

Interpretasi Bawah Permukaan Pulau Timor dengan Pemodelan 3D Berdasarkan Data Anomali Gravitasi

Selciana Aplonia Kanni Ginya¹, Jehunias L. Tanesib², H. L. Sianturi³

Jurusan Fisika, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia

Abstrak

Telah dilakukan interpretasi anomali medan gravitasi pulau Timor dengan pemodelan 3D untuk mengetahui batuan dasar pulau Timor. Data yang digunakan adalah anomali medan gravitasi udara bebas dan topografi Sandwell dan Smith yang telah direduksi terhadap model geopotensial bumi EGM2008. Koreksi data meliputi koreksi udara bebas, koreksi atmosfer, koreksi bouguer sederhana dan koreksi curvature. Data anomali bouguer lengkap dibawah ke atas bidang topografi dengan metode kontinuasi ke atas dengan ketinggian 25,9 km. Selanjutnya dilakukan pemodelan 3D dengan menggunakan program Grablox dan Bloxer. Hasil interpretasi kualitatif, diperoleh variasi anomali bouguer lengkap dari -160 mgal sampai 300 mgal. Nilai anomali positif lebih dari 0 mgal hingga sekitar 300 mgal. Anomali bernilai positif berada di hampir seluruh daratan pulau Timor dan sebagian di perairan laut Savu dan pulau-pulau di bagian utara pulau Timor serta di selatan perairan laut Timor yaitu setelah palung Timor, sedangkan anomali negatif kurang dari 0 mgal hingga sekitar -160 mgal berada di bagian selatan daratan Timor hingga perairan laut Timor dan sebagian besar laut Savu. Hasil interpretasi kuantitatif pada model 3D, tiap perlapisan didapatkan beberapa lapisan batuan di bawah permukaan yaitu batuan dolomit, granulit, sienit, dan batu sabak. Interpretasi data anomali gravitasi regional dan pemodelan 3D, diduga bahwa batuan dasar pulau Timor adalah batu sabak (slate) yaitu batuan metamorf yang terdapat pada kedalaman sekitar 3 km sampai 30 km.

Masuk:

17 Februari 2021

Diterima:

09 Maret 2021

Diterbitkan:

19 Maret 2021

Kata kunci:

Gravitasi, anomali bouguer lengkap, kontinuasi ke atas, pemodelan tiga dimensi, inversi.

1. Pendahuluan

Pulau Timor merupakan salah satu pulau besar di Nusa Tenggara Timur selain Flores dan Sumba. Pulau Timor diduga berada di atas pertemuan antara lempeng Eurasia dan lempeng Indo Australia. Pulau Timor terbagi menjadi dua bagian mengikuti sumbu pulau yaitu sebagian besar pada sisi selatan termasuk dalam kerak benua Australia (*continental crust*), sedangkan pada bagian utara berada di atas kerak samudera (*oceanic crust*) yang termasuk dalam lempeng Eurasia [1]. Pulau Timor sangat berbeda dengan pulau-pulau di dalam busur Sunda. Perbedaan terjadi secara luas antara lain batuan, kedalaman sedimen laut, batuan metamorf dan fasies lain yang terangkat bersama-sama pada suatu kawasan dataran luas sebagai *melange*. Secara geologi pulau Timor didominasi oleh batuan gamping (*limestone*) dan lempung (*soft scaly clay*). Batuan fosil tertua yang ditemukan berumur *Permian* [2].

Geofisika adalah ilmu yang mempelajari tentang bumi dengan menggunakan parameter-parameter fisika. Dalam hal ini yang menjadi target adalah bumi bawah permukaan. Parameter-parameter fisika yang digunakan adalah parameter mekanika yang meliputi metode seismik, gravitasi dan magnetik. Metode gravitasi (*gravity*) merupakan salah satu metode geofisika yang didasarkan pada variasi medan gravitasi di permukaan bumi. Distribusi massa jenis yang tidak homogen pada batuan penyusun kerak bumi akan memberikan variasi harga medan gravitasi [3]. Variasi harga medan gravitasi di permukaan bumi tidak hanya disebabkan oleh distribusi massa jenis yang tidak merata, tetapi disebabkan juga oleh posisi titik amat di permukaan bumi yang dikarenakan oleh bentuk bumi yang tidak bulat sempurna dan relief bumi yang beragam. Dengan menggunakan metode gravitasi dapat diketahui besar anomali gravitasi dan dari besar anomali gravitasi tersebut dapat diperkirakan struktur geometri di bawah permukaan bumi [4].

Penelitian dengan metode gravitasi pernah dilakukan oleh [5] di daratan pulau Timor bagian barat dan [6] di pulau Timor dan sekitarnya. Tanesib membuat pemodelan pulau Timor secara 2 dimensi (2D) sedangkan Simamora dan Untung melakukan interpretasi secara kuantitatif mengenai batuan dasar pulau Timor tanpa melakukan pemodelan dan diduga batuan dasar (*basement rock*) pulau Timor adalah batuan metamorf. Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui batuan dasar pulau Timor dengan pemodelan 3D berdasarkan data anomali gravitasi.

2. Metode Penelitian

2.1. Rencana Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan target daerah penelitian meliputi pulau Timor. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data anomali gravitasi udara bebas dan data topografi. Dari data yang diperoleh akan dilakukan beberapa koreksi yaitu koreksi atmosfer, koreksi bouguer sederhana, dan koreksi curvature. Setelah dilakukan pengkoreksian terhadap data gravitasi, kemudian dilakukan transformasi koordinat geografis dari derajat ke UTM (*Universal Transverse Mercator*) dengan bantuan program *Surfer*. Setelah dilakukan transformasi, tahap selanjutnya adalah pemisahan anomali lokal dan anomali regional dengan menggunakan metode kontinuitas ke atas (*Upward Continuation*). Selanjutnya akan dipilih anomali regional, kemudian dilakukan pemodelan 3 Dimensi yang kemudian akan diinterpretasikan.

2.2. Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Sandwell dan Smith (2009) yaitu berupa data gravitasi dan data topografi pulau Timor yang diunduh dari http://topex.ucsd.edu/www.htm/mar_grav.html. Data Sandwell dan Smith berupa data anomali gravitasi udara bebas (*gravity free air*) dan data topografi. Data anomali udara bebas diperoleh dari pengukuran yang dilakukan oleh satelit altimeter ERS-1 dan Geosat/GM dan data topografi merupakan hasil pengukuran radar altimeter presisi tinggi yaitu Geosat, ERS-1, Topex, ERS-2, GFO, Jason 1 2001, ENVISAT 2002, dan Jason 2. Data dari Sandwell dan Smith terpapar dalam spasi 1 menit atau 1852 meter. Jumlah data yang diperoleh 31.863 titik data. Daerah penelitian secara geografis terletak pada posisi 8°18' - 10°25'LS (8,31 - 10,41) dan 123°15' - 127°21'BT (123,25 - 127,35). Data yang terukur oleh satelit adalah data tinggi orbit satelit di atas permukaan laut atau geoid. Selanjutnya dari data tersebut dihitung anomali medan gravitasi.

2.3. Pengolahan Data

Data anomali gravitasi udara bebas Sandwell dan Smith merupakan data yang dihasilkan dari proses pemindahan medan gravitasi normal di referensi sferoida menjadi medan gravitasi normal di permukaan. Koreksi udara bebas tidak memperhitungkan massa yang terletak di antara referensi sferoida dan permukaan topografi, padahal massa ini sangat mempengaruhi nilai anomali medan gravitasi. Untuk itu perlu dilakukan pengolahan data dengan memperhatikan massa yang terletak antara referensi sferoida dan permukaan topografi. Pengolahan data pada penelitian ini meliputi beberapa bagian, antara lain [7]:

1. Koreksi atmosfer

Pengolahan data pada koreksi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta g_{atm}(x, y, z) = \Delta g_{fa}(x, y, z) + g_{atm}(x, y, z) \quad (1)$$

Dengan nilai $g_{atm}(x, y, z) = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2$.

Data masukan untuk persamaan ini adalah data ketinggian topografi h yang diperoleh bersama-sama dengan data anomali udara bebas.

2. Koreksi topografi

Koreksi topografi memperhitungkan nilai massa yang terletak diantara referensi sferoida dan permukaan topografi.

