

**PEMODELAN INVERSI DATA GRAVITASI 3-DIMENSI UNTUK
MEREKONSTRUKSI STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH
GEOTHERMAL**

SKRIPSI

Oleh

Nendar Eko Waskito

0305020667



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
2009**

**PEMODELAN INVERSI DATA GRAVITASI 3-DIMENSI UNTUK
MEREKONSTRUKSI STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH
GEOHERMAL**

SKRIPSI

**Diajukan untuk Melengkapi Persyaratan Memperoleh
Gelar Sarjana Fisika**

Oleh

Nendar Eko Waskito

0305020667



**DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Nendar Eko Waskito

NPM : 0305020667

Tanda Tangan :

Tanggal : 26 November 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Nendar Eko Waskito
NPM : 0305020667
Program Studi : Geofisika
Judul Skripsi : Pemodelan Inversi Data Gravitasi 3-Dimensi Untuk
Merekonstruksi Struktur Geologi di Daerah Geothermal

Skripsi ini telah diperiksa dan disetujui oleh

Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc
Pembimbing

Dr. Syamsu Rosid
Penguji 1

Drs. Riyadi M.Si
Penguji 2

Dr. Santoso Soekirno
Ketua Departemen Fisika

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah rabbil'aalamiin. Puji syukur hanya kepada Allah SWT, Yang Maha Pengasih, yang selalu memberikan anugrah terindahya kepada penulis dan telah menuntun penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Shalawat dan salam kerinduan kepada sebaik – baik teladan Rasulullah SAW beserta keluarga dan sahabatnya.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, selesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dorongan dan doa yang tulus dari banyak pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini. Tanpa itu semua sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang setulus - tulusnya kepada:

1. Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis dalam segala hal, baik dalam ilmu pengetahuan, nasehat, dorongan, semangat serta segala fasilitas yang telah diberikan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Dr. Syamsu Rosid selaku penguji I, atas saran, masukan, pengarahan dan kritiknya selama penulis menyusun skripsi.
3. Drs. Riyadi M.Si selaku penguji II atas saran, masukan, pengarahan dan kritiknya selama penulis menyusun skripsi.
4. Dr. Eng. Supriyanto Suparno, M.Sc buat bantuan paper-papernya sebagai tambahan literatur bagi penulis.
5. Ka Rahman dan Lendriadi Agung, buat bantuan teknis dan saran yang diberikan selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Seluruh dosen dan karyawan departemen Fisika atas segala ilmu dan bantuan teknis yang penulis peroleh selama menjadi mahasiswa Fisika UI.

7. Terkhusus untuk kedua orang tua penulis, yang telah mendidik penulis dengan sangat istimewa. Terima kasih atas kepercayaan dan do'a tiada henti yang kalian berikan. Semoga Allah senantiasa menjaga kalian. Salam sayang untuk Adikku Nindya Windari. Juga kepada keluarga besar penulis yang sangat mendukung dan memotivasi penulis.
8. Buat temen-temen "*Futsal Kukel*" Fandi, Imam, Rangga, Aha, Bondan, Dedy, Kurnadi, Ipin, Ading, Eno, Fanny, Indra, Sigit, Al, Rifki, Arfi, dll untuk suasana ceria dan penuh tawa yang kalian berikan.
9. Untuk teman-teman seperjuangan dalam pengerjaan TA Surya, Rahmah, Anggi, Tiwi, Nurma, Ninik, Erlangga, Debby, Christine, Syahrul, Pandhu dan Dini, yang saling membantu dan memberikan dorongan semangat.
10. Special buat teman – teman fisika angkatan 2005. Terima kasih telah menjadi teman dan sahabat 'belajar' penulis selama 4,5 tahun ini.
11. Buat teman-teman geofisika angkatan 2006, Heni, Dedew, Agus, Jo, Wambra, Harry dan Aldi untuk bantuannya selama kuliah bersama.
12. Terima kasih untuk semua pribadi yang secara sadar ataupun tidak, telah menjadi 'guru' dalam kehidupan penulis. Semoga Allah mengganjar setiap keikhlasan dari setiap amal shaleh kalian.

Semoga skripsi ini dapat berguna bagi siapa saja yang mengkajinya, serta dapat dikembangkan dan disempurnakan agar lebih bermanfaat untuk kepentingan orang banyak.

Depok, 26 November 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nendar Eko Waskito
NPM : 0305020667
Program Studi : Geofisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PEMODELAN INVERSI DATA GRAVITASI 3-DIMENSI UNTUK
MEREKONSTRUKSI STRUKTUR GEOLOGI DI DAERAH
GEOTHERMAL**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 26 November 2009

Yang menyatakan

(Nendar Eko Waskito)

Nama : Nendar Eko Waskito
Program studi : Fisika
Judul skripsi : Pemodelan Inversi Data Gravitasi 3-Dimensi untuk Memetakan Struktur Geologi di Daerah Geothermal

ABSTRAK

Metode gravitasi mempunyai kemampuan yang baik dalam memetakan struktur geologi dibawah permukaan tanah, karena itu metode ini sering digunakan pada eksplorasi geothermal, terutama untuk memetakan patahan, graben dan intrusi batuan yang menjadi sumber panas (*heat source*). Kendala yang muncul adalah adanya ambiguitas dalam pemodelan data gravitasi. Maka untuk mengatasi masalah tersebut digunakan pemodelan inversi. Pemodelan ini didasarkan pada penyelesaian matematika dengan membuat asumsi dan membatasi masalah. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi program inversi gravitasi 3-D dari program yang sudah ada. Hasil modifikasi tersebut kemudian diaplikasikan pada daerah geothermal. Dengan menggunakan program inversi ini dapat dipetakan bodi intrusi pada daerah geothermal tersebut.

