) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.016772), (D) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.008386), (E) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.005590667), (F) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.004193).

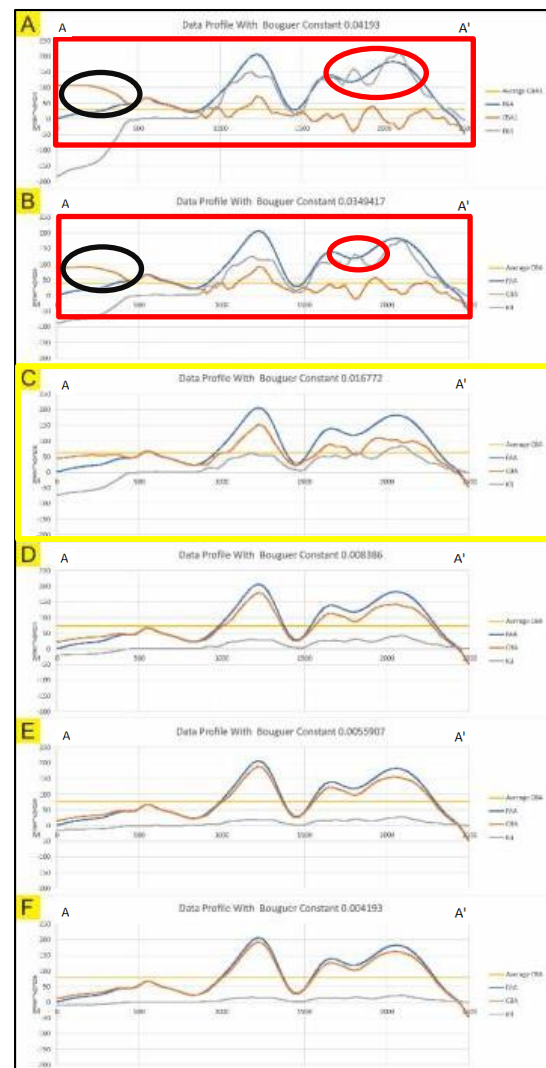
Terdapat 5 (lima) nilai pembagi diantaranya 1.25, 2.5, 5, 7.5, 10. Rentang angka tersebut didapatkan setelah memasukkan parameter radius (r) pengukuran pada *Ground Gravity*

Measurement dan *Satelite Gravity Measurement*. Dimana nilai jari jari bumi (r) sebesar 6371 km dan ketinggian (h) stasiun pengukuran TOPEX berkisar pada ketinggian 1340 km. Kemudian berdasarkan nilai pembagi tersebut didapatkan konstanta *Bouguer* yang telah memperhitungkan jarak ukur satelit TOPEX diantaranya adalah 0.034941667, 0.016772, 0.008386, 0.005590667, dan 0.004193. Namun, nilai konstanta tersebut masih harus dilakukan seleksi dengan cara dilakukan validasi *try and error* pada peta dan *slicing data*. Dimana analisis peta merupakan proses kualitatif dan *slicing data* merupakan proses kuantitatif. Perbandingan peta dan *slicing data* tersebut ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 (A) sampai dengan (F) beserta keterangan yang telah disajikan.

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 terdapat perbedaan pada masing-masing peta dan grafik yang dihasilkan. Konstanta yang tepat adalah konstanta yang dapat mereduksi efek tarikan gravitasi yang diakibatkan oleh kelebihan dan kekurangan massa namun tidak menghilangkan nilai variasi gravitasi yang diakibatkan karena lito-densitas. Pada peta (A) dan peta (B) masih memperlihatkan bentukan acak yang merepresentasikan peristiwa *overcorrected* pada pengolahan. Hal tersebut juga diperlihatkan pada grafik *slicing data* yang ditunjukkan dengan kotak berwarna merah pada grafik (A) dan (B). Pada grafik nilai operasi koreksi melebihi nilai FAA (lingkaran merah), dimana merupakan penyebab terjadinya *overcorrected*. Area yang ditunjukkan dengan lingkaran hitam juga menggambarkan peristiwa *overcorrected* dimana area tersebut merupakan morfologi laut yang didominasi oleh batuan sedimen namun memiliki nilai variasi gravitasi yang sangat tinggi.

