

Pemodelan Respons 3D Metode Gaya Berat Berbasis Python

Nugroho Prasetyo^[1], Ruhul Firdaus, S.T., M.T. ^[1], Gestin Mey Ekawati, S.T.,M.T. ^[1]

^[1] Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera

Email: nugroho.prasetyo77@gmail.com

Abstrak: Meskipun teknologi analisis inversi saat ini telah sangat maju, pemodelan gravitasi tidak bisa terlepas dari pentingnya tahapan *forward modeling* karena dua alasan; pertama, teknik inversi masih sangat bergantung pada initial model yang akurat; kedua, kompleksitas struktur geologi dapat diakomodir secara langsung melalui metode pemodelan kedepan. Sebelum dapat melakukan *forward modeling*, hal yang perlu dilakukan adalah parameterisasi model, pemilihan geometri model dan perhitungan respons dari model yang diberikan. Penelitian ini menggunakan model berupa prisma segi empat yang akan disusun berdampingan tanpa celah untuk membangun model struktur kontras densitas 3D yang lebih kompleks. Pada bagian awal, penulis melakukan perbandingan dan validasi berbagai pendekatan (Nagy, Plouff, Sorokin, dan Okabe) numerik respons model satu tubuh prisma melalui perbandingan dengan nilai yang diperoleh dari penyelesaian formulasi analitik untuk model yang ekuivalen. Tahap kedua, model tubuh prisma tunggal disusun untuk membangun model struktur geologi yang relevan dengan pemodelan geofisika berupa variasi densitas. Selanjutnya, respons setiap model tunggal dihitung dengan formulasi yang telah tervalidasi untuk mendapatkan respons total dari seluruh tubuh massa di bawah permukaan. Penulis juga telah menambahkan topografi untuk semakin mendekati aplikasi nyata di lapangan. Uji coba dilakukan mulai dari struktur sederhana kemudian semakin kompleks. Struktur kontras densitas yang diuji adalah lapisan datar, lapisan miring, lapisan tersesarkan naik dan turun, lapisan terlipat membentuk antiklin dan sinklin serta representasi geometri subduksi. Seluruh uji coba itu memberikan nilai anomali yang realistis dan bisa diterima meskipun di keempat sisinya masih terdapat efek tepi. Selanjutnya, perhitungan model diujikan dengan skema 4D yakni dengan memodelkan perubahan massa bawah permukaan. Kasus yang diuji adalah analog pengurangan massa pada kasus ekstraksi minyak dari reservoir dan pengangkatan air tanah dari akuifer. Seluruh uji coba menunjukkan nilai respons yang baik dan konsisten. Keberhasilan dalam memodelkan respons yang realistis dan konsisten terhadap geologi ini merupakan jalan pembuka untuk pemodelan kedepan struktur geologi 3D melalui penampang struktur 2D yang sederhana. Penulis meyakini perangkat yang dikembangkan ini sudah cukup layak ditingkatkan pada tahap diuji coba pada kasus data real *forward modeling* 3D.

Kata kunci: Metode gaya berat, *forward modeling* 3D, respons anomali gaya berat, Python.

Abstract: Although the current inversion analysis technology has advanced greatly, gravity modeling is inseparable from the importance of the stage forward modeling for two reasons; first, inversion techniques still rely heavily on accurate initial models; second, the complexity of the geological structure can be accommodated directly through the forward modeling method. Before being able to perform forward modeling, what needs to be done is model parameterization, model geometry selection and calculation of the response of the given model. This study uses a model in the form of a rectangular prism that will be arranged side by side without gaps to build a more complex 3D density contrast structure model. In the initial section, the authors conducted comparisons and validations of various approaches (Nagy, Plouff, Sorokin, and Okabe) to numerically respond to the one-body prism model through comparison with the values obtained from completing the analytical formulation for the equivalent model. The second stage, a single prismatic body model is prepared to build a geological structure model that is relevant to geophysical modeling in the form of density variations. Furthermore, the response of each single model is calculated with a validated formulation to obtain the total response of the entire body mass below the surface. The author has also added a topography to get closer to real application in the field. The trials were carried out starting from a simple structure then getting more complex. Density contrast structures tested were flat layers, sloping layers, raised up and down layers, folded layers forming an anticline and syncline as well as a representation of subduction geometry. All of the trials provided realistic and acceptable anomaly values even though there were still edge effects on all four sides. Furthermore, the calculation of the model is tested with the 4D scheme by modeling changes in the subsurface mass. The case tested is an analogue of mass reduction in the case of oil extraction from reservoirs and removal of groundwater from aquifers. All trials showed good and consistent response scores. This success in modeling realistic and consistent responses to geology is an opening for future modeling of 3D geological structures through simple 2D structural cross-sections. The author believes that the device developed is quite feasible to be upgraded at the testing stage in the case of real forward modeling 3D data.

Keywords: Gravity method, forward 3D modeling, gravity anomaly response, Python.

I. Pendahuluan

Metode gaya berat merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mendekati model bawah permukaan melalui sifat densitas batuan. Metode ini menggunakan respons gaya berat yang terukur melalui alat gravimeter untuk melakukan pendekatan model bawah permukaan. Hal ini disebabkan oleh benda yang memiliki massa akan menyebabkan timbulnya gaya tarik pada daerah di sekitarnya (Hukum Newton). Pengolahan data gaya berat menjadi model densitas bawah permukaan membutuhkan teknik pemodelan inversi yang berkaitan erat dengan *forward modeling* (Marcotte, 2014).

Proses inversi membutuhkan iterasi berulang dari *forward modeling*, sehingga membutuhkan biaya komputasi yang mahal. Permasalahan harga komputasi bisa diakomodasi dengan meningkatkan kualitas perangkat keras dan teknik komputasi yang efisien. Efisiensi teknik komputasi pada *forward modeling* dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya adalah model geometri massa jenis, model persamaan matematika, teknik paralelisasi, serta bahasa pemrograman yang digunakan (Gunawan & Alawiyah, 2016). Ada sejumlah cara untuk mendekati bentuk geometri dari model densitas tiga dimensi bawah permukaan. Bentuk umum model geometris dasar yang digunakan adalah tumpukan prisma segi empat, tumpukan prisma poligonal, dan *polyhedron* (Li & Chouteau, 1997).

Pada penelitian ini, dilakukan kajian respons gaya berat menggunakan bentuk model geometri prisma segi empat dengan densitas homogen. Dengan bentuk geometri tersebut, respons gaya berat akan dihitung menggunakan model matematis dari peneliti sebelumnya yaitu Sorokin (1951), Haaz (1953), Jung (1961), Plouff (1966, 1976), Nagy (1966), dan Okabe (1979). Respons gaya berat hasil perhitungan dari empat model matematik akan dibandingkan tingkat akurasi serta kapabilitasnya. Model matematika terbaik digunakan untuk membuat aplikasi pemodelan respons gaya berat, kemudian aplikasi ini akan diuji untuk menghitung respons gaya berat pada model geologi sederhana.