Kata kunci : metode gravitasi, ambiguitas, pemodelan inversi, program inversi 3-D, daerah geothermal

Name : Nendar Eko Waskito
Program study : Fisika
Title of essay : Modeling of Gravity Data Inversion 3-Dimension to
Reconstruction The Geology Structure in The Geothermal Area

ABSTRACT

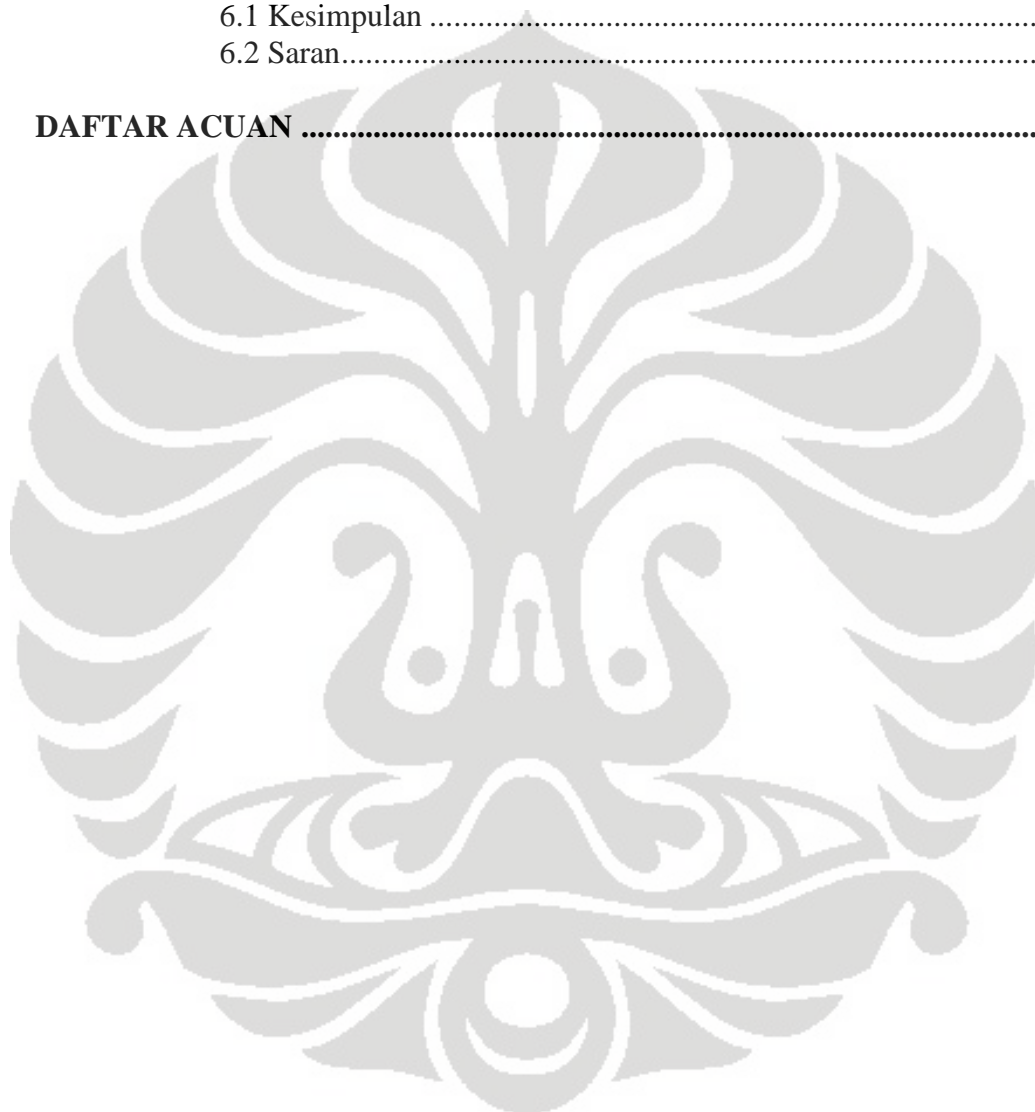
Gravity method have good ability to figure geology structure in the subsurface. For that reason, this method often used in geothermal exploration, especially to describe fault, graben and rock intrusion that become heat source. But there is constraint like ambiguity in gravity data modeling. Then inverse modeling was used to solve ambiguity problem. Inverse modeling base on mathematical solution by made assumption and constrained the problem. In this study, 3-D gravity inversion program were modified from existing program. Modification result then applied in geothermal area. By using this inversion program, body intrusion in that geothermal area could be figured.

Keywords : gravity method, ambiguity, inverse modeling, program inversi 3-D, daerah geothermal

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | vi |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 Konsep Umum Sistem Geothermal..... | 2 |
| 1.3 Pembatasan Masalah | 4 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.5 Metodologi Penelitian | 4 |
| 1.6 Sistematika Penulisan..... | 6 |
| BAB II TEORI DASAR..... | 8 |
| 2.1 Pendahuluan | 8 |
| 2.2 Hukum Gravitasi Newton | 8 |
| 2.3 Reduksi Harga Gravitasi Pengamatan | 9 |
| 2.3.1 Koreksi Drift | 9 |
| 2.3.2 Koreksi Tidal..... | 10 |
| 2.3.3 Koreksi Lintang..... | 10 |
| 2.3.4 Koreksi Free Air..... | 11 |
| 2.3.5 Koreksi Bouger | 12 |
| 2.3.6 Koreksi Terrain | 13 |
| 2.4 Penentuan Nilai Densitas Batuan | 14 |
| 2.5 Anomali Bouger | 15 |
| 2.6 Pemisahan Anomali Regional dan Residual | 17 |
| 2.7 Dasar Intepretasi..... | 18 |
| BAB III Algoritma Pemrograman Inversi Gravitasi 3-Dimensi | 20 |
| 3.1 Pendahuluan | 20 |
| 3.2 Formula Matematis | 23 |
| 3.3 Algoritma Pemrograman | 24 |
| 3.4 Modifikasi Program | 28 |
| 3.5 Pengujian Program | 34 |
| BAB IV Pemodelan Gravitasi 3-Dimensi | 39 |
| 4.1 Pemodelan Dengan Data Sintetik | 39 |
| 4.2 Pemodelan Dengan Data Real..... | 44 |