Pada peta (D), (E) dan (F) nilai konstanta yang dihasilkan belum merepresentasikan fenomena geologi daerah penelitian karena operasi koreksi pada nilai tersebut masih *undercorrected*, dimana nilai CBA (*Complete Bouguer Anomaly*) masih menyerupai topografi daerah penelitian.

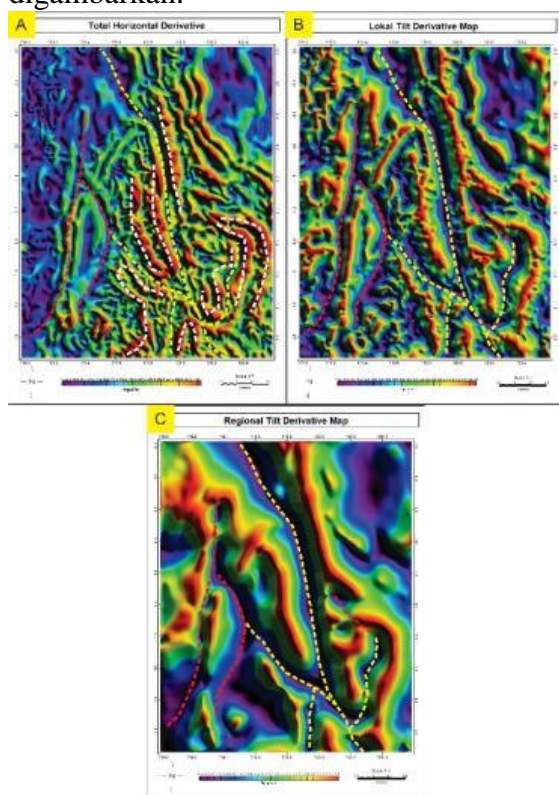
Kemiripan terhadap bentukan topografi juga dapat dilihat pada grafik *slicing data* yang ditunjukkan oleh grafik (D), (E) dan (F). Hal tersebut dikarenakan konstanta *Bouguer* terlalu kecil yang menyebabkan nilai operasi koreksi *Bouguer* juga terlalu kecil. Sehingga pengaruh topografi masih belum bisa dihilangkan dan masih menutupi informasi lito-densitas.



Gambar 10. Perbandingan Grafik Hasil Pengolahan Menggunakan Variasi Konstanta *Bouguer* Baru (A) CBA Map dengan *common (ground) Bouguer constant* (0.04193), (B) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.034942), (C) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (**0.016772**), (D) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.008386), (E) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.005590667), (F) CBA Map dengan konstanta *Bouguer* baru (0.004193).

Analisis Kelurusan dan Depresi Anomali

Area sesar dapat diidentifikasi menggunakan filter *Tilt Derivative* yang berfungsi untuk menonjolkan bentuk depresi serta punggungan anomali. Filter ini merupakan filter lanjutan dari *gradient horizontal* yang memiliki prinsip perhitungan gradien atau nilai perubahan gravitasi pada sumbu horizontal. Dengan menerapkan filter THD (*Total Horizontal Derivative*) dan *Tilt Derivative* (Gambar 11) geometri anomali sesar serta batas litologi menjadi mudah digambarkan.



Gambar 11. Analisis Depresi dan Batas Anomaly Berdasarkan *Total Horizontal Derivative* dan *Tilt Derivative* (A) Peta *Total Horizontal Derivative* (B) Peta *Lokal Tilt Derivative* (C) Peta *Regional Tilt Derivative*.