II. Dasar Teori

Daya tarik menarik antara dua buah benda dinyatakan oleh Hukum Newton. Hukum Newton menyatakan bahwa *magnitude* gaya gravitasi antara dua buah benda bermassa sebanding dengan massanya dan berbanding terbalik terhadap kuadrat dari jarak keduanya. Pada koordinat kartesian, gaya tarik menarik antara sebuah benda dengan massa m_0 di titik P (x,y,z) dan benda bermassa m pada pusat massa Q (x',y',z') dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$F = \gamma \frac{mm_0}{r^2} \quad (1)$$

dimana

$$r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}}$$

Massa m dan m_0 memiliki satuan kilogram (Kg), jarak memiliki satuan meter (m), konstanta gravitasi Newton adalah $6.67 \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot sec^{-2}$, dan gaya gravitasi memiliki satuan $m \cdot sec^{-2}$. Dari persamaan (1) dapat dituliskan secara sederhana sebagai berikut:

$$g = -\gamma \frac{m}{r^2} \hat{r} \quad (2)$$

Karena massa benda (m) berkaitan dengan volum (v dalam satuan m^3) dan densitas (ρ dalam satuan Kg/m^3) maka persamaan (2) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$g = -G\rho \frac{v}{r^3} \quad (3)$$

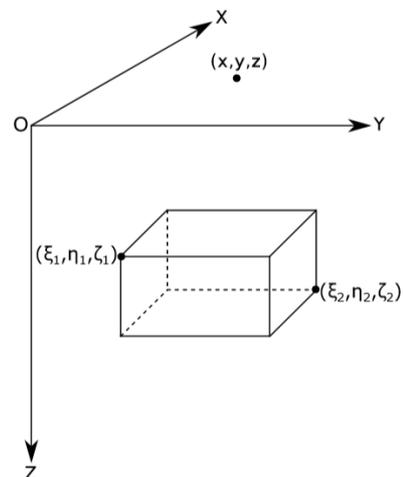
Persamaan (3) dapat digunakan untuk menghitung respons *forward modeling* pada model dengan bentuk geometri bola pejal atau titik massa. Bentuk model ini kurang dapat mengakomodasi model geologi yang rumit secara 3D. Model geologi 3D dapat didekati dengan bentuk geometri sederhana prisma segi empat. Bentuk geometri ini memiliki keunggulan dapat mengakomodasi model geologi yang rumit dengan menyusun sejumlah prisma segi empat pada bentuk model geologi yang diinginkan. Secara umum persamaan untuk menghitung respons untuk *forward modelling* adalah sebagai berikut:

$$\vec{g}(x, y, z) = -G\rho \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{z-z'}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \quad (4)$$

III. Metodologi

a. Pengujian metode *forward modelling*

Pada pengujian perhitungan respons gaya berat ini menggunakan bentuk benda prisma segi empat (Gambar 1) yang sisi prismanya sejajar dengan sumbu x, y, z, dengan densitas ρ seragam dan dimensi yang dibatasi oleh $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, $\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2$, dan $\zeta_1 \leq \zeta \leq \zeta_2$ memiliki tarikan vertikal pada titik pengukuran (x, y, z) . Pengujian pada penelitian ini menggunakan metode *forward modeling* dengan pendekatan bentuk prisma segi empat yang dikembangkan oleh Sorokin, Haaz, Jung, Plouff, Okabe, dan Nagy.



Gambar 1 Prisma segi empat dalam sistem koordinat kartesian. Sumber : (Gunawan & Alawiyah, 2016)

Berdasarkan persamaan (4), Sorokin, Haaz, Jung, Plouff, Okabe, dan Nagy menurunkan persamaan untuk melakukan perhitungan forward modeling. Setiap metode memiliki bentuk persamaan yang berbeda seperti berikut:

1. Metode Sorokin (1951) dalam (Li & Chouteau, 1997) memiliki persamaan sebagai berikut:

$$g = -G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln(y_j + r_{ijk}) + y_j \ln(x_i + r_{ijk}) + z_k \arctan \frac{z_k r_{ijk}}{x_i y_j} \right] \quad (5)$$

2. Metode Haaz (1953), Jung (1961), Plouff (1966, 1976) dalam (Li & Chouteau, 1997), memiliki persamaan sebagai berikut:

$$g = -G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln(y_j + r_{ijk}) + y_j \ln(x_i + r_{ijk}) - z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}} \right] \quad (6)$$

3. Metode Okabe (1979) memiliki persamaan sebagai berikut:

$$g = -G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln(y_j + r_{ijk}) + y_j \ln(x_i + r_{ijk}) + 2z_k \arctan \frac{x_i + y_j + r_{ijk}}{z_k} \right] \quad (7)$$

4. Metode Nagy (1966) memiliki persamaan sebagai berikut:

$$g = -G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \times \left[x_i \ln(y_j + r_{ijk}) + y_j \ln(x_i + r_{ijk}) - z_k \arcsin \frac{y_j^2 + z_k^2 + y_j r_{ijk}}{(y_j + r_{ijk}) \sqrt{y_j^2 + z_k^2}} \right] \quad (8)$$

dimana,

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$$

dan,

$$x_i = x - \xi_i, y_j = y - \eta_j, z_k = z - \zeta_k$$

Untuk persamaan (5), (6), (7), dan (8).

- a. Pengujian menggunakan model geologi sederhana

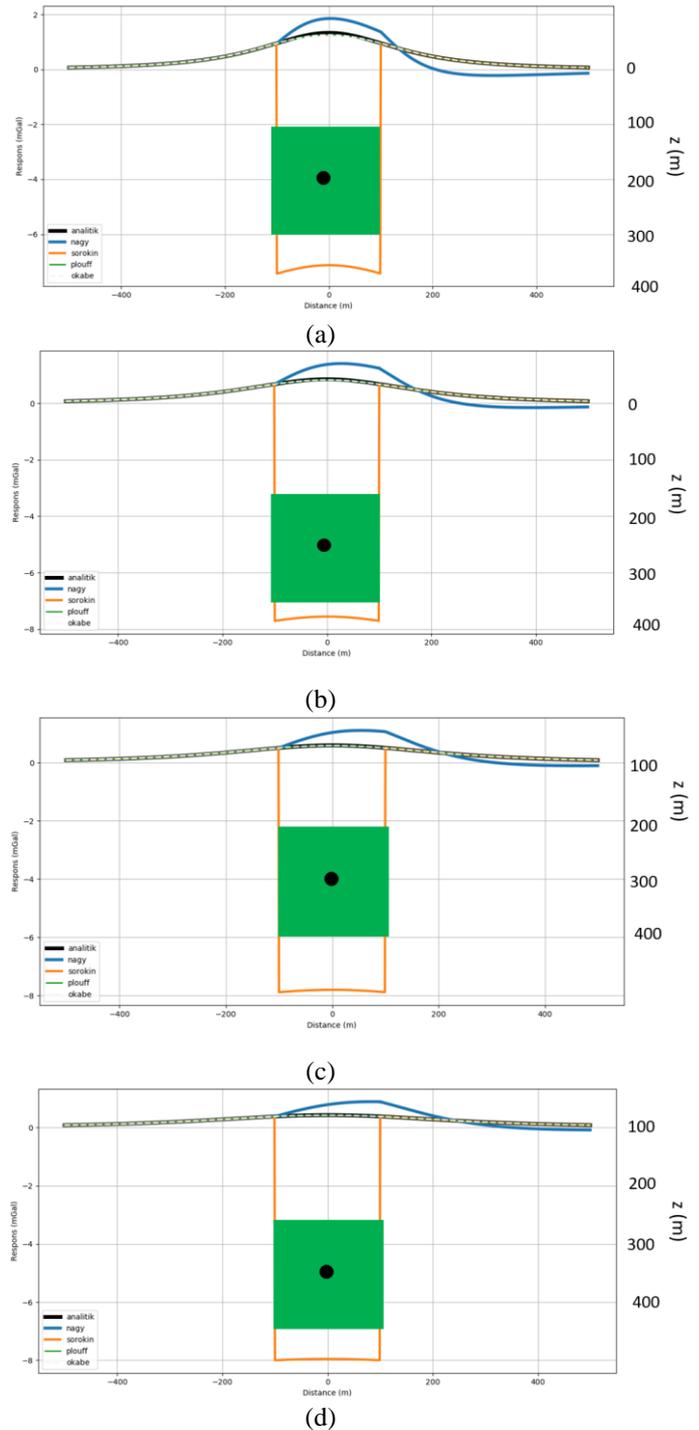
Setelah melakukan pengujian metode forward modelling menggunakan satu model prisma segi empat, metode forward modelling yang terpilih akan digunakan untuk menghitung model geologi sederhana dari tumpukan prisma segi empat. Model yang akan diuji adalah lipatan sinklin dan antiklin, sesar normal, lapisan horizontal, lapisan miring, cekungan air tanah, dan subduksi.