| | |
|--|---------------|
| BAB V PEMBAHASAN | 47 |
| 5.1 Data-data Pendukung | 47 |
| 5.1.1 Geologi Daerah Penelitian | 47 |
| 5.1.2 Geokimia Daerah Penelitian | 55 |
| 5.1.3 Data MT Daerah Penelitian..... | 57 |
| 5.2 Model Gravitasi 3-D | 58 |
| 5.3 Model Konseptual Daerah Geothermal Penelitian..... | 64 |
| BAB VI PENUTUP | 66 |
| 6.1 Kesimpulan | 66 |
| 6.2 Saran..... | 66 |
| DAFTAR ACUAN | 67 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1.1 Sistem geothermal | 3 |
| Gambar 1.2 Bagan alur penelitian..... | 6 |
| Gambar 2.1 Gaya tarik menarik antar dua benda..... | 9 |
| Gambar 2.2 Efek rotasi dan bentuk bumi terhadap gravitasi | 11 |
| Gambar 2.3 Koreksi udara bebas | 12 |
| Gambar 2.4 Koreksi Bouger | 13 |
| Gambar 2.5 (a) Efek gunung terhadap nilai gravitasi | 13 |
| Gambar 2.5 (b) Efek lembah terhadap nilai gravitasi | 13 |
| Gambar 2.6 Penggunaan Hammer Chart untuk koreksi Terrain..... | 14 |
| Gambar 2.7 Penentuan densitas batuan menggunakan metode Nettleton..... | 15 |
| Gambar 3.1 Alur pemodelan inversi | 20 |
| Gambar 3.2 Alur pemodelan forward | 21 |
| Gambar 3.3 Sketsa stasiun gravitasi dan grid 3-D jajaran-genang yang merepresentasikan volume bawah permukaan yang bertetangga | 23 |
| Gambar 3.4 Alur algoritma pemrograman | 27 |
| Gambar 3.5 Program PARAM ketika dijalankan | 29 |
| Gambar 3.6 Program SECTIONS ketika dijalankan..... | 29 |
| Gambar 3.7 Pilihan yang terdapat pada program SECTIONS..... | 30 |
| Gambar 3.8 Tampilan program inversi gravitasi 3-D hasil modifikasi | 31 |
| Gambar 3.9 Program inversi gravitasi 3-D ketika dijalankan..... | 31 |
| Gambar 3.10 Proses input data..... | 32 |
| Gambar 3.11 Proses input parameter | 32 |
| Gambar 3.12 Proses inversi sedang berlangsung | 33 |
| Gambar 3.13 Pilihan pengaturan penampang pada program SECTIONS | 33 |
| Gambar 3.14 Pemodelan hasil inversi dari penampang yang telah dipilih | 34 |
| Gambar 3.15 Pengujian program dengan model 1 | 35 |
| Gambar 3.16 Plot anomali bouger hasil perhitungan program | 35 |
| Gambar 3.17 Pemodelan inversi untuk model 1(ukuran sel 140 m)..... | 36 |
| Gambar 3.18 Pengujian program dengan model 2..... | 37 |
| Gambar 3.19 Plot anomali bouger hasil perhitungan program | 37 |
| Gambar 3.20 Pemodelan inversi untuk model 1(ukuran sel 140 m)..... | 38 |
| Gambar 4.1 Pemodelan dengan data sintetik | 39 |
| Gambar 4.2 Plot topografi..... | 40 |
| Gambar 4.3 Plot anomali bouger | 41 |
| Gambar 4.4 Plot anomali bouger hasil perhitungan program | 41 |
| Gambar 4.5 Hasil inversi dengan data sintetik..... | 42 |
| Gambar 4.6 Pemodelan data sintetik 3-D berbentuk blok | 43 |
| Gambar 4.7 Hasil inversi dengan data real | 43 |
| Gambar 4.8 Plot topografi..... | 44 |
| Gambar 4.9 Plot anomali bouger | 44 |
| Gambar 4.10 Plot anomali bouger hasil perhitungan program | 45 |
| Gambar 4.11 Plot model gravitasi 3-D hasil inversi | 45 |
| Gambar 4.12 Plot model gravitasi 3-D hasil inversi berbentuk blok..... | 46 |
| Gambar 5.1 Peta daerah penelitian..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Gambar 5.2 Fisiografi daerah penelitian..... | 48 |
| Gambar 5.3 Peta geomorfologi daerah penelitian..... | 49 |
| Gambar 5.4 Peta geologi daerah penelitian | 53 |
| Gambar 5.5 Tipe komposisi kimia lapangan prospek daerah penelitian | 55 |
| Gambar 5.6 Geothermometry lapangan prospek daerah penelitian..... | 55 |
| Gambar 5.7 Titik-titik pengamatan MT | 56 |
| Gambar 5.8 Pemodelan 3-D data MT | 56 |
| Gambar 5.9 Peta topografi daerah penelitian..... | 59 |
| Gambar 5.10 Peta anomali bouger daerah penelitian..... | 60 |
| Gambar 5.11 Anomali regional orde 2..... | 60 |
| Gambar 5.12 Anomali regional hasil pengukuran lapangan..... | 61 |
| Gambar 5.13 Anomali residual orde 2 | 61 |
| Gambar 5.14 Pemodelan inversi 3-D daerah penelitian..... | 62 |
| Gambar 5.15 Plot model gravitasi 3-D daerah penelitian hasil inversi..... | 62 |
| Gambar 5.16 Model konseptual geothermal daerah penelitian..... | 63 |



DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Nilai densitas rata-rata batuan beku | 16 |
| Gambar 2.2 Nilai densitas rata-rata batuan sedimen..... | 16 |
| Gambar 2.3 Nilai densitas rata-rata batuan metamorf | 16 |
| Gambar 5.1 Urutan Vulkanostratigrafi daerah X-W | 52 |



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Seperti yang diketahui metode gravitasi merupakan metode yang cukup bagus untuk digunakan dalam eksplorasi keadaan bawah permukaan tanah. Metode gravitasi ini telah diaplikasikan secara luas untuk memahami aktivitas vulkanik dan juga diaplikasikan untuk mengetahui struktur geologi dari daerah target eksplorasi. Karena kemampuannya dalam memetakan struktur geologi, maka dari itu metode gravitasi ini sering digunakan pada eksplorasi geothermal. Terutama dalam memetakan struktur seperti patahan, graben dan basin yang biasanya terdapat dalam sistem geothermal. Selain itu metode gravitasi juga dapat memetakan intrusi batuan yang menjadi sumber panas (*heat source*) serta adanya densifikasi yang terjadi pada zona rekahan dalam suatu reservoir geothermal.