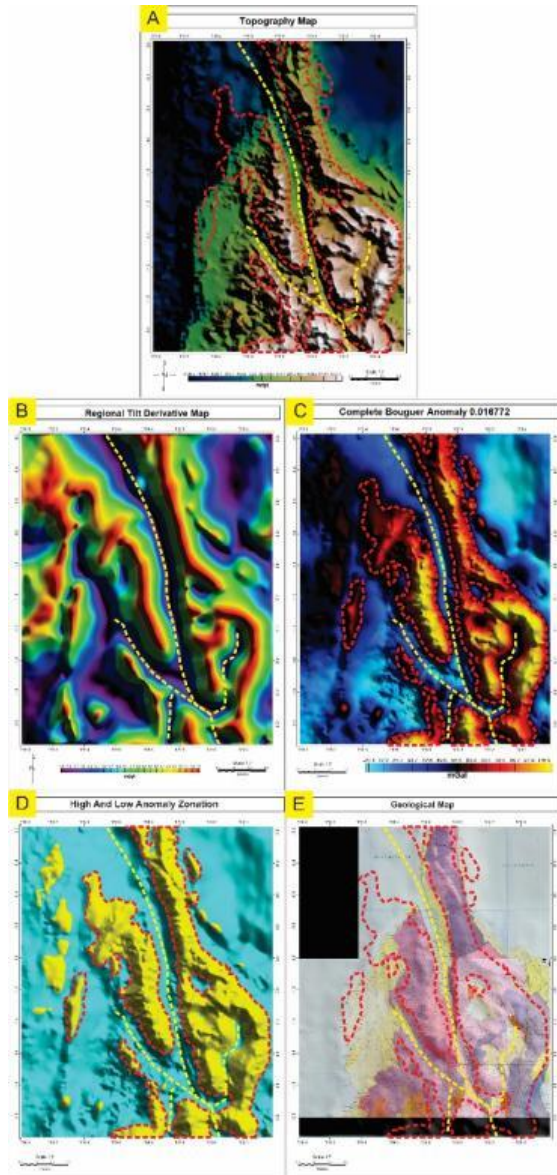
Berdasarkan hasil pemfilteran tersebut didapatkan 3 peta yaitu 1 peta THD (*Total Horizontal Derivative*) kemudian 2 peta TDR (*Tilt Derivative*) lokal dan regional. Dari hasil tersebut didapatkan kelurusan anomali dimana garis putus-putus berwarna kuning merepresentasikan sesar mayor (utama) yang cenderung bersifat regional. Dapat dikatakan regional karena depresi anomali tampak jelas

pada TDR lokal dan TDR regional. Kemudian garis putus-putus berwarna merah diinterpretasikan sebagai sesar minor (sesar pelengkap) yang mana kemungkinan sesar tersebut muncul setelah terjadinya sesar utama, karena depresi anomali hanya terlihat jelas pada peta TDR lokal saja. Pada peta THD garis putus-putus berwarna putih diinterpretasikan sebagai batas anomali, baik batas litologi ataupun batas kontak dengan area sesar. Dari ketiga analisis tersebut selanjutnya dijadikan referensi dalam validasi pada data geologi terhadap sesar yang ada.

Validasi Peta dan Grafik Hasil Pengolahan

Berdasarkan perbandingan peta dan grafik data yang telah dilakukan dapat terlihat bahwa konstanta *Bouguer* biasa justru menghasilkan data yang acak untuk pengukuran *satellite* TOPEX. Ketika dilakukan validasi terhadap data geologi baik litologi maupun struktur pada peta CBA tersebut sama sekali tidak menggambarkan sirkumstansi geologi yang sebenarnya. Sedangkan peta yang diaplikasikan koreksi *Bouguer* dengan nilai pembagi 2.5 dapat menunjukkan pola kelurusan struktur sesar besar palu koro dan sebaran litologi secara akurat pada daerah penelitian.

Hal tersebut dibuktikan dengan Gambar 12 (C dan E). Zonasi *high anomaly* dapat secara akurat melingkari daerah yang notabene adalah batuan kristalin (batuan beku dan batuan metamorf). Di sisi lain *low anomaly* menunjukkan area batuan sedimen dan batuan kristalin yang terkena struktur serta struktur sesar besar palu koro itu sendiri. Oleh karena itu berdasarkan penelitian ini didapatkan konstanta *Bouguer* baru khusus *satellite measurement* dengan nilai 0.016772.