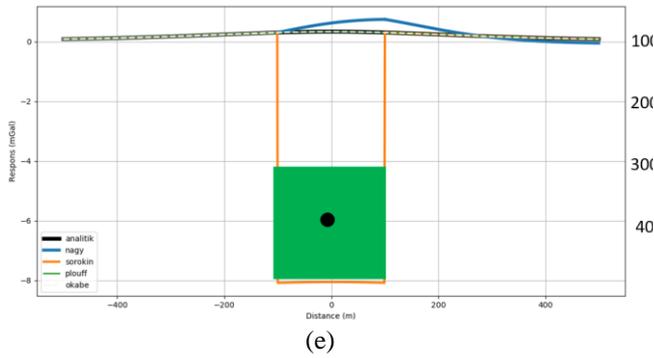
IV. Hasil dan Pembahasan

- a. Pengujian metode forward modelling

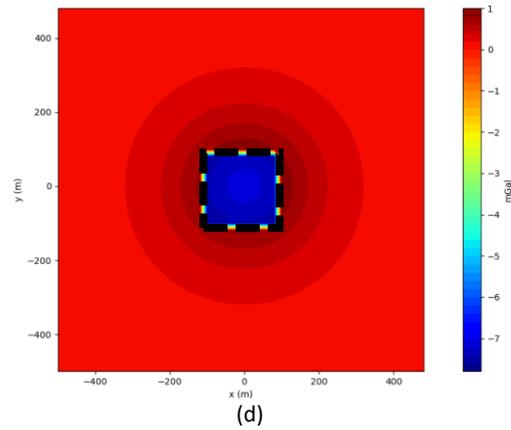
Simulasi *forward modeling* dilakukan menggunakan empat metode berbeda yaitu metode Nagy (1966), Okabe (1979), Haaz-Jung-Plouff (1953, 1961, 1966, 1975, 1976), dan Sorokin (1951). Anomali gaya berat dihitung pada permukaan 2D dengan titik pengukuran

tersebar seluas -500 hingga 500 meter untuk kedua sumbu koordinat kartesian (x,y) dan kedalaman 0 meter ($z = 0$) dengan spasi 20 meter sehingga menghasilkan 2500 titik pengukuran. Pada pengujian model prisma persegi panjang tunggal menggunakan parameter model densitas sebesar 1000 km/m^3 dengan geometri model (200 x 200 x 200) m pada koordinat titik pusat massa ($x=0, y=0$) relatif terhadap geometri model (tepat di titik tengah model) dan kedalaman (z positif ke bawah) bervariasi dari 200 m, 250 m, 300 m, dan 400 m. Hasil *forward modeling* pada semua metode ditampilkan dalam bentuk plot respons pada penampang di garis $y = 0$.

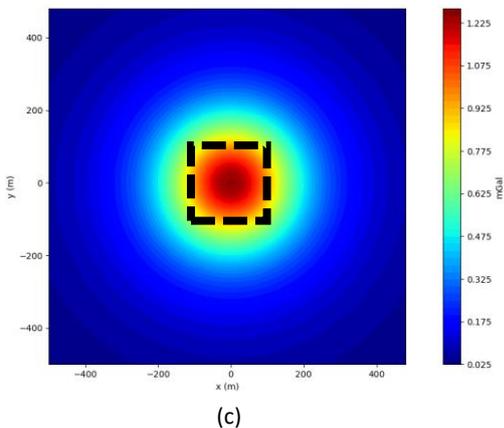
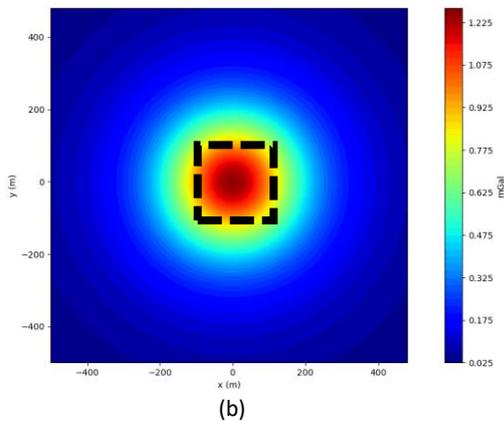
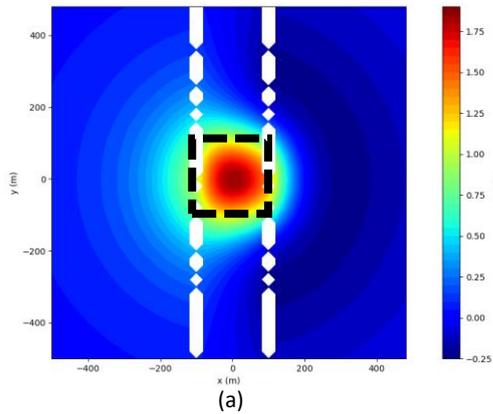




Gambar 1 Respons gaya berat penampang vertikal dari model tunggal prisma segi empat. (a) kedalaman model 200 m, (b) kedalaman 250 m, (c) kedalaman 300 m, (d) kedalaman 350 m, dan (e) kedalaman 400 m.



Gambar 2 Respons gaya berat pada bidang permukaan observasi dari model tunggal prisma segi empat. (a) Metode Nagy, (b) Metode Haaz-Jung-Plouff, (c) Metode Okabe, (d) Metode Sorokin



Respons gaya berat yang diperoleh dari perhitungan model tunggal prisma segi empat (Gambar 1 a hingga e) memperlihatkan hasil perhitungan model matematika Sorokin (1951), Haaz (1953), Jung (1961), Plouff (1966, 1976), Nagy (1966), dan Okabe (1979) serta perhitungan secara analitik pendekatan model bola pejal dengan densitas dan volum yang sama pada garis di sumbu $y = 0$. Berdasarkan hasil pada gambar 4.1, terlihat adanya perbedaan sebaran respons gaya berat untuk setiap model matematis yang digunakan. Metode Haaz-Jung-Plouff dan metode Okabe memiliki nilai yang sangat mendekati referensi model analitik, dan semakin menyerupai respons dari perhitungan analitik ketika model prisma segi empat semakin dalam dari titik observasi. Metode Nagy memiliki bentuk respons gaya berat yang menyerupai respons perhitungan analitik, namun memiliki respons yang lebih besar dari perhitungan analitik. Sedangkan metode Sorokin memiliki persebaran yang sangat jauh dari respons gaya berat analitik.

Kapabilitas metode *forward modeling* yang telah diuji menunjukan metode Okabe dan Haaz-Jung-Plouff dapat menghitung respons gaya berat dari semua titik observasi. Metode Sorokin dapat menghitung keseluruhan titik observasi selain titik (0, 0), sebab pada titik ini fungsi *arctan* persamaan (5) menjadi tidak terdefinisi karena dibagi dengan 0. Metode Nagy memiliki titik observasi yang tidak dapat terukur (*NaN*) dominan berada di sekitar garis pada sumbu $x = 100$ dan -100 (Gambar 4.2 a), untuk keseluruhan titik observasi berjumlah 2500 titik terdapat 84 titik yang tidak dapat dihitung nilai responsnya. Nilai *NaN* timbul pada metode ini sebab nilai dalam fungsi *arcsin* pada persamaan 2.18 diluar dari rentang 0 hingga 1.

Pengujian selanjutnya adalah efisiensi fungsi metode *forward modeling* untuk menghitung respons gaya berat. Pengujian ini dilakukan dengan cara mencatat waktu komputasi yang dibutuhkan metode *forward modeling* dalam menghitung 2500 titik observasi. Waktu komputasi diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata dari proses *running* fungsi metode forward

modeling sebanyak 10 kali. Berdasarkan hasil pengujian efisiensi (Tabel 1) diperoleh metode Haaz-Jung-Plouff memiliki waktu komputasi yang paling singkat dengan nilai 0,8484375 detik, metode Okabe selama 0,8828125 detik, 0,8546875 detik untuk metode Sorokin, dan metode yang membutuhkan waktu komputasi paling banyak adalah metode Nagy dengan nilai 0,971875 detik.