Akan tetapi ada kendala yang muncul dari penggunaan metode gravitasi ini yaitu adanya ambiguitas dalam pemodelan data gravitasi. Dari satu benda anomali gravitasi yang dihasilkan dari pengolahan data lapangan, ternyata dapat dibuat beberapa pemodelan gravitasi yang berbeda.

Ada dua macam pemodelan yang dapat dilakukan untuk memodelkan data hasil pengukuran metode gravitasi di lapangan yaitu pemodelan *forward* dan pemodelan inversi.

Pemodelan *forward* ini didasarkan pada kondisi geologi dan intuisi geofisika dalam membuat suatu model awal untuk bodi anomali, dan kemudian memperhitungkan juga efek model gravitasi yang akan dibandingkan dengan anomali hasil pengukuran. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, parameter model diatur untuk memperbaiki pencocokan antar dua anomali. Metode seperti ini merupakan *trial and error method* (Blakeley, 1995 dalam Shin 2005).

Sedangkan pada pemodelan inversi, satu atau beberapa parameter bodi anomali dari anomali hasil pengukuran dilakukan perhitungan, kemudian dibuat beberapa asumsi sederhana. Bila dibuat pengertiannya proses inversi atau *inverse modeling* yaitu suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik

penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan (Supriyanto, 2007)

Oleh karena itu biasanya pemodelan *forward* lebih sering digunakan pada penelitian yang dilakukan di laboratorium untuk mempelajari model bawah permukaan tanah, dengan struktur geologi dan densitas batuan yang dapat diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan penelitian untuk melihat respon gravitasinya. Sedangkan pemodelan inversi lebih sering digunakan pada industri, hal ini dikarenakan kebutuhan akan pemodelan bawah permukaan tanah dengan segera sehingga tahapan eksplorasi selanjutnya dapat dilakukan.

Namun ada beberapa permasalahan pada pemodelan inversi data gravitasi, yakni berkaitan dengan sampel data yang diskrit, tidak akurat dan tidak teratur yang mengandung informasi tentang distribusi anomali massa bawah permukaan dimana sumber anomali gravitasi dapat terdeteksi (Camacho et al, 2000).

Selain itu karakterisasi permasalahan inversi adalah solusinya yang tidak unik. Hal tersebut membutuhkan geologi dan hipotesa matematika untuk membatasi masalah dan memungkinkan untuk mendapatkan hasil yang realistis (Camacho et al, 2000).

Untuk menyelesaikan permasalahan ambiguitas tersebut dilakukan pemodelan inversi data gravitasi 3D dengan bantuan data pendukung seperti data MT dan data geologi sehingga nantinya model konseptual yang dihasilkan mendekati keadaan bawah permukaan yang sebenarnya. Selain itu dengan pemodelan 3D ini akan didapatkan analisis yang detail mengenai daerah target eksplorasi.

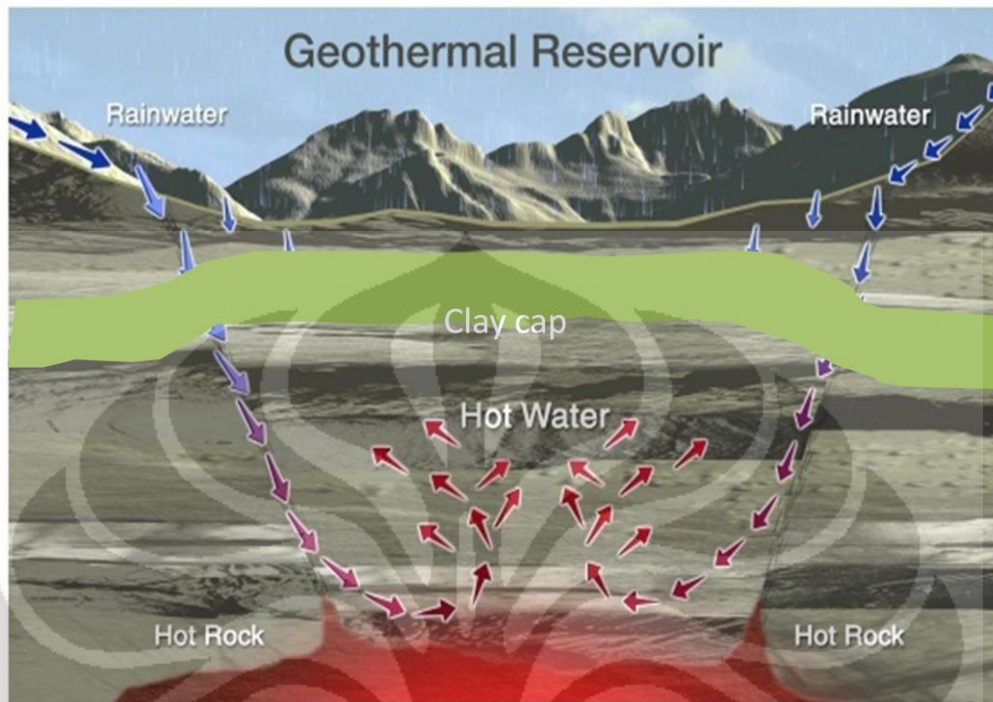
Pada penelitian ini penulis akan menggunakan pemodelan inversi atau *inverse modeling* untuk memodelkan data gravitasi baik menggunakan data sintetik maupun data *real*.