Koreksi topografi dibagi menjadi tiga bagian yaitu:

a) Koreksi *bouguer* sederhana

Persamaan yang digunakan untuk koreksi ini adalah:

$$g_{BS} = 2\pi\rho_B G h \cdot 10^5 mgal \quad (2)$$

Data masukan adalah data ketinggian topografi h dan data densitas bouguer. Densitas bouguer ρ_B pada penelitian ini dipilih densitas rata-rata kerak bumi 2,67 gr/cm³. Ketinggian h adalah titik data yang diperoleh bersama-sama

dengan data anomali gravitasi udara bebas. Konstanta nilai $G = 6,67428 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gs}^2$ dan $\pi = 3,141592654$. Untuk menentukan anomali gravitasi bouguer sederhana dapat diolah dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta g_{BS}(x, y, z) = \Delta g_{atm}(x, y, z) + g_{BS}(x, y, z) \quad (3)$$

Dengan Δg_{BS} adalah anomali gravitasi bouguer sederhana dan Δg_{atm} merupakan anomali gravitasi atmosfer.

b) Koreksi *curvature*

Data masukan pada koreksi *curvature* adalah data densitas *bouguer* (ρ_B), data ketinggian h , konstanta gravitasi bumi $G = 6,67428 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gs}^2$, $\pi = 3,141592654$, dan radius kelengkungan 166,735 km. Koreksi *curvature* menggunakan persamaan Whitman (1991) yaitu :

$$g_c = 2\pi\rho G \left\{ \frac{\alpha}{2} - H \left[1 + \frac{1}{2\alpha} \right] \right\} \quad (4)$$

dengan H adalah rasio h terhadap R (dengan $R = R_0 + h$ dan R_0 merupakan radius bumi normal sampai referensi sferoida), α adalah sudut kelengkungan, dan 2α merupakan sudut dari pusat bumi.

Dengan:

$$\alpha = \frac{166,735}{6371} \text{ rad}$$

$$R = 6371000 + h$$

Untuk menentukan nilai anomali gravitasi *curvature* dapat menggunakan persamaan:

$$\Delta g_c(x, y, z) = \Delta g_{BS}(x, y, z) + g_c(x, y, z) \quad (5)$$

Dengan Δg_{BS} adalah anomali gravitasi bouguer sederhana dan Δg_c merupakan anomali gravitasi *curvature*.

3. Transformasi koordinat dari derajat ke UTM (*Universal Transverse Mercator*)

Anomali bouguer lengkap merupakan harga anomali di suatu tempat yang terukur di permukaan bumi yang diperoleh melalui perhitungan dengan melibatkan seluruh faktor koreksi. Data anomali bouguer lengkap yang diperoleh masih berada dalam koordinat geografis dengan satuan derajat sehingga perlu ditransformasi ke *Universal Transverse Mercator* (UTM) dalam satuan meter agar lebih mudah diinterpretasi.

4. Kontinuasi ke atas

Untuk menghilangkan efek lokal agar pemodelan lebih mudah dilakukan maka perlu dilakukan proses kontinuasi ke atas. Dengan melakukan kontinuasi ke atas akan diperoleh anomali regional dan anomali residual, kemudian akan dipilih anomali regional untuk pemodelan dan interpretasi. Proses ini dilakukan secara bertahap hingga memperoleh kontur yang relatif stabil dengan menggunakan program *Magpick*. Pengangkatan dilakukan pada ketinggian 3,70 km, 7,40 km, 11,11 km, 14,81 km, 18,52 km, 22,22 km, 25,92 km dan 29,63 km. Dari hasil pengangkatan ini kemudian akan dipilih anomali gravitasi pada ketinggian 25,9 km untuk dilakukan pengolahan selanjutnya yaitu pemodelan.

5. Pemodelan tiga dimensi (3D)

Setelah melakukan pengolahan data, tahap selanjutnya dari penelitian ini adalah memodelkan geometri batuan dasar (*basement rock*) pulau Timor dengan menggunakan pemodelan 3D. Pemodelan ini menggunakan proses inversi yaitu suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan. Dalam proses inversi dilakukan analisis terhadap data lapangan dengan cara melakukan pencocokan kurva antara model matematika dan data lapangan. Jika kurva yang dihasilkan sudah menunjukkan korelasi yaitu dengan *error* yang kecil maka pemodelan yang dihasilkan tersebut yang akan diinterpretasikan [8].

Proses pemodelan dilakukan dengan bantuan program *Grablog versi 1.6e* dan *Bloxer 1.6e*. Dalam pemodelan ini dilakukan tiga tahapan, yaitu [9]:

- *Base* : inversi awal berbasis SVD dari respon awal (titik acuan)
- Densitas : inversi terhadap nilai densitas berbasis SVD.
- Ketinggian : inversi terhadap ketinggian blok.

6. Interpretasi

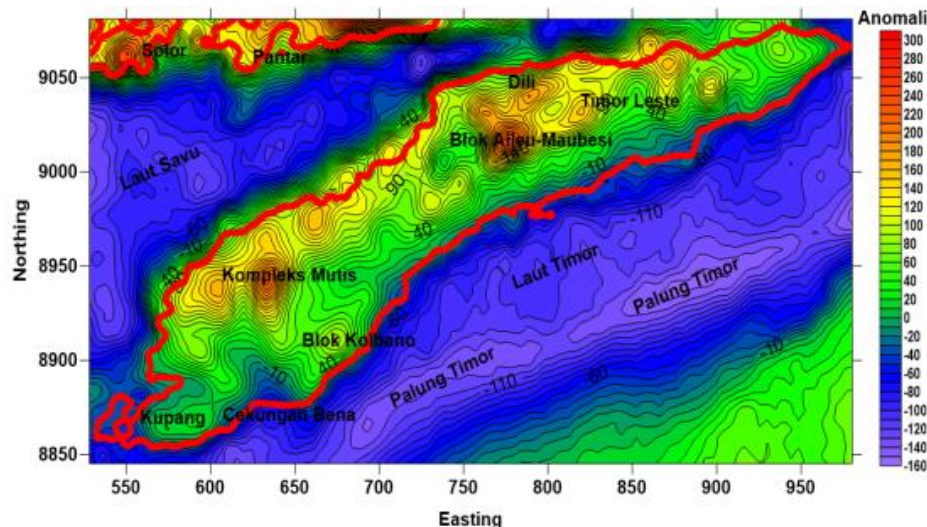
Interpretasi kondisi bawah permukaan dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi secara kualitatif dilakukan dengan melihat secara langsung peta kontur anomali bouguer lengkap sebelum dan sesudah dikontinuasi. Anomali tersebut akan memberikan hasil interpretasi secara umum yang hanya menafsirkan pengaruh anomali tetapi

tidak sampai mendapatkan besaran kuantitatif. Interpretasi kuantitatif dilakukan dengan pemodelan inversi yaitu mencari nilai anomali sintetis dan mencocokkannya dengan kurva anomali lapangan untuk memperoleh model bawah permukaan [10].

3. Hasil dan Pembahasan

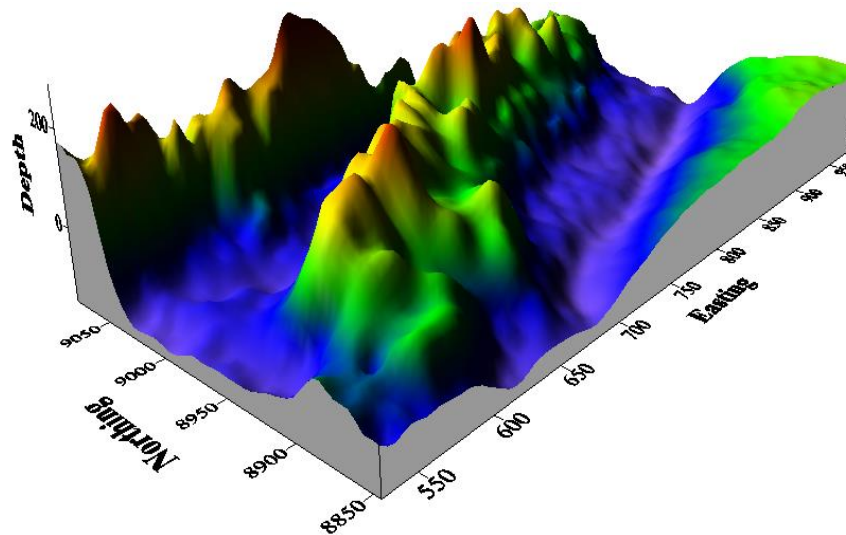
3.1 Interpretasi Kualitatif

Data anomali yang dihasilkan dengan mengolah data yang diperoleh dari data sekunder Sandwell dan Smith dilakukan dengan perhitungan analitik sehingga diperoleh data anomali bouguer lengkap yang kemudian ditampilkan dalam peta kontur (Gambar 1).