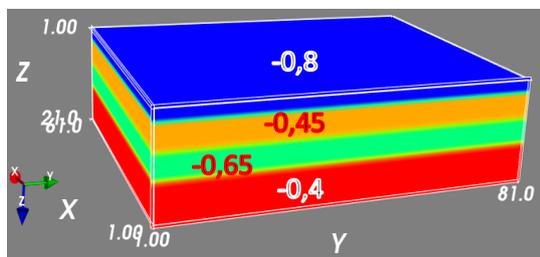
Berdasarkan pengujian akurasi, kapabilitas, dan efisiensi pada empat metode forward modeling diperoleh metode Haaz-Jung-Plouff memiliki hasil terbaik. Metode ini akan digunakan untuk menghitung model geologi sederhana secara 3D.

- b. Pengujian menggunakan model geologi sederhana
 - Implementasi Model Geologi Perlapisan

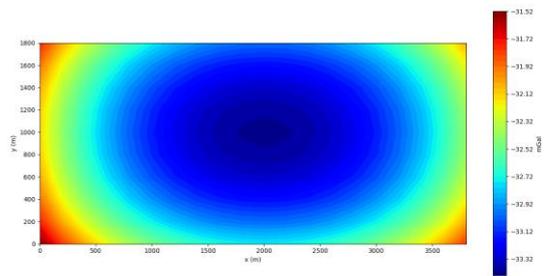
Setelah metode perhitungan anomali *forward* modeling ditentukan dari pengujian model tunggal, diperlukan penerapan untuk menghitung anomali pada model perlapisan. Model perlapisan ini dapat mewakili keadaan geologi di batuan sedimen yang memiliki struktur perlapisan. Implementasi model volum perlapisan dilakukan melalui pengisian volum lapisan dengan kubus-kubus dalam batas lapisan (batas atas dan bawah) yang telah ditentukan. Penulis mencoba untuk menghitung anomali dari perlapisan horizontal, miring, lipatan sinklin, dan lipatan antiklin untuk melihat kesesuaian distribusi anomali terhadap model perlapisan.

Respons anomali akan dihitung pada permukaan datar horizontal elevasi ($z = 0$) dengan luasan sebesar (50×10) km dan luas *grid* sebesar 0.5 Km, sehingga jumlah titik pengukuran sebanyak 2000 titik. Komposisi model geologi yang akan digunakan dalam pengujian ini memiliki lima lapisan batuan dengan densitas 1.8 g/cm^3 , 2 g/cm^3 , 2.2 g/cm^3 , 2.4 g/cm^3 , dan 2.6 g/cm^3 tersusun dari lapisan atas hingga bawah serta memiliki orientasi jurus $N 0^\circ E$. Dimensi model sebesar $(50 \times 10 \times 5)$ Km, dengan besar *grid* sebesar 0.5 Km sehingga memiliki sel kubik sejumlah 20000 buah.

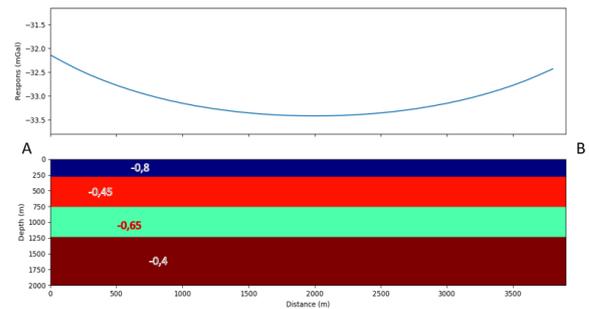
- Lapisan Horizontal



Gambar 7 Model geologi perlapisan horizontal



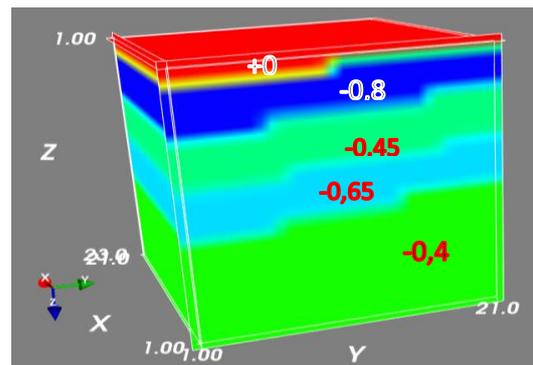
Gambar 8 Anomali hasil perhitungan metode Haaz-Jung-Plouff model lapisan horizontal



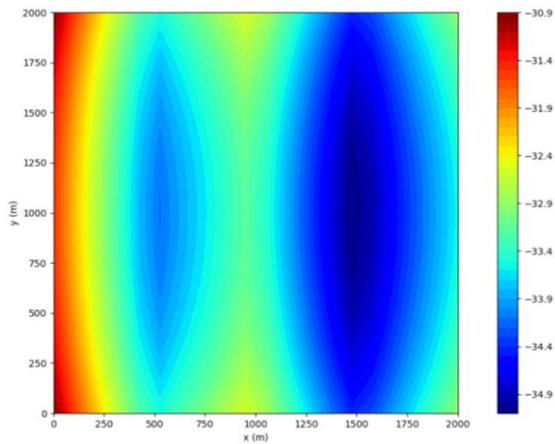
Gambar 9 Penampang vertikal model geologi perlapisan horizontal dengan arah lintasan A-B.

Hasil perhitungan anomali dari model lapisan horizontal menggunakan metode Plouff (Gambar 8 dan Gambar 9) menunjukkan hasil yang baik. Hal ini terlihat dari distribusi anomali yang merepresentasikan model perlapisan horizontal (Gambar 7) dengan nilai anomali maksimum sekitar -32 mGal terdapat di tengah model dan mengalami penurunan ketika menjauhi pusat model. Penyebab penurunan nilai anomali ini disebabkan berkurangnya kontribusi massa di pinggir model.

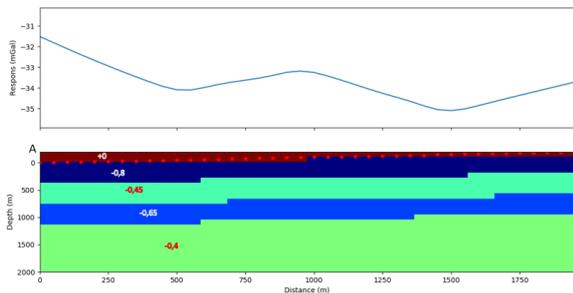
- Lapisan Miring



Gambar 10 Titik-titik pusat massa prisma persegi panjang pada model lapisan miring



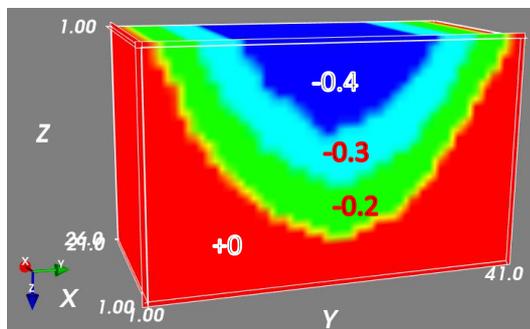
Gambar 11 Anomali hasil perhitungan metode Plouf model lapisan miring



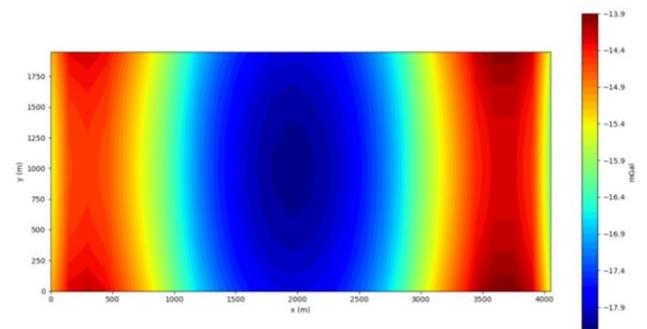
Gambar 12 Penampang vertikal model geologi lapisan miring (Gambar 4.8) dengan arah lintasan A-B

Hasil perhitungan anomali dari model lapisan miring menggunakan metode Plouf (Gambar 11 dan Gambar 12) menunjukkan hasil yang baik. Hal ini terlihat dari distribusi anomali yang merepresentasikan model perlapisan miring (Gambar 10) dengan nilai anomali maksimum sekitar 325 mGal terdapat di sekitar bagian titik A (500 m, 2000 m) hingga (2000 m, 8000 m) dan mengalami penurunan ke arah timur sesuai dengan orientasi penunjaman lapisan. Batuan dengan densitas lebih tinggi terdapat di bagian barat lebih dekat dengan permukaan dibandingkan dengan bagian timur.