1.2 Konsep Umum Sistem Geothermal

Pada daerah potensi geothermal umumnya akan ditemukan suatu sistem geothermal yang terdiri dari :

- sumber panas (*heat source*)
- reservoir geothermal

- batuan penudung (*cap rock*)
- fluida yang membawa panas ke permukaan



Gambar 1.1 Sistem Geothermal (Daud, 2005)

Umumnya sistem geothermal dapat ditemukan di daerah-daerah seperti berikut :

1. sepanjang zona pemekaran lempeng (*spreading zone*)
2. zona tumbukan lempeng (*subduction zone*)
3. sepanjang jajaran pegunungan

Penjelasannya adalah sebagai berikut:

Air bawah tanah yang berada di sekitar sumber panas (*heat source*) akan menjadi air panas atau uap panas yang bertekanan tinggi. Air atau uap panas ini akan mengalami fenomena arus konveksi karena pengaruh panas tersebut. Pada mulanya, molekul-molekul fluida tersebut berusaha mentransfer atau berbagi panas kepada sesamanya hingga mencapai kesetaraan temperatur. Seiring dengan meningkatnya temperatur, volumenya bertambah dan efeknya tekanan fluida semakin naik. Akhirnya fluida mendesak dan mendorong batuan sekitarnya atau berusaha menerobos celah-celah antar batuan (*fracture*) untuk melepaskan tekanannya. Secara umum, tekanan di sekitar permukaan bumi lebih rendah dari

pada tekanan dibawah permukaan bumi. Berdasarkan hal ini, air panas maupun uap panas yang terperangkap dibawah permukaan bumi akan berupaya mencari jalan terobosan untuk dapat keluar ke permukaan bumi. Ketika menemukan jalan untuk sampai ke permukaan, maka air panas atau uap panas tersebut dapat keluar dalam bentuk (*fumarole*), atau bisa juga keluar dalam wujud cairan membentuk telaga air panas (*hot spring*), atau bisa juga berupa lumpur panas (*mud pots*). Semua fenomena ini adalah jenis-jenis manifestasi dari keberadaan sistem panas bumi (*geothermal system*).

1.3 Pembatasan Masalah

Ruang lingkup yang dibahas dalam skripsi ini adalah melakukan modifikasi program inversi gravitasi 3D dari program yang sudah ada sebelumnya. Program tersebut dibuat oleh Antonio G. Camacho menggunakan bahasa pemrograman Fortran 77. Kemudian melakukan pengujian program menggunakan model sederhana dan mengaplikasikannya pada data gravitasi sintetik dan *real*. Data *real* yang digunakan adalah data gravitasi dari daerah geothermal. Pengaplikasian program inversi tersebut pada data sintetik dan data *real* menghasilkan model gravitasi 3D. Dengan menggunakan data pendukung seperti data geologi, data geokimia dan data geofisika lain yaitu data MT akan dibuat model konseptual sistem geothermal pada daerah tersebut.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

- Pengembangan program pemodelan inversi data gravitasi 3D.
- Pemodelan gravitasi 3D dengan model sintetik
- Aplikasi Inversi 3D pada data *real* suatu lapangan geothermal.

1.5 Metodologi Penelitian

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah studi literatur, dimana pada tahapan ini penulis mencoba untuk memperoleh informasi mengenai metode atau pendekatan serta bahasa pemrograman yang dipakai dalam program inversi

gravitasi 3D tersebut. Selain itu penulis juga melakukan studi mengenai target yang akan diteliti yaitu mengenai tipe-tipe dari sistem geothermal.

Tahapan berikutnya yaitu melakukan pengolahan data gravitasi daerah geothermal dengan melakukan beberapa koreksi pada data tersebut agar dihasilkan anomali bouger meliputi koreksi *drift*, koreksi lintang, koreksi *free air*, koreksi *bouger* dan koreksi *terrain*. Langkah selanjutnya yaitu melakukan pemisahan anomali gravitasi menggunakan *Trend Surface Analysis* sehingga didapatkan anomali gravitasi regional dan anomali gravitasi residual.

Kemudian tahapan berikutnya yaitu melakukan pengembangan dari program Inversi Gravitasi 3D yang sudah ada. Program yang sudah ada ini dibuat oleh Antonio G. Camacho. Pada program Inversi Gravitasi 3D ini digunakan bahasa pemrograman Fortran 77, program ini terdiri dari 3 subprogram yang masing-masing mempunyai fungsi yang berbeda-beda, program terdiri dari PARAM, GROWTH dan SECTIONS (Camacho et al, 2002). Dengan pengembangan yang dilakukan diharapkan tiga program tersebut dapat digabungkan menjadi satu program inversi data gravitasi 3D dan dihasilkan tampilan yang lebih baik. Serta adanya pembuatan stasiun sintetik untuk pemodelan *forward*.

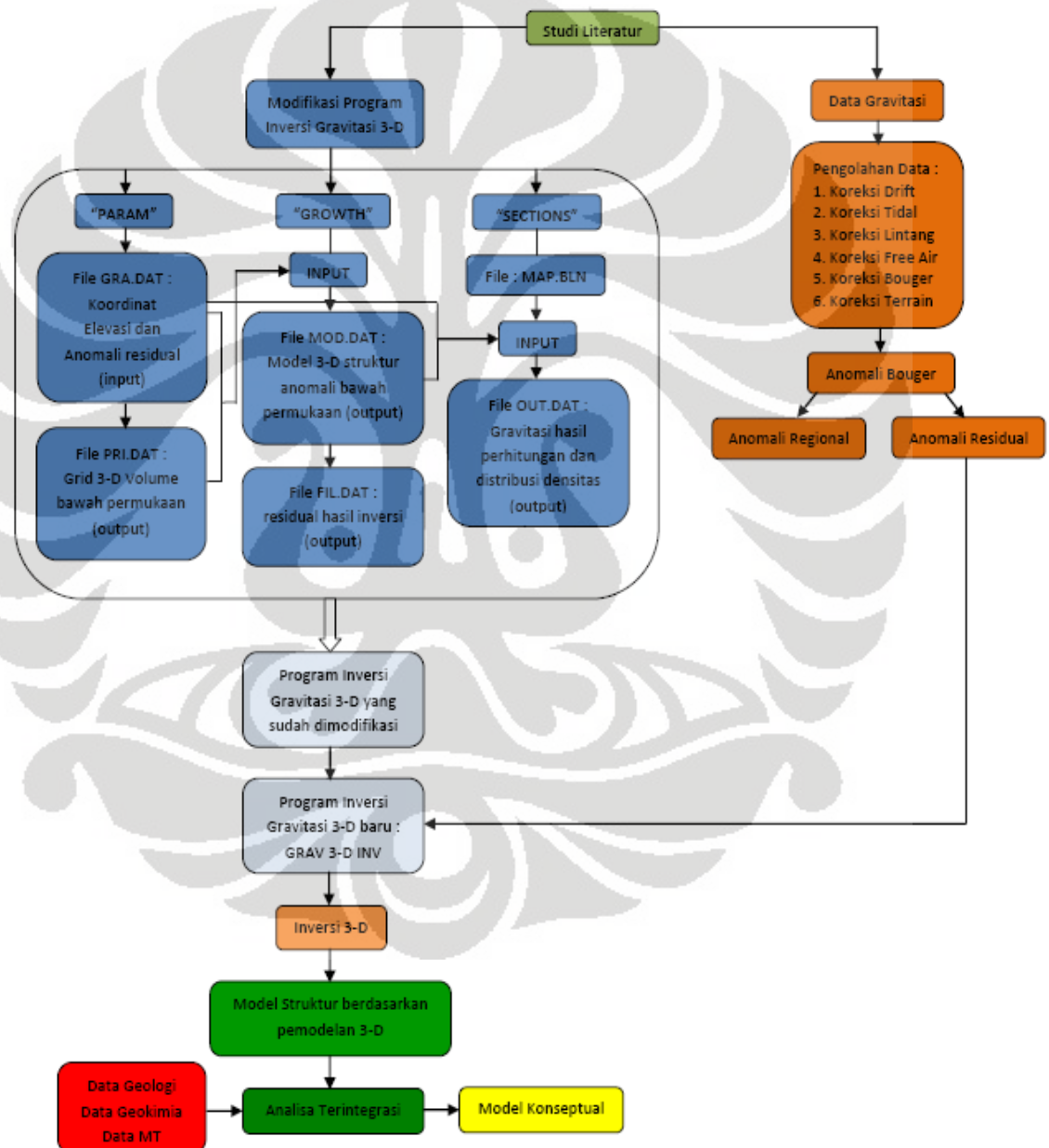
Selanjutnya dilakukan pemodelan Gravitasi 3D baik dengan menggunakan data sintetik maupun data *real* dari suatu lapangan geothermal dengan menggunakan program Inversi Gravitasi 3D yang telah dikembangkan. Dengan pemodelan 3D ini diharapkan rekonstruksi struktur geologi di daerah geothermal tersebut menghasilkan model struktur 3D yang mendekati kondisi yang sebenarnya dari model bawah permukaan tanah dan menghilangkan ambiguitas yang sering muncul pada pemodelan menggunakan metode gravitasi.