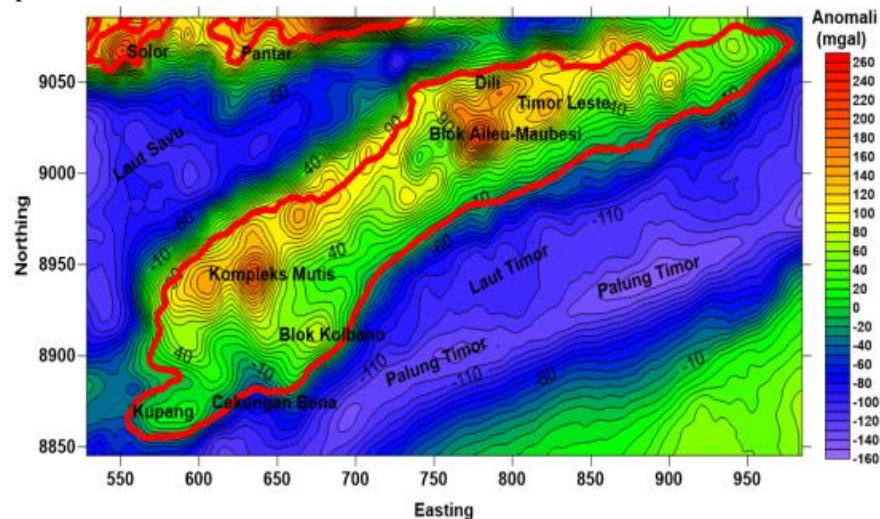
Gambar 1. Peta kontur anomali bouguer lengkap pulau Timor dengan interval kontur 10 mgal

Peta kontur anomali bouguer lengkap dengan koreksi densitas bouguer memiliki nilai yang berkisar antara -160 mgal sampai dengan 300 mgal. Perbedaan nilai anomali gravitasi yang berbeda-beda dipengaruhi oleh distribusi rapat massa batuan penyusunnya [11]. Anomali bouguer positif penyebarannya berada di hampir seluruh daratan pulau Timor dan sebagian perairan utara pulau yaitu laut Savu dan pulau-pulau di utara pulau Timor serta berada di selatan perairan laut Timor yaitu setelah palung Timor. Anomali positif mencerminkan densitas massa bawah permukaan yang relatif lebih besar daripada densitas sekitarnya. Nilai anomali positif lebih dari 0 mgal hingga sekitar 300 mgal. Anomali negatif berada di bagian selatan daratan Timor hingga perairan laut Timor dan sebagian besar laut Savu. Anomali negatif mencerminkan densitas massa bawah permukaan yang relatif lebih rendah daripada densitas sekitarnya. Nilai anomali negatif kurang dari 0 mgal hingga sekitar -160 mgal. Penyebaran kedua anomali tersebut lebih jelas terlihat pada peta kontur anomali bouguer lengkap yang divisualisasikan dalam kontur tiga dimensi (Gambar 2). Pada peta kontur anomali gravitasi 3D, anomali tinggi ditandai dengan adanya undukan, semakin tinggi undukan semakin tinggi nilai anomali gravitasinya. Sedangkan anomali rendah ditandai dengan adanya cekungan, semakin dalam cekungan semakin rendah anomalnya.



Gambar 2. Peta anomali gravitasi bouguer lengkap 3D

Hasil kontinuitas ke atas yang telah dilakukan setinggi 25,9 km (Gambar 3) karena pola kontur yang terlihat mulai stabil dan apabila dilakukan kontinuitas ke atas dengan variasi ketinggian berikutnya maka pola kontur yang dihasilkan relatif sama dengan pola kontur pada kontinuitas 25,9 km.

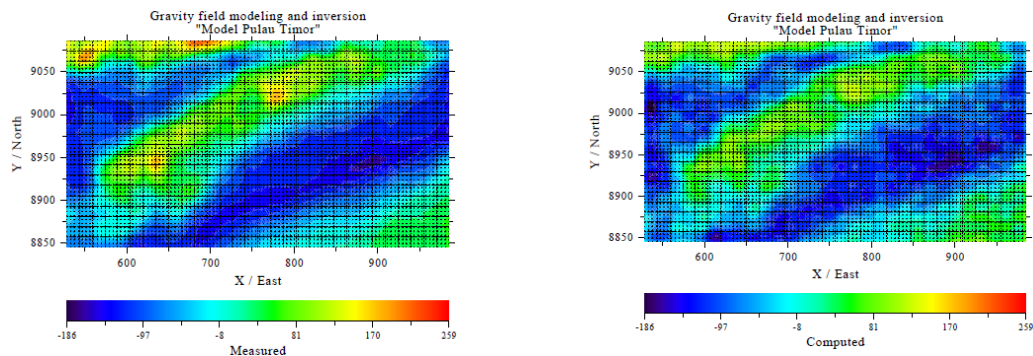


Gambar 3. Peta kontur anomali bouguer lengkap yang dikontinuasi ke atas pada ketinggian 25,9 km di atas topografi pulau Timor dengan interval kontur 10 mgal

Nilai anomali regional bouguer lengkap pada gambar di atas berada pada kisaran -160 mgal sampai 260 mgal. Hal ini menunjukkan bahwa batuan penyusun struktur dalam memiliki nilai kontras densitas yang bervariasi dari positif hingga negatif. Anomali paling tinggi berada di kompleks Mutis dan blok Aileu-Maubesi di Timor bagian Timur. Anomali tinggi pada daerah ini diduga terjadi akibat batuan intrusi di bawah permukaan atau kemungkinan disebabkan oleh material hasil erupsi magma yang memiliki densitas yang lebih tinggi. Sedangkan anomali rendah sebagian besar berada di perairan laut Savu dan laut Timor.

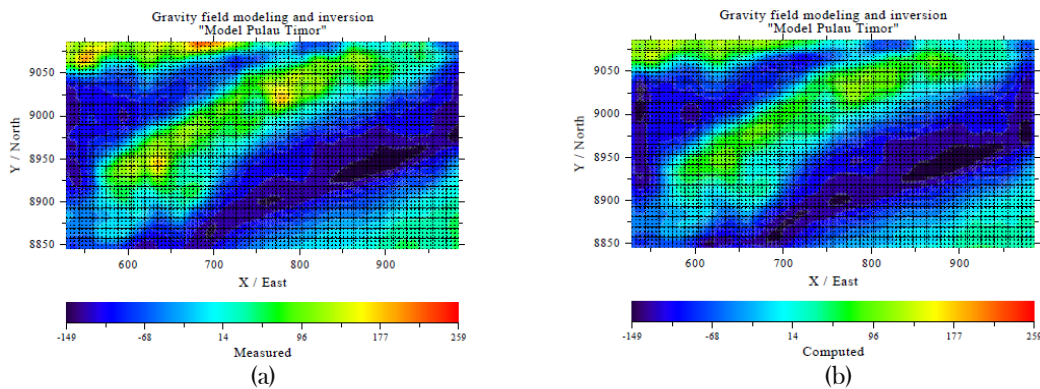
Inversi *base* dilakukan untuk meminimalkan ketidakcocokan data dari anomali positif dan anomali negatif. Hasil inversi ini memberikan nilai RMS (*Root Mean Square*) error data sebesar 0,06. Hasil inversi *base* pengukuran yang ditunjukkan pada Gambar 4a, terlihat bahwa di bagian utara dan selatan pulau, nilai anomalnya rendah yang ditunjukkan dengan skala warna biru tua sampai biru muda. Anomali sedang ditunjukkan dengan skala warna hijau yang menyebar hampir merata pada bagian daratan dan selatan laut Timor (setelah palung Timor). Sedangkan anomali tinggi ditunjukkan

dengan skala warna kuning hingga merah seperti pada peta (Gambar 4). Sedangkan dari hasil perhitungan pada Gambar 4b, peta kontur yang dihasilkan memperlihatkan pola yang hampir sama dengan kontur hasil pengukuran.