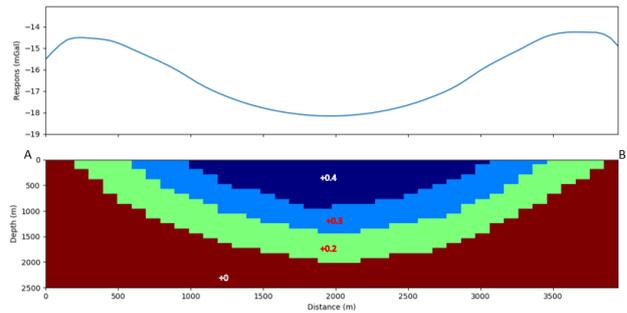
- Lapisan Lipatan Sinklin



Gambar 13 Titik-titik pusat massa prisma persegi panjang pada model lapisan lipatan sinklin.



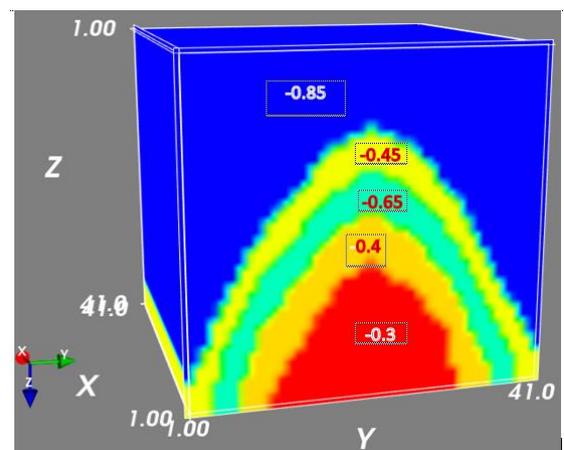
Gambar 14 Respons anomali hasil perhitungan metode Plouf model lapisan lipatan sinklin.



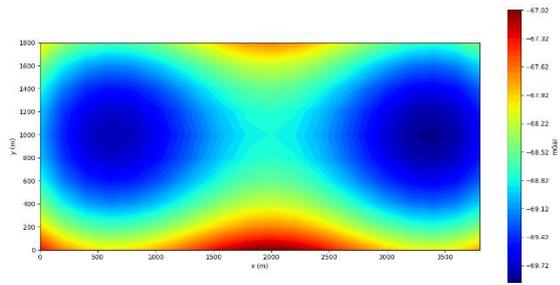
Gambar 15 Penampang vertikal model geologi perlapisan dengan struktur lipatan arah lintasan W-E

Hasil perhitungan anomali dari model lapisan lipatan sinklin menggunakan metode Plouf (Gambar 14 dan Gambar 15) menunjukkan hasil yang baik. Hal ini terlihat dari distribusi anomali yang merepresentasikan model perlapisan lipatan sinklin (Gambar 13) dengan nilai anomali maksimum sekitar -55 mGal terdapat di sekitar arah A-B pada jarak sekitar 10000 m dan 40000 m, juga mengalami penurunan di bagian tengah dan daerah tepi model. Penyebab penurunan nilai anomali ini disebabkan berkurangnya kontribusi massa di pinggir model dan batuan berdensitas tinggi semakin dalam di bagian tengah.

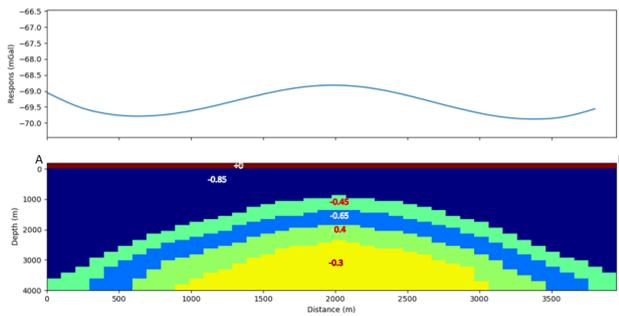
- Lapisan Lipatan Antiklin



Gambar 16 Model geologi perlapisan dengan struktur lipatan antiklin.



Gambar 17 Respons anomali hasil perhitungan metode Plouf model lapisan lipatan antikin.



Gambar 18 Penampang vertikal model geologi perlapisan dengan struktur lipatan antikin arah lintasan W-E

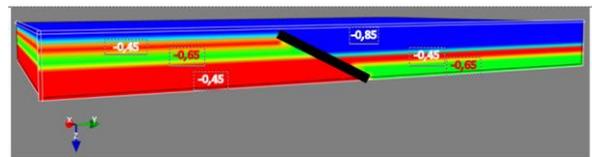
Hasil perhitungan anomali dari model lapisan lipatan antikin menggunakan metode Plouf (Gambar 17 dan Gambar 18) menunjukkan hasil yang baik. Hal ini terlihat dari distribusi anomali yang merepresentasikan model perlapisan lipatan sinklin (Gambar 16) dengan nilai anomali maksimum sekitar 292 mGal terdapat di sekitar arah A-B pada jarak 20000 hingga 30000m, juga mengalami penurunan di bagian tepi model. Penyebab penurunan nilai anomali ini disebabkan berkurangnya kontribusi massa di pinggir model dan batuan berdensitas tinggi semakin dangkal di bagian tengah.

1.2 Implementasi Model Geologi Sesar

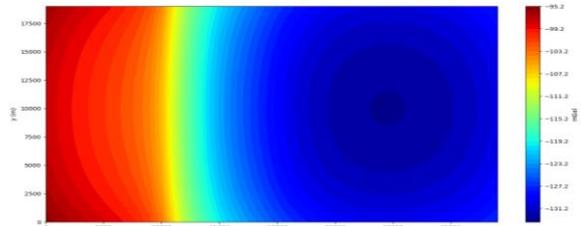
Implementasi model geologi dengan struktur sesar diperlukan untuk menguji kemampuan aplikasi ini dalam mendelineasi struktur sesar dari hasil perhitungan respons anomali yang diperoleh. Respons anomali akan dihitung pada permukaan datar horizontal elevasi ($z = 0$) dengan luasan sebesar (50×10) Km dan luas *grid* sebesar 0.5 Km, sehingga jumlah titik pengukuran sebanyak 2000 titik.

Komposisi model geologi yang akan digunakan dalam pengujian ini memiliki lima lapisan batuan dengan densitas 1.8 g/cm^3 , 2 g/cm^3 , 2.2 g/cm^3 , 2.4 g/cm^3 , dan 2.6 g/cm^3 tersusun dari lapisan atas hingga bawah serta struktur sesar memiliki orientasi jurus N 30° E. Dimensi model sebesar $(50 \times 10 \times 5)$ Km, dengan besar *grid* sebesar 0.5 Km sehingga memiliki sel kubik sejumlah 20000 buah.

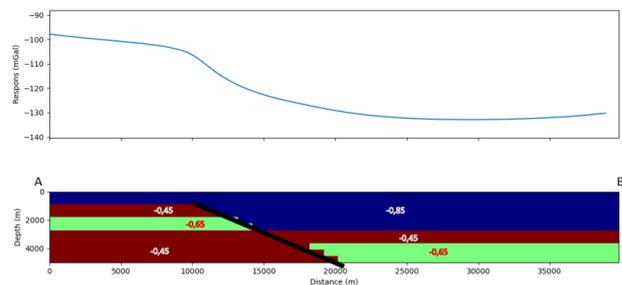
2.3.1 Sesar Normal



Gambar 19 Model geologi perlapisan dengan struktur sesar normal.