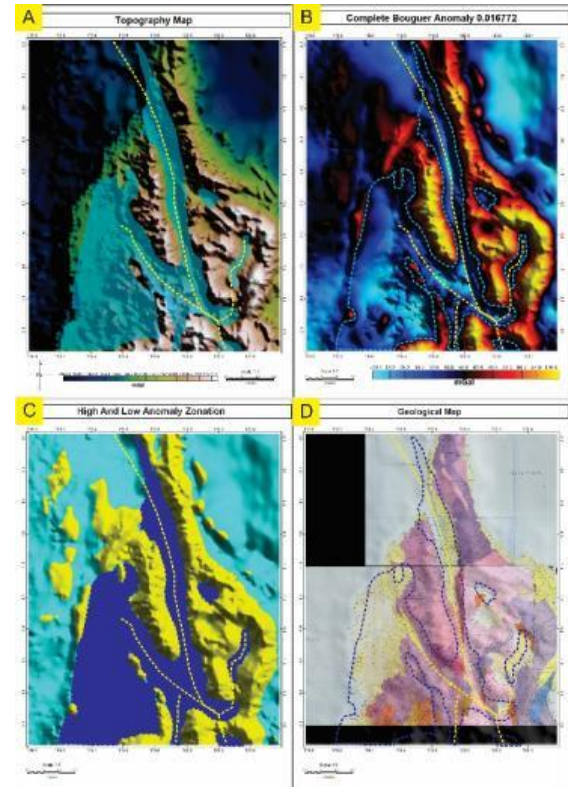


Gambar 12. Analisis Gravitasi Berdasarkan Peta CBA Dengan Konstanta *Bouguer* Baru (0.016772) (A) Peta Topografi Daerah Penelitian (B) Analisis Matematis *Tilt Derivative* (C) *Complete Bouguer Anomaly Map* (D) Zonasi Anomali Berdasarkan Distribusi Normal (E) *Overlay* Zonasi Anomali dan *Picking* Sesar Pada Data Geologi Daerah Penelitian.

Analisis Mitigasi

Dari hasil analisa dan interpretasi didapatkan area *high gravity* dan *low gravity* serta kelurusan sesar. Selanjutnya hasil tersebut diproyeksikan pada citra *Google Earth* dan morfologi daerah penelitian. Terlihat pada Gambar 13 (A) bahwa kelurusan sesar yang telah dipick pada *Tilt Derivative* berada pada morfologi lembah.

Lembah tersebut tercipta karena adanya sesar besar palu koro yang memotong batuan di daerah penelitian. Sesar tersebut terus menggerus batuan dan menyebabkan deformasi yang ekstrim. Sehingga proses detritasi berlangsung secara terus menerus.



Gambar 13. Analisis Mitigasi Berdasarkan Data Gravitasi Yang Telah Diaplikasikan Konstanta *Bouguer* Khusus TOPEX (0.016772). (A) *Overlay Low Anomaly* pada morfologi daerah penelitian. (B) Zonasi *Low Anomaly* pada *CBA Map*. (C) Zonasi *Low Anomaly* menggunakan prinsip distribusi normal. (D) *Overlay Low Anomaly* pada peta geologi daerah penelitian.

Pada Gambar (A) dan (D) dapat diamati bahwa *Low Anomaly* juga cenderung berada pada lembah dan elevasi rendah sedangkan *High Anomaly* berada pada punggung. Karena sebaran gravitasi mencerminkan sebaran *litodensity* maka pada daerah punggung didominasi oleh batuan yang memiliki densitas serta kekompakan yang lebih tinggi. Punggung tersebut dapat bertahan dari pelapukan dan erosi berkat resistensi tubuh batuan itu sendiri.