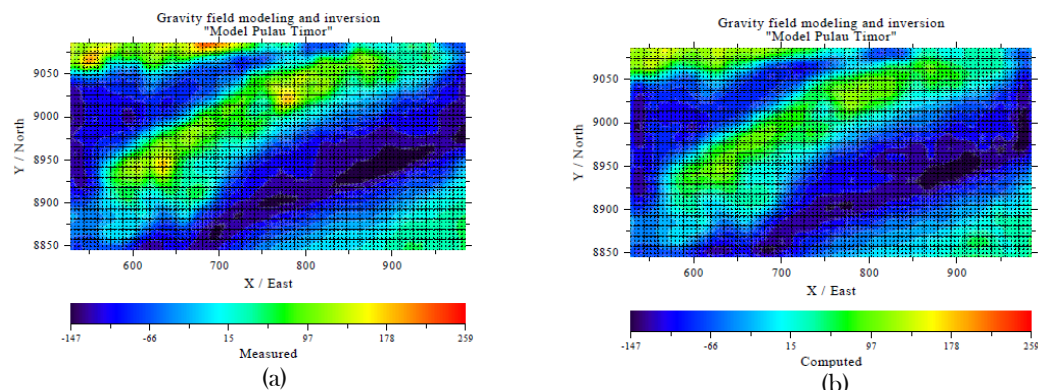


Gambar 4. (a) Peta kontur inversi *base a*) pengukuran, (b) perhitungan

Tujuan dari inversi densitas adalah untuk mengetahui variasi kepadatan *absolute* atau relatif di bawah daerah penelitian dimana medan gravitasi telah diukur. Dari hasil inversi densitas ini diperoleh nilai *RMS error* data sebesar 0,042. Gambar 5a merupakan peta kontur dari inversi densitas hasil pengukuran, nilai anomali tinggi ditunjukkan dengan skala warna kuning hingga merah, anomali sedang ditunjukkan dengan warna hijau, sedangkan anomali rendah ditunjukkan dengan skala warna biru tua sampai biru muda. Dari hasil perhitungan (Gambar 5b) menunjukkan pola kontur yang hampir sama dengan hasil pengukuran.



Gambar 5. Peta kontur inversi densitas a) pengukuran, (b) perhitungan



Gambar 6. Peta kontur inversi ketinggian a) pengukuran, (b) perhitungan

Inversi ini nilai ketinggian blok dibatasi oleh ketinggian blok itu sendiri dan blok yang di bawahnya, karena perubahan ketinggian (tingkat kedalaman) dari satu blok mempengaruhi ketinggian (tingkat kedalaman) blok di atasnya. Pada hasil inversi ini *RMS error* data yang diperoleh semakin kecil yaitu 0,039. Pola kontur yang dihasilkan dari hasil pengukuran

(Gambar 6a) menunjukkan nilai anomali tinggi dengan skala warna kuning hingga merah, anomali sedang dengan skala warna hijau, dan anomali kecil dengan skala warna biru tua sampai biru muda. Dari hasil perhitungan (Gambar 6b) mulai memperlihatkan anomali tinggi yang skala warnanya mulai mendekati skala warna pada hasil pengukuran.

Setelah dilakukan proses inversi terhadap ketiga parameter di atas akan diperoleh model blok 3D struktur kerak daerah penelitian berupa kontur, penampang dalam arah x dan y serta lapisan tiap kedalaman dalam arah z sesuai dengan model awal yang dibuat. Model blok yang diperoleh menggunakan *Grablox* selanjutnya diedit menggunakan *Bloxer* sehingga diperoleh tampilan model blok 3D yang lebih jelas. Model blok 3D dalam arah z untuk tiap lapisan dapat dilihat pada Gambar 7 sampai Gambar 17.

Secara keseluruhan, model blok 3D dalam arah z pada tiap lapisan kedalaman dari lapisan pertama hingga lapisan terakhir pada *Grablox* memiliki variasi densitas yang berkisar antara 1,90 gram/cm³ hingga 2,90 gram/cm³. Variasi densitas ini ditunjukkan oleh nilai densitas pada blok minor dan skala warna pada masing-masing lapisan. Selain variasi densitas, model blok 3D yang dibuat memperlihatkan juga adanya variasi kedalaman dan ketinggian blok minor. Adanya variasi densitas pada model blok 3D menunjukkan bahwa material penyusun struktur bawah permukaan daerah penelitian memiliki densitas yang bervariasi pada tiap lapisannya, sedangkan variasi ketinggian dan kedalaman blok menunjukkan bahwa ketebalan material penyusun struktur bawah permukaan daerah penelitian memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda-beda.

3.2 Interpretasi Kuantitatif

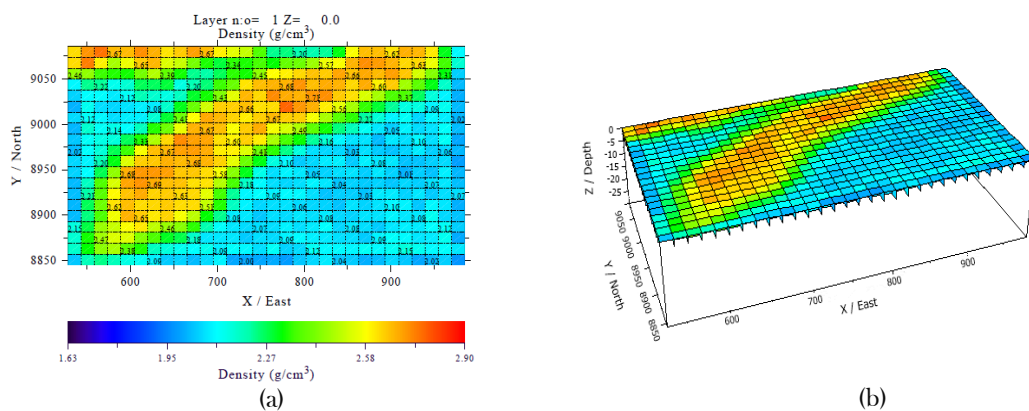
Interpretasi kuantitatif dilakukan dengan pemodelan inversi yaitu mencari nilai anomali sintetik dan mencocokkannya dengan kurva anomali lapangan dan tabel referensi densitas batuan untuk memperoleh model bawah permukaan. Berikut adalah tabel referensi densitas batuan menurut [12].

Tabel 1. Tabel referensi densitas batuan

Rock type	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)
Sediment (wet)		
Overburden		1,92
Soil	1,2 - 2,4	1,92
Clay	1,63 - 2,6	2,21
Gravel	1,7 - 2,4	2,0
Sand	1,7 - 2,3	2,0
Sandstone	1,61 - 2,76	2,35
Shale	1,77 - 3,2	2,40
Limestone	1,93 - 2,90	2,55
Dolomite	2,28 - 2,90	2,70
Sedimentary rocks (av.)		2,50
Igneous rocks		
Rhyolite	2,35 - 2,70	2,52
Andesite	2,4 - 2,8	2,61
Granite	2,50 - 2,81	2,64
Granodiorite	2,67 - 2,79	2,73
Porphyry	2,60 - 2,89	2,74
Quartz diorite	2,62 - 2,96	2,79
Diorite	2,72 - 2,99	2,85
Lavas	2,80 - 3,00	2,90
Diabase	2,50 - 3,20	2,91
Basalt	2,70 - 3,30	2,99
Gabbro	2,70 - 3,50	3,03
Peridotite	2,78 - 3,37	3,15
Acid igneous	2,30 - 3,11	2,61
Basic igneous	2,09 - 3,17	2,79
Metamorphic rocks		
Quartzite	2,5 - 2,70	2,60

Metamorphic rocks		
Schists	2,39 - 2,9	2,64
Graywacke	2,6 - 2,7	2,65
Marble	2,6 - 2,9	2,75
Serpentine	2,4 - 3,10	2,78
Slate	2,7 - 2,9	2,79
Gneiss	2,59 - 3,0	2,80
Amphibolite	2,90 - 3,04	2,96
Eclogite	3,2 - 3,54	3,37
Metamorphic	2,4 - 3,1	2,74

Model lapisan pertama (Gambar 7) dengan kedalaman 0 km hingga 2,8 km mempunyai densitas yang bervariasi dari 2,0 g/cm³ hingga 2,71 g/cm³. Hasil pemodelan pada lapisan ini memperlihatkan adanya batuan sedimen, batuan beku dan batuan metamorf.