Tahapan terakhir yaitu model yang telah dibuat kemudian dianalisa dan diinterpretasi agar didapatkan gambaran dari daerah geothermal tersebut secara geologi sehingga nantinya dapat dibuat model konseptual sistem geothermalnya. Pada tahapan ini diperlukan data penunjang berupa data geologi dan data pengukuran geofisika lain, dalam hal ini adalah data MT. Dari model konseptual sistem geothermal ini akan terlihat zona yang merupakan sumber panas (*heat source*), reservoir, maupun batuan penudung (*cap rock*) dan zona yang teralterasi.

Gambar 1.2 menjelaskan bagan alur penelitian yang digunakan dalam penelitian skripsi ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada bab I diuraikan latar belakang dilakukannya studi ini, konsep umum sistem geothermal, pembatasan masalah, tujuan yang hendak dicapai, metode yang akan dilakukan serta sistematika penulisan.



Gambar 1.2 : Bagan Alur Penelitian

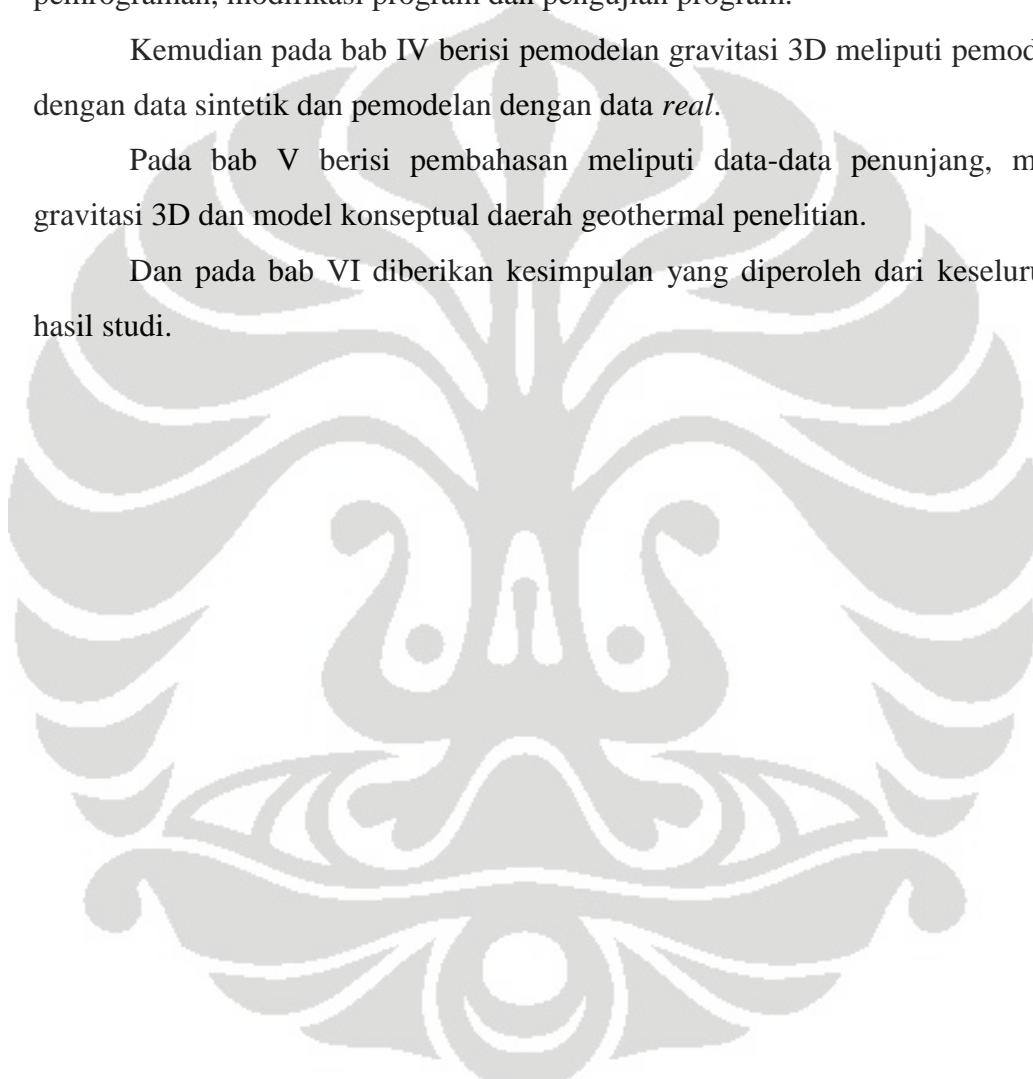
Berikutnya pada bab II, berisi teori dasar yang meliputi konsep dasar metode gravitasi, jenis koreksi, anomali Bouguer, penentuan nilai densitas batuan pemisahan anomali residual dengan *Trend Surface Analysis*, serta konsep dasar interpretasi.