High Gravity diidentifikasi sebagai area

batuan kristalin. Area *Low Gravity* yang berada di barat daya peta diinterpretasikan sebagai area batuan sedimen. Secara genesa batuan sedimen tersebut terbentuk karena adanya pelapukan dari batuan kristalin yang menjadi *protolite* (batuan asal) yang kemudian terlitifikasi pada area tersebut. Oleh karena itu area yang didominasi batuan sedimen memiliki elevasi yang cenderung rendah dengan kelerengan yang landai. Kelurusan lembah anomali dengan arah relatif utara-selatan yang berada di tengah peta menunjukkan *low gravity*. Area tersebut diperkirakan adalah zona sesar utama Palukoro.

Dilakukan korelasi dengan peta geologi untuk analisa lanjutan. Dari hasil pengolahan *unconventional* ternyata cukup menghasilkan gambaran lito-densitas yang sesuai dengan keadaan geologi. Terbukti bahwa peta geologi area *high gravity* terletak pada komplek formasi batuan yang didominasi dengan batuan kristalin yang umumnya berada pada daerah punggung. *Low gravity* bertepatan pada area sesar serta batuan sedimen. Terdapat kesesuaian antara data geofisika dengan data geologi.

Setelah dilakukan analisis tersebut dapat diketahui area yang memiliki tingkat bahaya dan resiko yang lebih tinggi. Secara teori ilmiah area yang ditunjukkan dengan blok warna biru pada **Gambar 13** (A) adalah area yang memiliki nilai gravitasi yang rendah. Sehingga mencerminkan lito-densitas yang rendah juga. Dominasi pada daerah tersebut adalah batuan sedimen dan alluvium yang merupakan manifestasi lapukan dari sesar besar palu koro. Apabila sesar besar palu koro itu aktif kembali tentunya akan menghasilkan getaran yang sangat dahsyat. Batuan kurang kompak yang memiliki densitas rendah ketika dilalui oleh gelombang gempa akan cenderung menjebak gelombang gempa dengan hanya sedikit presentase gelombang yang diteruskan. Oleh karena itu *amplitude* gelombang pada daerah tersebut akan sangat tinggi yang menyebabkan *magnitude* gempa juga menjadi tinggi. Berbeda dengan area yang memiliki tingkat kekompakan yang tinggi. Area dengan *high density* akan cenderung

meneruskan gelombang sehingga amplitude gelombang pada area tersebut cenderung rendah sehingga *magnitude* gempa juga rendah.

Oleh sebab itu area yang ditandai dengan warna blok biru pada Gambar 13 (A) merupakan area yang rawan akan bencana kegempaan. Dengan kemungkinan *magnitude* yang lebih besar dibandingkan area yang lebih stabil pada batuan kristalin yang tidak terkena sesar. Pada area alluvium yang berasosiasi dengan sesar besar palu koro memiliki tingkat resiko yang lebih besar. Hal tersebut disebabkan karena semakin rendah ikatan pertikel pada suatu batuan akan semakin besar dampak yang dihasilkan ketika dilalui gelombang gempa terutama gelombang permukaan. Pada area tersebut diidentifikasi sebagai area yang lebih rawan akan peristiwa likuifaksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan perlakuan pengolahan data secara *unconventional* yaitu memperkecil konstanta pengali serta analisa peta yang dihasilkan didapatkan kesimpulan sebagai berikut

- Perbandingan persamaan *derivative* antara *ground measurement* dan *satellite TOPEX measurement* menunjukkan bahwa konstanta dalam melakukan koreksi *Bouguer* pada pengukuran *satellite TOPEX* seharusnya lebih kecil dibandingkan pengukuran permukaan.
- Dari dasar pemikiran tersebut didapatkan konstanta baru untuk *satellite TOPEX measurement* sebesar 0.016772 yang menggantikan 0.04193.
- Peta CBA yang telah diaplikasikan konstanta baru tersebut dapat memperlihatkan sirkumstansi geologi yang lebih sesuai baik litologi maupun sesar dibandingkan peta CBA yang masih menggunakan konstanta *Bouguer* biasa. Kesesuaian tersebut telah tervalidasi oleh data geologi permukaan yang menggambarkan sebaran litologi dan *structure*.
- *High gravity* diinterpretasikan sebagai batuan kristalin dan *low gravity*

diinterpretasikan sebagai sesar dan batuan sedimen ataupun alluvium hasil lapukan sesar besar palu koro.