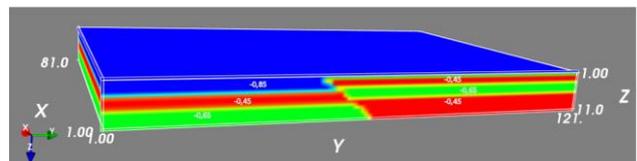
Gambar 20 Respons anomali model geologi perlapisan dengan struktur sesar normal.



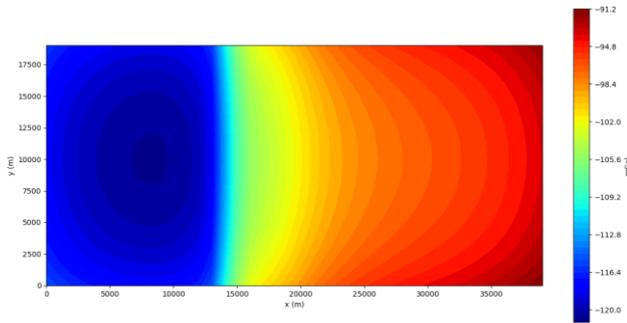
Gambar 21 Penampang vertikal dan respons anomali model geologi perlapisan dengan struktur sesar normal, garis hitam merupakan struktur sesar.

Hasil perhitungan respons anomali gaya berat (Gambar 20) model geologi perlapisan dengan struktur sesar normal (Gambar 19) memiliki nilai maksimum pada bagian barat sebesar 325 mGal. Nilai anomali meluruh ke bagian timur dan di tepi model, hal ini disebabkan oleh batuan dengan densitas lebih tinggi relatif dangkal di bagian barat dan di bagian timur relatif lebih dalam serta menurunnya kontribusi massa di bagian tepi model. Struktur sesar dapat terlihat dari kontras respons di penampang vertikal berarah W-E (Gambar 21 c) tepat di zona sesar dengan jarak 25000 m. Untuk penampang dengan arah N-S dan SW-NE (Gambar 21 a dan b) respons anomali yang menunjukkan struktur sesar tidak terlalu terlihat, namun kontras anomali sedikit mengalami perubahan *trend* kemiringan tepat di atas struktur sesar.

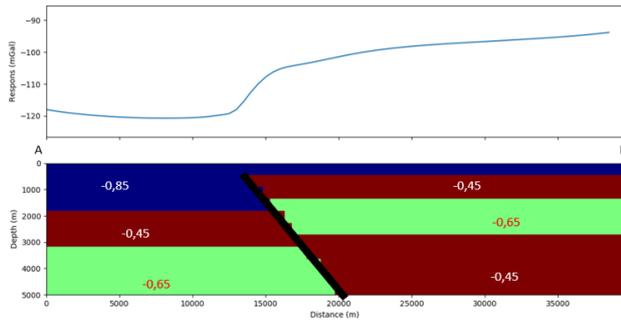
2.3.2 Sesar Naik



Gambar 22 Model geologi perlapisan dengan struktur sesar naik.



Gambar 23 Respons anomali model geologi perlapisan dengan struktur sesar naik.



Gambar 24 Penampang vertikal dan respons anomali model geologi perlapisan dengan struktur sesar naik.

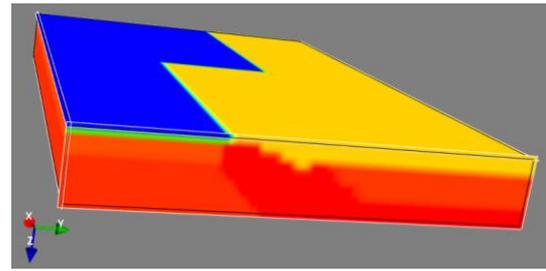
Hasil perhitungan respons anomali gaya berat (Gambar 23) model geologi perlapisan dengan struktur sesar normal (Gambar 22) memiliki nilai maksimum pada bagian barat sebesar 345 mGal. Nilai anomali meluruh ke bagian barat dan di tepi model, hal ini disebabkan oleh batuan dengan densitas lebih tinggi relatif dalam di bagian timur dan di bagian barat lebih dangkal, serta menurunnya kontribusi massa di bagian tepi model. Struktur sesar dapat terlihat dari kontras respons di penampang vertikal berarah W-E (Gambar 24 c) tepat di zona sesar dengan jarak 20000 m. Untuk penampang dengan arah N-S dan SW-NE (Gambar 24 a dan b) respons anomali yang menunjukkan struktur sesar tidak terlalu terlihat, namun kontras anomali sedikit mengalami perubahan *trend* kemiringan tepat di atas struktur sesar.

1.3 Implementasi Model Geologi Subduksi

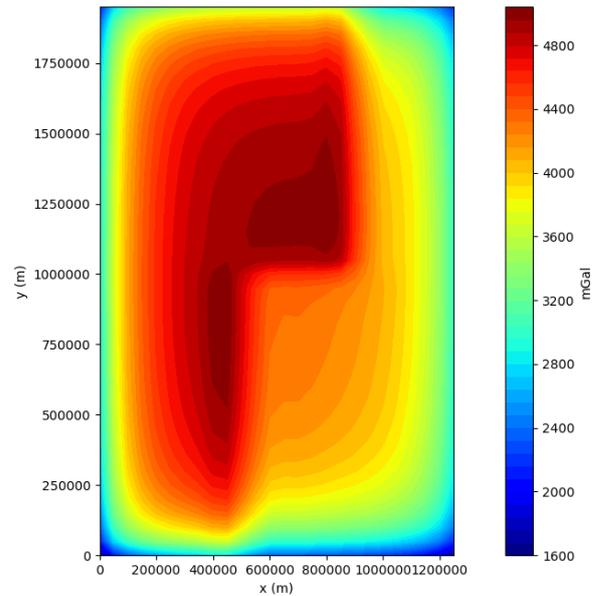
Implementasi model geologi subduksi diperlukan untuk menguji kemampuan aplikasi ini dalam mendelineasi zona subduksi dan sobekan lempeng subduksi dari hasil perhitungan respons anomali yang diperoleh. Respons anomali akan dihitung pada permukaan datar horizontal elevasi ($z = 0$) dengan luasan sebesar (1300×2000) Km dan luas *grid* sebesar 50 Km, sehingga jumlah titik pengukuran sebanyak 6500 titik.

Komposisi model geologi yang akan digunakan dalam pengujian ini adalah *oceanic plate lithosphere* (3.29 g/cm^3), *oceanic asthenosphere* (3.35 g/cm^3), *subduction slab lithosphere* (3.38 g/cm^3), *continental crust* (2.8 g/cm^3), *continental lithosphere* (3.34 g/cm^3), dan *continental asthenosphere* (3.37 g/cm^3). Model dibuat melalui model penampang vertikal 2D sesuai lintasan *slice* (Gambar 4.23). Dimensi model sebesar $(1300$

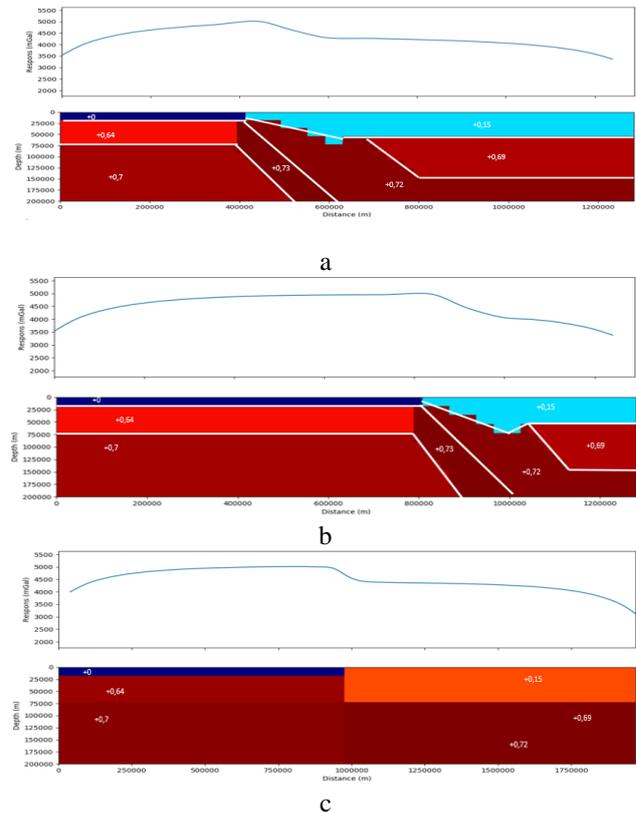
$\times 2000 \times 200)$ Km, dengan besar *grid* sebesar 20 Km sehingga memiliki sel kubik sejumlah 65000 buah.