Pada bab III dipaparkan penjelasan mengenai algoritma pemrograman inversi gravitasi 3D yang meliputi penjelasan formulasi matematis, algoritma pemrograman, modifikasi program dan pengujian program.

Kemudian pada bab IV berisi pemodelan gravitasi 3D meliputi pemodelan dengan data sintetik dan pemodelan dengan data *real*.

Pada bab V berisi pembahasan meliputi data-data penunjang, model gravitasi 3D dan model konseptual daerah geothermal penelitian.

Dan pada bab VI diberikan kesimpulan yang diperoleh dari keseluruhan hasil studi.



BAB 2

TEORI DASAR

2.1 Pendahuluan

Metoda gravitasi adalah salah satu metoda penyelidikan geofisika yang didasarkan pada variasi percepatan gravitasi di permukaan bumi. Distribusi massa jenis yang tidak seragam dapat disebabkan oleh struktur geologi yang ada di bawah permukaan bumi. Kontribusi struktur geologi terhadap variasi nilai percepatan gravitasi di permukaan bumi sangat kecil dibandingkan dengan nilai absolutnya. Variasi nilai percepatan gravitasi tersebut tidak hanya disebabkan oleh distribusi massa jenis yang tidak merata tetapi juga dipengaruhi oleh posisi titik amat di permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh adanya bentuk bumi yang tidak bulat sempurna dan relief bumi yang beragam (Alimuddin, 2002)

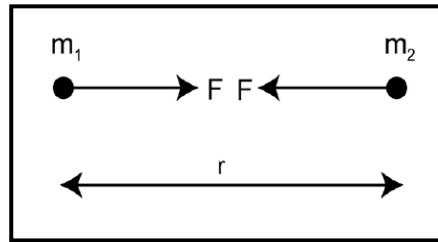
Besaran gravitasi tersebut didapat dengan bantuan alat ukur yang dinamakan gravimeter, alat ini telah dirancang untuk mengukur komponen tegak gravitasi dari daerah pengukuran.

2.2 Hukum Gravitasi Newton

Besaran yang diukur dalam metoda gravitasi adalah percepatan gravitasi yang dialami suatu massa benda akibat tarikan massa bumi M yang merupakan gaya persatuan massa. Hal ini sesuai dengan Hukum Newton tentang gravitasi yang menjelaskan bahwa gaya tarik menarik antara 2 partikel dengan massa m_1 dan m_2 berbanding lurus dengan perkalian massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat dari jarak pusat massa, dinyatakan sebagai berikut :

$$\vec{F}(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

$G = 6,673 \times 10^{-8} \text{ (gr/cm}^3\text{)}^{-1} \text{det}^2 = \text{konstanta gavitasi umum}$



Gambar 2.1 Gaya tarik menarik antar dua benda

Newton juga mendefinisikan hubungan antara gaya dan percepatan. Hukum II Newton tentang gerak menyatakan gaya sebanding dengan perkalian massa benda dengan percepatan yang dialami benda tersebut.

$$F = m_2 g \quad (2.2)$$

Jika m_1 adalah massa bumi, r adalah jari-jari bumi, lalu m_2 adalah massa benda, dengan mengkombinasikan kedua persamaan diatas maka percepatan gravitasi benda m_2 di permukaan bumi:

$$g = G \frac{M_1}{r^2} \quad (2.3)$$

Nilai rata-rata percepatan gravitasi ini adalah $9,80 \text{ m/s}^2$.

2.3 Reduksi Harga Gravitasi Pengamatan

Dalam proses pengolahan data gravitasi, ada beberapa koreksi yang harus dilakukan terhadap data tersebut. Koreksi tersebut antara lain :

2.3.1 Koreksi drift (koreksi apungan)

Gravimeter merupakan alat yang sensitif, Gravimeter biasanya dirancang dengan sistem keseimbangan pegas dan dilengkapi dengan massa (beban) yang tergantung bebas di ujungnya. Karena pegas tidak elastis sempurna, maka sistem pegas tidak kembali ke kedudukan semula. Koreksi karena sifat pegas ini disebut koreksi apungan (*drift correction*) (Jati, 2009).

- Hasil pengukuran gravitasi suatu tempat akan berubah pada suatu waktu yang berbeda akibat penyimpangan alat selama transportasi (karena mengalami guncangan serta pengaruh temperatur).
- Koreksi drift dimaksudkan untuk mengurangi pengaruh penyimpangan alat tersebut, dilakukan dengan mengukur kembali ke stasiun basis pada waktu yang berbeda dari suatu sistem pengukuran tertutup (*looping*).

Secara matematis koreksi drift dapat dinyatakan sebagai berikut (Gunawan, 1985):

$$DC_B = \frac{g_A - g_A'}{t_A' - t_A} (t_B - t_A) \quad (2.4)$$

Dengan :

DC_B = koreksi drift pada stasiun B

g_A = harga gravitasi di base stasiun A pada waktu t_A

g_A' = harga gravitasi di base stasiun A pada waktu t_A' (saat penutupan)

t_A' = waktu pengukuran di stasiun A (saat penutupan)

t_A = waktu pengukuran di stasiun A (pada pengukuran awal)

t_B = waktu pengukuran di stasiun B

2.3.2 Koreksi Tidal

Koreksi pasang surut dilakukan karena adanya perubahan posisi bulandan matahari terhadap bumi secara kontinyu. Hal ini menyebabkan perubahan ketinggian permukaan rata-rata air laut yang akan mempengaruhi pembacaan nilai gravitasi. Efek pasang surut ini dapat dikoreksi dengan melakukan pembacaan berulang pada stasiun yang sama seperti pada koreksi drift (Riamon, 2007).