- Pada *low gravity* yang memiliki pola kelurusan diinterpretasi sebagai sesar. Area ini ditemukan di beberapa tempat, salah satunya adalah di area tengah. Kelurusan tersebut diinterpretasikan sebagai zona sesar Palu-Koro. Pada *low gravity* yang memiliki pola melebar diinterpretasikan sebagai batuan sedimen. Area tersebut ditemukan di bagian barat daya dan timur daerah penelitian.
- Area *low gravity* yang diinterpretasikan sebagai batuan sedimen memiliki resiko atas kegempaan yang cukup tinggi dibandingkan area *low gravity* yang diinterpretasikan sebagai alluvium pada lembah hasil sesar palu koro yang memiliki resiko atas kegempaan yang sangat tinggi.

Diperlukan pemahaman konsep tentang reduksi nilai gravitasi agar dapat melakukan pengolahan dengan baik dan benar sehingga menghasilkan peta yang sesuai dengan fenomena geologi yang ada. *Overlay* dengan peta-peta yang sudah dibuat oleh peneliti sebelumnya juga dibutuhkan untuk mengkonfirmasi kebenaran hasil pemrosesan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Arisoy, M. Ö., & Dikmen, Ü. (2013). Detection of Magnetic Sources Using Enhanced Total Horizontal Derivative of the Tilt Angle. *Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*, 73-82.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2018) *Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi Utara Donggala Sulteng*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Bellier, O., Se'brier, M., Seward, D., Beaudouin, T., Villeneuve, M., & Putranto, E., (2006). Fission track and fault kinematics analyses for new insight. *Tectonophysics* 413, 201–220.
- Blakely, R. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bureau Gravimetique International. Land Gravity Data. Diakses pada 24 November 2019, dari <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data>.
- Cummins, P., (2017). Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction – introduction. London: *The Geological Society of London*.
- Hall, R., (2002). Cenozoic geological and plate tectonics evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Science* 20, 353-431.
- Harmoko, U. (2012). Analisis Struktur dan Muka Air Tanah Sebagai Klarifikasi Model Konseptual Sistem Panas Bumi Candi Umbul, Kartoharjo Magelang., (p. *Proceedings The 12TH Annual Indonesia Geothermal Association Meeting & Conference*). Bandung.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Hoboken: Blackwell Science.
- Nomanbhoy, N., & Satake, K., (1995). Generation mechanism of tsunamis from the 1883 Krakatau eruption. *Geophysical Research Letters* Vol.22 No.4, 509-512.
- Prasetya, G., De Lange, W., & Healy, T.,

- (2001). The Makassar Strait Tsunamigenic Region, *Natural Hazards* 24, 295–307.
- Rusydi, M., Efendi, R., Sandra, & Rahmawati. (2018). Earthquake Hazard Analysis Use Vs30 Data In Palu. IOP Conf. Series: *Journal of Physics: Conf. Series* 979, 1-10.
- Santoso, D. (2002). *Pengantar Teknik Geofisika*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Socquet, A., Hollingsworth, J., Pathier, E., & Bouchon, M., (2019). Evidence of supershear during the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake from space geodesy. *Nature Geoscience*, pp. 192-199.
- Socquet, A., Simons, W., Vigny, C., McCaffrey, R., Subarya, C., Sarsito, D., . . . Spakman, W., (2006). Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, 1-15.
- Supartoyo, Sulaiman, C., & Junaedi, D., (2014). Kelas tektonik sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol. 5 No. 2, 111 - 128.
- Telford, W., Goldart, I., & Sheriff, R. 1990. *Applied Geophysics 2nd ed.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Bemmelen, R. (1949). *The Geology of Indonesia Vol. 1A* . The Hague: Government Printing Office.