Gambar 25 Model geologi subduksi.



Gambar 26 Respons anomali model geologi subduksi.

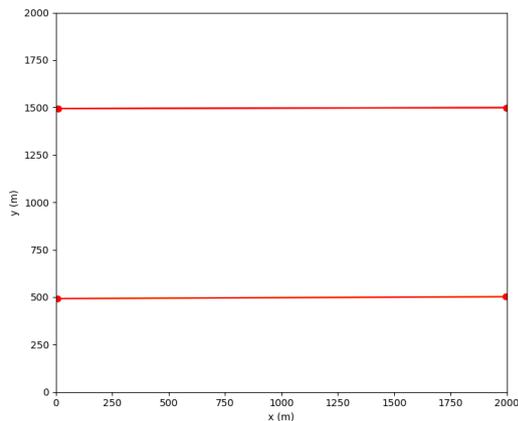


Gambar 27 penampang vertikal model geologi subduksi dan respons anomali. (a) penampang dengan orientasi W-E ($y = 500 \text{ Km}$), (b) penampang dengan orientasi W-E ($y = 1500 \text{ Km}$), dan (c) penampang dengan orientasi N-S ($x = 600 \text{ Km}$).

Penampang geologi 2D (Gambar 27 a dan b) digunakan untuk membuat model geologi 3D subduksi, penampang *slice* pertama (Gambar 27 a) memiliki titik subduksi di jarak 400 Km dan *slice* kedua (Gambar 27 a) di titik 800 Km, sehingga membuat model geologi (Gambar 4.24) memiliki sobekan lempeng di sekitar sumbu y sama dengan 100 Km.

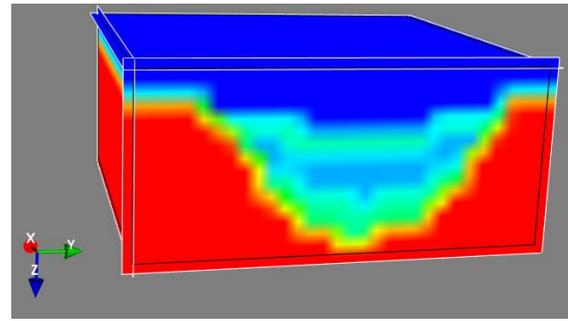
Hasil respons gaya berat (Gambar 26) memiliki respons maksimum 5000 mGal tersebar di bagian tengah titik pengukuran dan terdapat di daerah lempeng samudera. Kontras respons ini juga terlihat di Gambar 27 a dan b. Hal ini disebabkan oleh posisi *lithosphere* samudera berdensitas tinggi relatif dekat dengan permukaan titik pengukuran, sedangkan respons di daerah lempeng benua lebih rendah. Respons rendah ini akibat kerak benua dekat dengan titik pengukuran dan densitasnya lebih rendah. Melalui penyebab yang sama, respons gaya berat menunjukkan zona sobekan lempeng di penampang (Gambar 27 c), kontras respons dan model terdapat di jarak yang sama yaitu 900 Km.

1.4 Implementasi Model Geologi Akuifer



Gambar 28 *slice* untuk membuat model geologi akuifer.

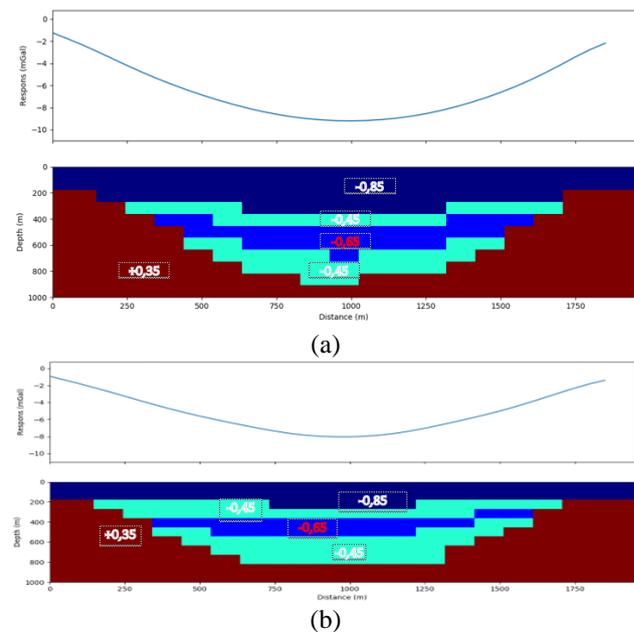
Pembuatan model dimulai dengan melakukan digitasi untuk *slice* penampang pada luasan area pemodelan. Gambar 28 merupakan digitasi *slice* untuk pemodelan geologi pengujian ini. Dua *slice* dibuat dengan arah barat – timur, *slice* pertama berada di sumbu $y = 500\text{m}$ dan *slice* kedua di sumbu $y = 1500\text{m}$.



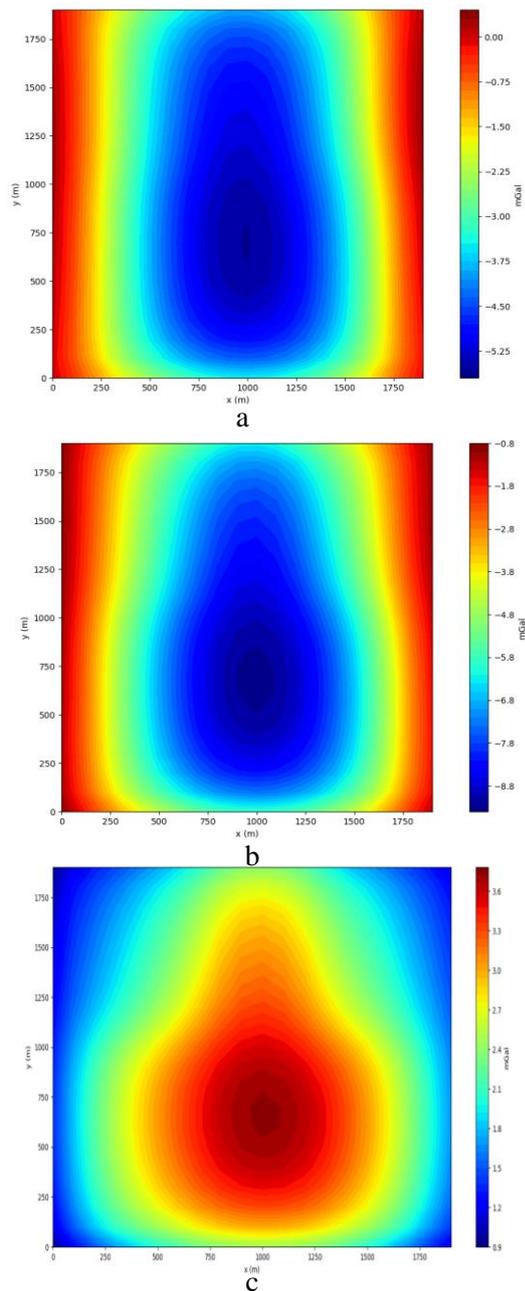
Gambar 29 model 3D akuifer pada cekungan dengan komposisi batuan pasir, lempung, dan batuan dasar *basalt*.