Gambar 7. Model lapisan pertama pada kedalaman 0,0 km hingga 2,8 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

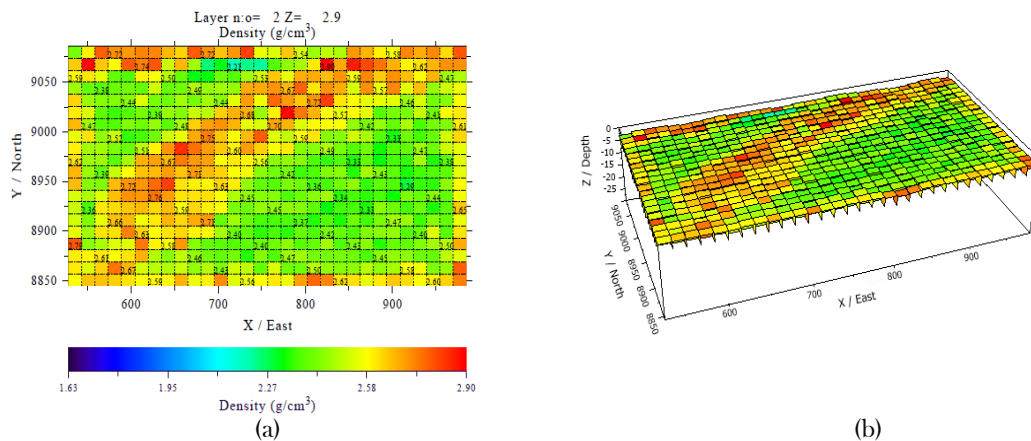
Informasi model lapisan pertama dapat dilihat pada Tabel 2:

Tabel 2. Model lapisan pertama pada kedalaman 0,0 km - 2,8 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm ³)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan pertama	2,00 g/cm ³ - 2,22 g/cm ³	Batuan gamping	Batu gamping pada lapisan ini berada pada perairan laut Timor dan laut Savu.
	2,31 g/cm ³ - 2,49 g/cm ³	Batuan dolomit	Batuan ini berada disekitar pesisir pantai dan sedikit menyebar ke perairan
	2,51 g/cm ³ - 2,62 g/cm ³	Batuan granit	Batuan granit, sienit dan filit tersebar di seluruh daratan pulau Timor.
	2,63 g/cm ³ - 2,67 g/cm ³	Batuan sienit	
	2,68 g/cm ³ - 2,71	Batuan filit (phylite).	

Batu gamping (limestone) merupakan batuan sedimen kimia yang terbanyak. Batuan ini disusun terutama oleh mineral kalsit dan dapat dibentuk baik oleh proses anorganik maupun organik. Pada umumnya batu gamping dibentuk oleh material yang berasal dari bahan organik, termasuk yang terdiri dari cangkang binatang laut. Komposisi cangkang ini terdiri dari mineral kalsit yang diambil dari larutan air laut, tempat hidupnya. Setelah binatangnya mati, sejumlah cangkang akan terakumulasi di laut atau laut dangkal, tersemen oleh kalsit, silika atau material lain dan lalu mengendap. Di dalam batu gamping sering mengalami pengotoran (impurity) menjadikan batu gamping tersebut berwarna abu-abu atau coklat. Jika kalsit bereaksi dengan larutan magnesium karbonat dalam air laut atau air tanah akan berubah menjadi dolomit. Batuan granit terbentuk dari hasil pembekuan magma berkomposisi asam yang membeku di dalam dapur magma sehingga batu

ini merupakan jenis batuan beku dalam. Batuan filit (phylite) berkaitan dengan perkembangan aktivitas metamorfik yaitu baliknya temperatur atau bertambah besarnya rekristalisasi maka slate (batu sabak) berubah menjadi filit.

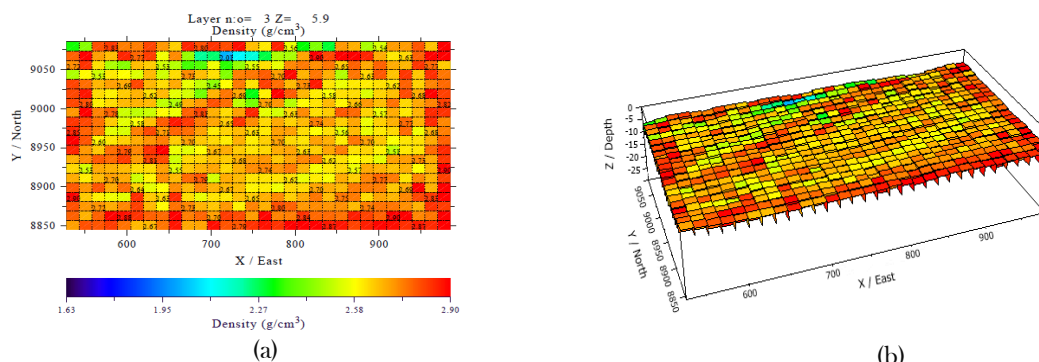


Gambar 8. Model lapisan kedua pada kedalaman 2,9 km hingga 5,8 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Model lapisan kedua (Gambar 8) dengan kedalaman 2,9 km hingga 5,8 km mempunyai densitas yang bervariasi dari 2,21 g/cm³ hingga 2,90 g/cm³. Berikut adalah informasi model lapisan kedua (Tabel 3):

Tabel 3. Model lapisan kedua pada kedalaman 2,9 km - 5,8 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm ³)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan kedua	2,21 g/cm ³	Batuan lempung (clay)	Pada lapisan ini hanya terdapat sedikit batu lempung yaitu berada dekat dengan pulau Pantar.
	2,29 g/cm ³ - 2,51 g/cm ³	Batuan dolomit	Batuan ini tersebar di laut Savu dan laut Timor
	2,52 g/cm ³ - 2,62 g/cm ³	Batuan granulit	<ul style="list-style-type: none"> - Batuan granulit tersebar di daratan pulau dan sebagian wilayah perairan - Batuan sienit dan batuan sabak (slate) terdapat sedikit di perairan dan tersebar di daratan pulau.
	2,63 g/cm ³ - 2,68 g/cm ³	Batuan sienit	
	2,70 g/cm ³ - 2,90 g/cm ³	Batuan slate (batu sabak)	



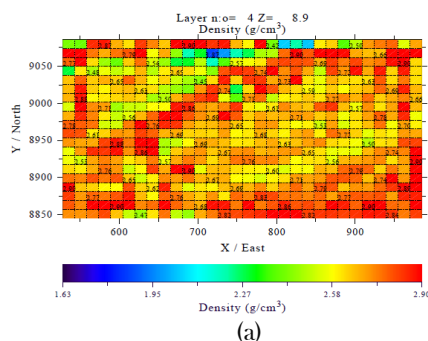
Gambar 9. Model lapisan ketiga pada kedalaman 5,9 km hingga 8,8 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Model lapisan ketiga (Gambar 9) dengan kedalaman 5,9 km hingga 8,8 km mempunyai densitas yang bervariasi dari 2,01 g/cm^3 hingga 2,90 g/cm^3 . Berikut adalah informasi model lapisan kedua (Tabel 4):

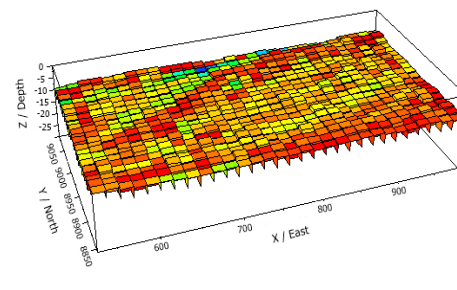
Tabel 4. Model lapisan ketiga pada kedalaman 5,9 km - 8,8 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm^3)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan ketiga	2,01 g/cm^3	Batu kapur (chalk)	Batuan ini hanya terdapat sedikit di laut Savu
	2,45 g/cm^3 - 2,54 g/cm^3	Batuan andesit	Batuan ini tersebar di perairan laut Savu hingga bagian utara pulau dan sebagian di laut Timor
	2,55 g/cm^3 - 2,62 g/cm^3	Batuan granulit	Batuan granulit, sienit, filit dan sabak tersebar hampir merata pada lapisan ini.
	2,63 g/cm^3 - 2,68 g/cm^3	Batuan sienit	
	2,69 g/cm^3 - 2,71 g/cm^3	Batuan filit	
	2,73 g/cm^3 - 2,90 g/cm^3	Batuan slate	

Batu kapur (chalk) merupakan batu gamping organik yang hampir seluruhnya disusun oleh cangkang foraminifera yaitu binatang bersel tunggal yang sangat halus. Batuan andesit berasal dari lelehan lava gunung merapi yang meletus (termasuk jenis batuan beku luar). Batuan ini terbentuk (membeku) ketika temperatur lava yang meleleh turun antara 900 sampai dengan 1100°C.