Model geologi pada gambar 29 memiliki komposisi sedimen pasir sebagai akuifer tidak tertekan (*unconfining layer*) di lapisan teratas kemudian batuan lempung sebagai lapisan *impermeable* (*confining layer*), batuan pasir sebagai akuifer tertekan, batuan lempung, dan batuan *basalt* sebagai *basement*. Batuan penyusun model memiliki *bulk density* berurutan 2.1 g/cm^3 , 2.3 g/cm^3 , 2.2 g/cm^3 , 2.3 g/cm^3 , dan 3 g/cm^3 serta memiliki porositas untuk batuan pasir 30% dan 25%, serta batuan lempung 40%. Model pada gambar 29 akan dihitung pada saat batuan akuifer terisi oleh air dan ketika tidak terisi air, nilai densitas saat akuifer tidak terisi air akan memiliki nilai densitas 1.84 g/cm^3 pada sedimen pasir dan 1.95 g/cm^3 untuk batuan pasir di bawah lapisan batuan lempung.

Model (gambar 29) memiliki dimensi $2000\text{m} \times 2000\text{m} \times 1000\text{m}$ disusun oleh *grid* kubus dengan ukuran $100 \text{ m} \times 100\text{m}$ sehingga memiliki jumlah kubus sebanyak 4000 kubus. Kubus tersebut diisi oleh nilai densitas berupa titik pusat massa. Densitas ini akan digunakan untuk perhitungan respons anomali pada model geologi.



Gambar 30 penampang dari *slice* model geologi 2D.



Gambar 31 respons anomali model geologi Gambar 29 (a) pada saat pori batuan penuh terisi air, (b) pada saat pori batuan tidak terisi air, dan (c) selisih antara respons a dan b.

Hasil respons dari kedua kondisi lapisan akuifer terisi oleh air dan tidak terisi air terlihat pada gambar 31. Respons anomali (gambar 31 a dan b) menunjukkan nilai anomali tinggi hingga rendah, nilai anomali tinggi digambarkan sebagai warna merah dan respons rendah berwarna biru. Distribusi respons anomali tinggi ada di sekitar sumbu x $500m < x < 1500m$, dan respons rendah tersebar di tepi model.

Dua respons anomali (gambar 31 a dan b) memiliki perbedaan nilai respons anomali, terlihat dari rentang nilai anomali minimum dan maksimum. Respons anomali saat kondisi lapisan akuifer terisi air (gambar 31 a) memiliki rentang nilai anomali sekitar 0 hingga -5,25 mGal. Sedangkan respons anomali saat kondisi lapisan akuifer tidak terisi air memiliki rentang nilai sekitar -0,8 hingga -

8,8 mGal. Perbedaan ini disebabkan perubahan nilai densitas batuan, nilai maksimum dari respons anomali meningkat saat lapisan batuan akuifer terisi air. Nilai respons (gambar 31 c) terdapat peningkatan akibat meningkatnya densitas di batuan sedimen bertambah ketika batuan pasir sebagai akuifer terisi oleh air. Peningkatan nilai respons tertinggi tersebar di bagian selatan, sebab pada bagian ini dimensi akuifer tak tertekan di dekat permukaan memiliki dimensi yang lebih besar.

Berdasarkan semua hasil respons gaya berat dari perhitungan model geologi yang diuji pada penelitian ini menunjukkan timbal balik baik. Hal ini ditunjukkan oleh respons anomali yang timbul sesuai dengan fitur model geologi, seperti kontras respons terjadi di daerah sobekan subduksi, selisih nilai respons akibat perubahan densitas pada lapisan batuan akuifer, penurunan respons di daerah lipatan sinklin, respons maksimum di daerah puncak lipatan antiklin, dan kontras respons terjadi di daerah struktur sesar. Setiap respons yang diperoleh menunjukkan adanya hubungan antara jarak lapisan batuan dengan titik pengukuran, batuan yang dekat dengan permukaan titik pengukuran memiliki kontribusi terhadap nilai respons yang tinggi dan berlaku sebaliknya. Respons-respons ini membuktikan aplikasi yang dibuat menggunakan model persamaan matematis Plouff (1976) mampu mendelineasi model geologi sederhana serta strukturnya.

V. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil pengujian aplikasi dan tujuan dari penelitian ini, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Pemodelan kedepan merupakan interpretasi secara tidak langsung menentukan model bawah permukaan melalui parameter fisis batuan mengikuti kondisi geologi. Metode gaya berat mengikuti Hukum Newton tentang gravitasi, benda yang memiliki massa akan mengalami gaya tarik menarik dengan benda benda bermassa lainnya. Massa benda atau batuan dapat diperoleh melalui volum dan densitas, sehingga parameter fisis untuk metode gaya berat adalah densitas batuan. Menghitung respons anomali sintetik metode gaya berat secara analitik dapat dilakukan menggunakan bentuk benda sederhana seperti kubus. Model kubus dapat digunakan untuk melakukan pemodelan geologi bawah permukaan lebih kompleks. Persamaan analitik yang digunakan untuk membuat aplikasi ini adalah persamaan Plouff (1976). Persamaan ini memiliki keunggulan dari segi kapabilitas, akurasi, dan efisiensi setelah melakukan pengujian pada model tunggal. Tahapan dalam pemodelan kedepan 3D metode gaya berat adalah membuat *grid* titik-titik pusat massa, digitasi permukaan untuk membuat penampang vertikal, *gridding* penampang vertikal, membuat penampang densitas vertikal (digitasi lapisan batuan), menentukan densitas pada semua titik-titik massa dari penampang densitas, dan menghitung respons anomali di permukaan titik pengukuran.
2. Implementasi aplikasi untuk menghitung respons anomali gaya berat untuk model geologi akuifer cekungan air tanah memperlihatkan persebaran nilai anomali yang cukup baik. Persebaran anomali

mengikuti orientasi dari tubuh batuan dalam model geologi. Perbedaan nilai densitas akibat berubahnya konten fluida dalam lapisan akuifer menghasilkan nilai respons anomali yang berbeda. Sehingga dapat disimpulkan bahwa aplikasi ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan konten fluida batuan akuifer dalam cekungan air tanah.

VI. Referensi

- [1] Abdallatif et al., 2009. *Groundwater Geophysics. A Tool for Hydrogeology*. 2nd Edition. In *Magnetic, geothermal and radioactive methods*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>, diakses pada 1 April 2020 7:00 WIB
- [2] Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic. In Program*. Cambridge: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- [3] EPA. 2016. *Ground Water Aquifers. Retrieved from the European Protection Agency*. <https://www.epa.gov/superfund/section-8-ground-water-aquifers>, diakses pada 1 April 2020 7:00 WIB
- [4] Griffiths, D. V., & Smith, I. M. 2006. Numerical Methods for Engineers. In *Numerical Methods for Engineers*. <https://doi.org/10.1201/9781420010244> diakses pada 31 Juli 2020 15.30 WIB
- [5] Gunawan, I., & Alawiyah, S. 2016. Simulasi Numerik untuk Menentukan Gaya Gravitasi Bawah Permukaan Pada Model Prisma Segi empat. *Indonesian Journal on Computing (Indo-JC)*, 1(2), 47. <https://doi.org/10.21108/indojc>. 2016.1.2.88 diakses pada 1 April 2020 7:00 WIB
- [6] IMNH. 2016. *What is an Aquifer? Retrieved from Idaho Museum of Natural History*. <http://imnh.isu.edu/digitalatlas/hydr/concepts/gwater/aquifer.htm> diakses pada 1 April 2020 7:00 WIB
- [7] Kadir, W. G. A., 2000, Eksplorasi Gaya berat & Magnetik, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB, Bandung.
- [8] Krasny J 1993 *Classification of Transmissivity Magnitude and Variation. Ground Water*, 31(2):230-236
- [9] Longman, I. M., 1959, *Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun*, Journal of Geophysical Research 64, halaman. 2351–2355.
- [10] Nagy. 1966. "The Gravitational Attraction Of A Right Rectangular Prism". *Geophysics*, Vol. 31, pp. 362-371.
- [11] Reynolds, M.R., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons, Inc Somerset, New Jersey, USA
- [12] X. Li, dan M. Chouteau, "Three-dimensional gravity modeling in all space." *Surveys in Geophysics*, 1998,19, 339-368.