(a)



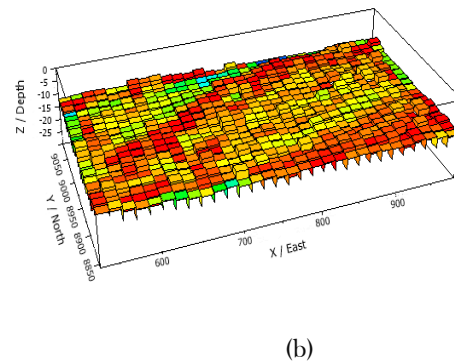
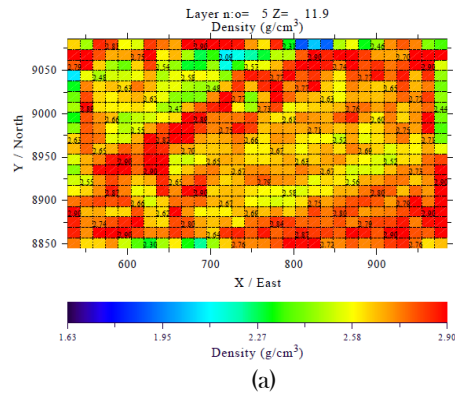
(b)

Gambar 10. Model lapisan keempat pada kedalaman 8,9 km hingga 11,8 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan keempat (Gambar 10) dapat dilihat pada Tabel 5:

Tabel 5. Model lapisan keempat pada kedalaman 8,9 km hingga 11,8 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm^3)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan keempat	1,87 g/cm^3	Batuan silt	Berada di laut Savu (dekat pulau Alor).
	2,42 g/cm^3 - 2,54 g/cm^3	Batuan andesit	Batuan ini tersebar di laut Savu dan sebagian di laut Timor
	2,56 g/cm^3 - 2,61 g/cm^3	Batuan granulit	Batuan granulit, sienit dan sabak tersebar secara acak pada lapisan ini.
	2,62 g/cm^3 - 2,69 g/cm^3	Batuan sienit	
	2,70 g/cm^3 - 2,90 g/cm^3	Batuan sabak (slate)	

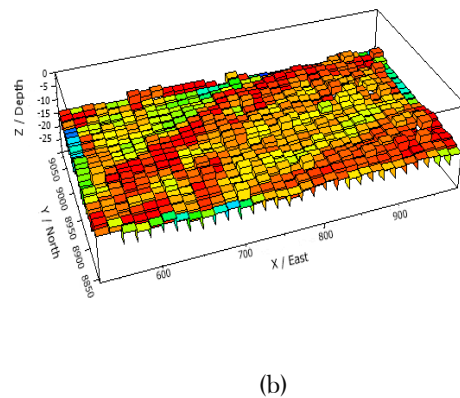
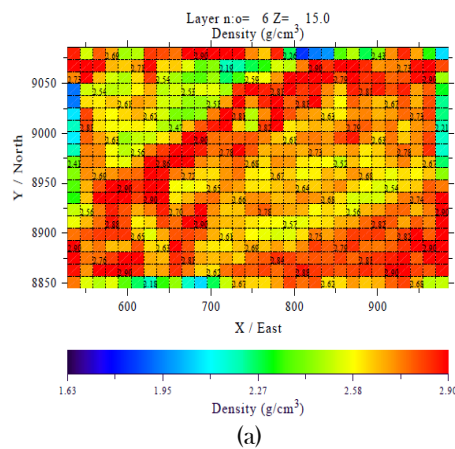


Gambar 11. Model lapisan kelima pada kedalaman 11,9 km hingga 14,9 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan kelima (Gambar 11) dapat dilihat pada Tabel 6:

Tabel 6. Model lapisan kelima pada kedalaman 11,9 km hingga 14,9 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm^3)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan kelima	$2,09 \text{ g/cm}^3$	Batuan gamping	Batu gamping ini tersebar di laut Savu, dekat dengan pulau Pantar
	$2,30 \text{ g/cm}^3 - 2,54 \text{ g/cm}^3$	Batuan dolomit	Batuan ini tersebar di wilayah perairan
	$2,55 \text{ g/cm}^3 - 2,62 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batuan ini tersebar di bagian selatan pulau hingga perairan laut Timor dan juga di laut Savu
	$2,63 \text{ g/cm}^3 - 2,69 \text{ g/cm}^3$	Batuan sienit	Batuhan sienit dan sabak tersebar di bagian tengah sampai utara pulau, sebagian laut Savu dan bagian selatan laut Timor.
	$2,70 \text{ g/cm}^3 - 2,90 \text{ g/cm}^3$	Batuan sabak (slate)	

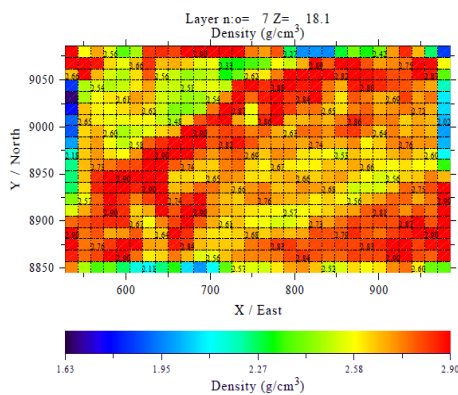


Gambar 12. Model lapisan keenam pada kedalaman 15 km hingga 18 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

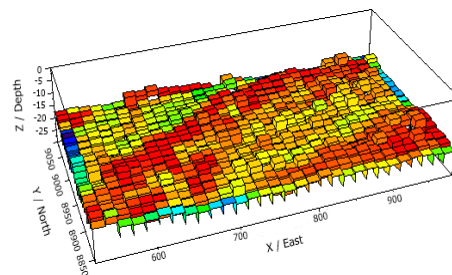
Informasi model lapisan keenam (Gambar 12) dapat dilihat pada Tabel 7:

Tabel 7. Model lapisan keenam pada kedalaman 15 km - 18 km

Model lapisan batuan	Densitas batuan (g/cm^3)	Pendugaan batuan	Keterangan
Lapisan keenam	$2,18 \text{ g/cm}^3 - 2,54 \text{ g/cm}^3$	Batuan halit	Batuan halit merupakan batuan sedimen yang terbentuk karena proses eksogen melalui pengeringan danau yang mengandung garam atau tempat lain yang mengandung air garam
	$2,56 \text{ g/cm}^3 - 2,63 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batuan ini tersebar di bagian selatan pulau hingga laut Timor dan sebagian laut Savu
	$2,64 \text{ g/cm}^3 - 2,69 \text{ g/cm}^3$	Batuan sienit	Batuan sienit dan batuan slate tersebar di daratan pulau, terdapat sedikit di laut Timor dan laut Savu, dan juga tersebar secara merata di bagian selatan laut Timor
	$2,70 \text{ g/cm}^3 - 2,90 \text{ g/cm}^3$	Batuan slate	



(a)



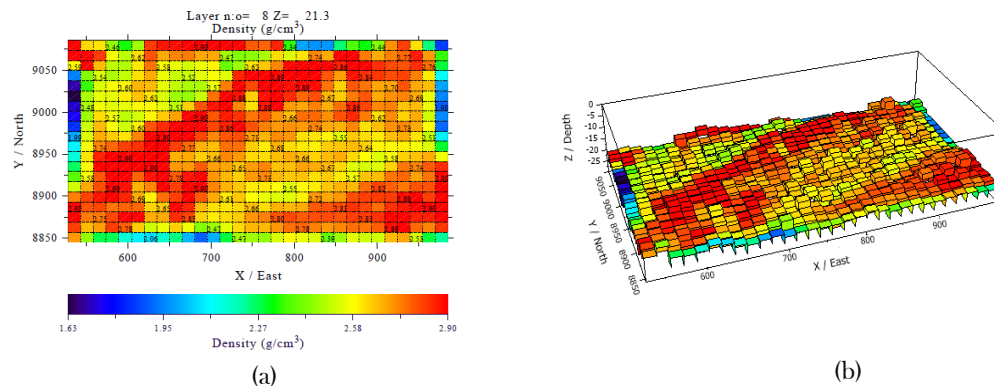
(b)

Gambar 13. Model lapisan ketujuh pada kedalaman 18,1 km hingga 21,2 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan ketujuh (Gambar 13) dapat dilihat pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8. Model lapisan ketujuh pada kedalaman 18,1 km - 21,2 km

Model lapisan batuan	Densitas batuan (g/cm^3)	Pendugaan batuan	Keterangan
Lapisan ketujuh	$2,02 \text{ g/cm}^3 - 2,18 \text{ g/cm}^3$	Batuan gamping batuan halit	Batuan gamping dan batuan halit tersebar di wilayah perairan
	$2,27 \text{ g/cm}^3 - 2,54 \text{ g/cm}^3$		
	$2,56 \text{ g/cm}^3 - 2,64 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batuan granulit ini terdapat sedikit di bagian daratan pulau, tetapi banyak terdapat di laut Timor dan sebagian laut Savu
	$2,65 \text{ g/cm}^3 - 2,69 \text{ g/cm}^3$	Batuan slate (batu sabak)	Batuan slate ini ersebar di bagian daratan pulau, terdapat sedikit di wilayah perairan dan tersebar secara merata di bagian selatan laut Timor.

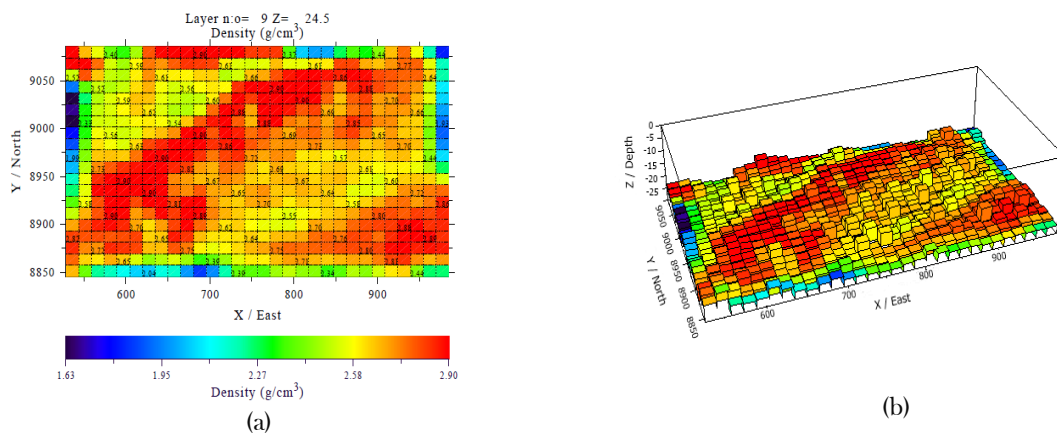


Gambar 14. Model lapisan kedelapan pada kedalaman 21,3 km hingga 24,4 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan kedelapan (Gambar 14) dapat dilihat pada Tabel 9:

Tabel 9. Model lapisan kedelapan pada kedalaman 21,3 km - 24,4 km

Model lapisan batuan	Densitas batuan (g/cm^3)	Pendugaan batuan	Keterangan
Lapisan kedelapan	$1,90 \text{ g/cm}^3 - 2,06 \text{ g/cm}^3$	Batuan silt	Batuan silt dan dolomit tersebar di wilayah perairan
	$2,34 \text{ g/cm}^3 - 2,54 \text{ g/cm}^3$	Batuan dolomit	
	$2,55 \text{ g/cm}^3 - 2,62 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batuan ini lebih banyak tersebar di laut Timor, sebagian daratan dan sebagian laut Savu.
	$2,64 \text{ g/cm}^3 - 2,68 \text{ g/cm}^3$	Batuan sienit	Batuan sienit dan batuan filit terdapat sedikit di laut Timor dan laut Savu
	$2,69 \text{ g/cm}^3 - 2,74 \text{ g/cm}^3$	Batuan filit	
	$2,75 \text{ g/cm}^3 - 2,90 \text{ g/cm}^3$	Batuan slate	Batuan slate tersebar di hampir seluruh pulau Timor, bagian selatan laut Timor dan pulau-pulau di utara pulau Timor.

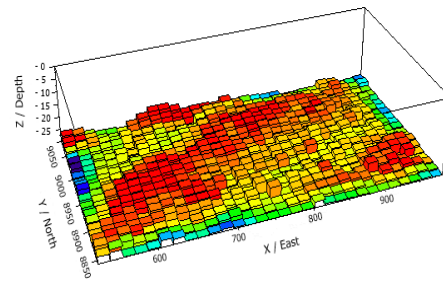
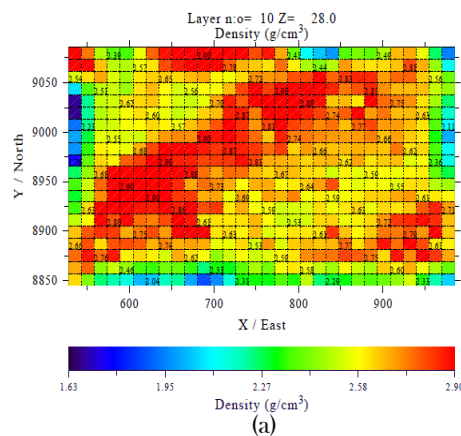


Gambar 15. Model lapisan kesembilan pada kedalaman 24,5 km hingga 27,9 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan kesembilan (Gambar 15) dapat dilihat pada Tabel 10:

Tabel 10. Model lapisan kesembilan pada kedalaman 24,5 km – 27,9 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm^3)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan kesembilan	$1,93 \text{ g/cm}^3 - 2,04 \text{ g/cm}^3$	Batuan gamping	Batuan gamping dan dolomit tersebar di wilayah perairan laut Savu dan laut Timor.
	$2,33 \text{ g/cm}^3 - 2,56 \text{ g/cm}^3$	Batuan dolomit	
	$2,57 \text{ g/cm}^3 - 2,62 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batuan ini hanya terdapat sedikit di daratan dan tersebar luas di wilayah perairan
	$2,64 \text{ g/cm}^3 - 2,69 \text{ g/cm}^3$	Batu sabak	Batu sabak menyebar di hampir seluruh daratan pulau hingga selatan palung Timor serta pulau-pulau di utara pulau Timor.



Gambar 16. Model lapisan kesepuluh pada kedalaman 28 km hingga 30 km (a) tampilan 2D, (b) tampilan 3D

Informasi model lapisan kesembilan (Gambar 16) dapat dilihat pada Tabel 11:

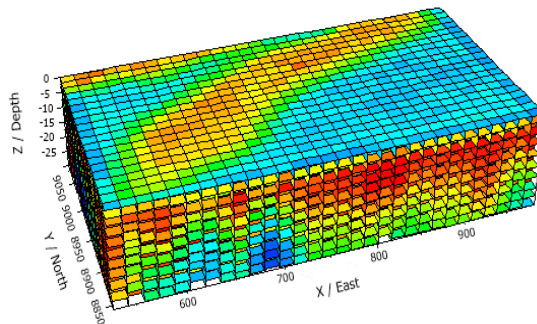
Tabel 11. Model lapisan kesepuluh pada kedalaman 28 km – 30 km

Model Lapisan Batuan	Densitas Batuan (g/cm^3)	Pendugaan Batuan	Keterangan
Lapisan kesepuluh	$1,76 \text{ g/cm}^3 - 2,28 \text{ g/cm}^3$	Batu pasir (sand)	Batu pasir dan dolomit banyak terdapat di wilayah perairan laut Savu dan laut Timor.
	$2,29 \text{ g/cm}^3 - 2,54 \text{ g/cm}^3$	Batuan dolomit	
	$2,56 \text{ g/cm}^3 - 2,63 \text{ g/cm}^3$	Batuan granulit	Batu granulit dan sienit menyebar secara merata di wilayah perairan dan sebagian kecil di daratan pulau
	$2,64 \text{ g/cm}^3 - 2,69 \text{ g/cm}^3$	Batuan sienit	
	$2,70 \text{ g/cm}^3 - 2,90 \text{ g/cm}^3$	Batuan sabak (slate)	Batu sabak menyebar di hampir seluruh daratan pulau hingga selatan palung Timor serta pulau-pulau di utara pulau Timor.

Keseluruhan model perlapisan terlihat bahwa lapisan ketujuh sampai lapisan kesepuluh memiliki nilai densitas yang relatif sama yang teridentifikasi sebagai batuan dolomit, granulit, sienit dan sabak. Batuan dolomit adalah variasi batuan gamping. Secara geologi, dolomit dapat terbentuk karena proses primer dan sekunder. Secara sekunder, dolomit umumnya terjadi karena proses peresapan unsur magnesium dari air laut ke dalam batu gamping atau yang lebih dikenal dengan proses dolomitisasi yaitu proses perubahan mineral kalsit menjadi dolomit. Selain itu dolomit sekunder dapat juga terbentuk karena diendapkan secara tersendiri sebagai endapan evaporit. Pembentukan dolomit sekunder dapat terjadi karena beberapa faktor, diantaranya adalah tekanan air yang banyak mengandung unsur magnesium dan prosesnya

berlangsung dalam waktu lama. Dengan semakin tua umur batu gamping, semakin besar kemungkinannya untuk berubah menjadi dolomit. Dolomit primer terbentuk bersama-sama dalam galian tambang yang berupa bijih. Granulit merupakan tekstur batuan metamorf dengan tekstur granoblastik yang tersusun oleh mineral utama kuarsa dan feldspar. Sienit merupakan batuan beku intrusif atau batuan beku dalam. Batu sabak (slate) merupakan batuan metamorf yang terbentuk dari proses metamorfisme batuan sedimen Shale atau Mudstone (batu lempung) pada temperatur dan suhu yang tinggi dan juga termasuk dalam *Calsic Metamorphic Rock* atau batuan metamorf yang berasal dari batuan yang bersifat kalsik

Kedalaman 3 km hingga 30 km, batu sabak (slate) merupakan batuan yang mendasari berbagai jenis batuan di atasnya. Penyebarannya mulai meluas pada lapisan keenam dengan kedalaman sekitar 15 km. Oleh karena itu, batu sabak dapat diduga sebagai batuan dasar (*basement rock*) pulau Timor. Umur batuan ini diperkirakan berkisar dari Perem sampai Pra Karbon. Batu sabak termasuk dalam Kompleks Mutis yang serupa dengan Kompleks Lolotoi di Timor Timur. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [5] dan [6] yang menyatakan bahwa batuan dasar pulau Timor adalah batuan metamorf.



Gambar 17. Sebaran densitas keseluruhan lapisan dalam 3D

Gambar 17 merupakan gambaran seluruh lapisan tiga dimensi (3D) yang tersusun dari lapisan pertama sampai dengan lapisan kesepuluh dengan kedalaman kurang lebih 30 km. Berdasarkan hasil inversi yang telah dilakukan secara perlapisan, maka diperoleh nilai densitas rata-rata keseluruhan yaitu $2,62 \text{ gram/cm}^3$.

4. Kesimpulan

1. Geologi pulau Timor ditunjukkan dengan adanya pola penyebaran anomali medan gravitasi bouguer lengkap dengan anomali bernilai positif dan negatif. Nilai anomali positif lebih dari 0 mgal hingga sekitar 300 mgal. Anomali bernilai positif berada di hampir seluruh daratan pulau Timor dan sebagian perairan utara pulau yaitu laut Savu dan pulau-pulau di utara pulau Timor serta berada di selatan perairan laut Timor yaitu setelah palung Timor. Sedangkan anomali negatif kurang dari 0 mgal hingga sekitar -160 mgal. Anomali negatif berada di bagian selatan daratan Timor hingga perairan laut Timor dan sebagian besar laut Savu.
2. Berdasarkan hasil inversi yang dilakukan secara perlapisan, maka diperoleh nilai densitas rata-rata keseluruhan yaitu $2,6215 \text{ gram/cm}^3$ dan nilai densitas rata-rata perlapisan dari lapisan pertama sampai lapisan kesepuluh sebesar $2,29702 \text{ gram/cm}^3$, $2,52811 \text{ gram/cm}^3$, $2,68847 \text{ gram/cm}^3$, $2,69084 \text{ gram/cm}^3$, $2,68891 \text{ gram/cm}^3$, $2,68485 \text{ gram/cm}^3$, $2,67797 \text{ gram/cm}^3$, $2,66782 \text{ gram/cm}^3$, $2,65612 \text{ gram/cm}^3$ dan $2,63551 \text{ gram/cm}^3$.
3. Berdasarkan interpretasi pemodelan 3D dari setiap perlapisan, dapat diduga bahwa batuan dasar (*basement rock*) pulau Timor adalah batu sabak (slate) yaitu batuan metamorf yang berada pada kedalaman 3 km hingga 30 km. Hal ini serupa dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa batuan dasar pulau Timor adalah batuan metamorf.

Daftar Pustaka

- [1] G. Ibrahim, M. Yusuf, T. Selatan, and J. Pusat, "Bouguer Di Wilayah Nusa Tenggara Timur."
- [2] N. H. Nurdin, M. A. Massinai, and S. Aswad, "Identifikasi Pola Sebaran Intrusi Batuan Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geomagnet Di Sungai Jenelata Kabupaten Gowa," *J. Geocelbes*, vol. 1, no. 1, p. 17, 2017, doi: 10.20956/geocelbes.v1i1.1776.
- [3] F. Indrarini Wulandari *et al.*, "Identifikasi Keberadaan Basement Di Bawah Cekungan Timor Berdasarkan Data

- Anomali Gravitasi Dengan Pemodelan Tiga Dimensi,” *J. Fis. Indones.*, vol. 3, no. 57, pp. 1-9, 2017, doi: 10.22146/jfi.27089.
- [4] N. Hidayat, “Analisis Anomali Gravitasi Sebagai Acuan Dalam Penentuan Struktur Geologi Bawah Permukaan Dan Potensi Geothermal (Studi Kasus Di Daerah Songgoriti Kota Batu),” Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim, Malang., 2011.
- [5] M. Simamora, W. H., and Untung, *Preliminary Bouguer Anomaly, West Timor., Geological Research and Development Centre*. Bandung, 1983.
- [6] Tanesib, J. L., “Kajian Tektonika Pulau Timor: Interpretasi Bawah Permukaan Pulau Timor dan Sekitarnya dengan Metode Gravitasi,” Universitas Gajah Mada, Yogyakarta., 2010.
- [7] F. S. Agam and A. Besar, “Interpretasi Kuantitatif Data Anomali Gravitasi di Kawasan Panas Bumi Seulawah Agam , Aceh Besar Quantitative Interpretation of Gravity Anomaly Data in Geothermal,” vol. 7, no. 1, pp. 6-12, 2018.
- [8] N. Tulak, “Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah Yapen dan Membrano, Papua Berdasarkan Anomali Gravitasi,” Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 2011.
- [9] B. Linong, J. L. Tanesib, J. Tarigan, and L. A. S. Laponi, “Interpretasi Bawah Permukaan Pulau Lembata Dengan Model 3D Menggunakan Metode Gravitasi,” *J. Fis.*, vol. 1, no. 1, pp. 43-51, 2016.
- [10] A. I. Pellokila, J. L. Tanesib, and B. Bernandus, “Identifikasi Keberadaan Basement Di Bawah Cekungan Timor Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Dengan Pemodelan Tiga Dimensi,” *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 3, no. 1, pp. 1-11, 2018, doi: 10.35508/fisa.v3i1.588.
- [11] G. Tematur, J. L. Tanesib, and R. K. Pingak, “Interpretasi Bawah Permukaan Gunung Anak Ranakah Dengan Pemodelan Dua Dimensi (2D) Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Lokal,” *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 3, no. 1, pp. 54-58, 2018, doi: 10.35508/fisa.v3i1.595.
- [12] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, “Chapter 2-Gravity Methods.pdf.” .