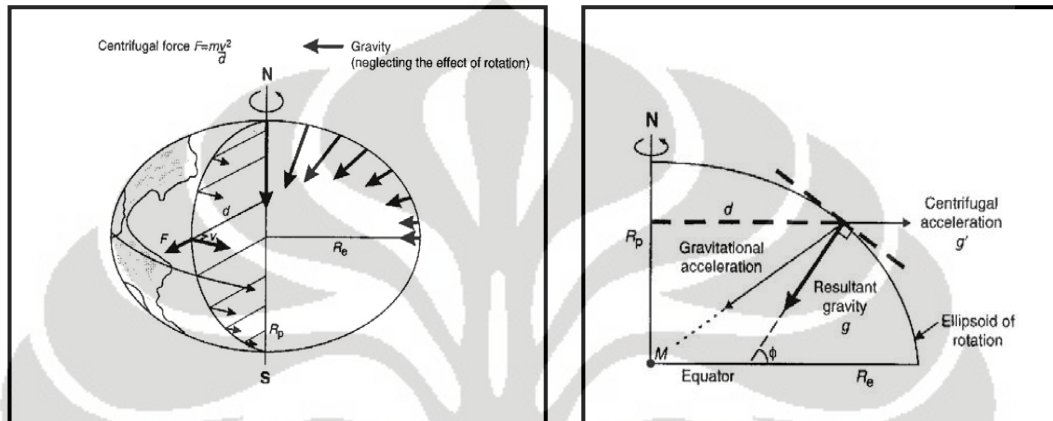
2.3.3 Koreksi lintang

Adanya rotasi bumi yang mengakibatkan bentuk bumi menjadi ellips dan menyebabkan terjadinya perbedaan nilai gravitasi pada tiap tempat yang berbeda tergantung pada posisi lintangnya. Berdasarkan hukum Newton, dapat ditunjukkan bahwa harga potensial gravitasi tergantung pada jaraknya (fungsi jarak). Makin besar harga r makin kecil efek gravitasi yang ditimbulkan. Karena bumi berbentuk spheroid maka harga gravitasi naik seiring dengan naiknya

lintang tempat, makin ke kutub makin besar efek gravitasinya. Dari IUGG 1930 didapatkan perumusan nilai gravitasi normal (G_n) sebagai fungsi lintang (θ):

$$G_n = 978,049 (1 + 0,005\,288\,4 \sin^2 \varphi - 0,000\,005\,9 \sin^2 2\varphi) \quad (2.5)$$

φ = Lintang



Gambar 2.2 Efek rotasi dan bentuk bumi terhadap gravitasi (Reynolds, 1997)

2.3.4 Koreksi Udara Bebas

Pengukuran metode gravitasi yang dilakukan terkadang berada di atas atau pun di bawah muka laut rata-rata (geoid). Hal ini akan membuat titik pengukuran memiliki perbedaan ketinggian dengan titik referensi yakni muka laut rata-rata (geoid) yang nantinya mempengaruhi nilai percepatan gravitasi yang terukur. Koreksi udara bebas dimaksudkan untuk menghilangkan pengaruh tersebut. Maka koreksi udara bebas dapat didefinisikan sebagai koreksi yang dilakukan karena adanya perbedaan ketinggian antara daerah pengukuran dengan muka laut rata-rata (*mean sea level*)/geoid.

Penurunannya secara matematis adalah sebagai berikut :

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

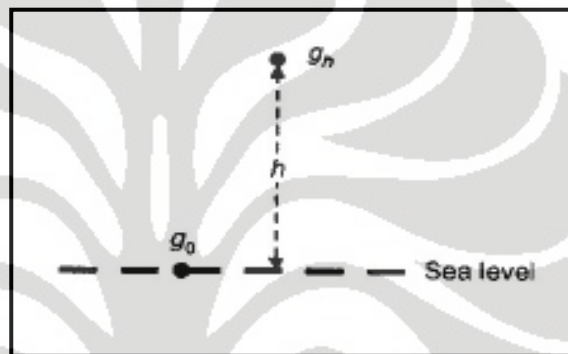
$$\frac{dg}{dr} = -2G \frac{M}{r^3} = -2 \frac{g}{r}$$

$$\frac{dg}{dr} = \frac{dg}{h} = -2 \frac{g}{r} = -2 \frac{9.81 \text{ ms}^{-2}}{6.371 \times 10^6 \text{ m}} = -3.080 \times 10^{-6} \frac{\text{ms}^{-2}}{\text{m}} = -3.08 \frac{\mu\text{ms}^{-2}}{\text{m}}$$

$$\text{Free air} = 0.03086 \text{ h mgal}$$

(2.6)

- Bernilai positif apabila titik pengukuran berada di atas muka laut rata-rata.
- Bernilai negatif apabila titik pengukuran berada di bawah muka laut rata-rata.



Gambar 2.3 Koreksi udara bebas (Reynolds, 1997)

2.3.5 Koreksi Bouger

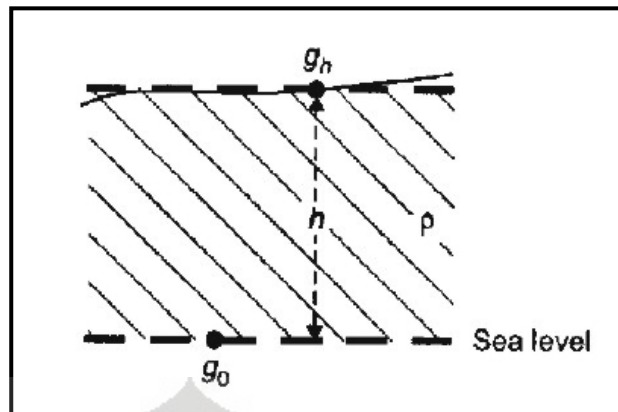
Koreksi bouger ialah koreksi yang dilakukan karena adanya pengaruh massa antara daerah pengukuran dengan titik referensi dalam hal ini geoid.

- Bernilai negatif apabila ada pengaruh massa di atas titik pengukuran.
- Bernilai positif apabila ada pengaruh massa di bawah titik pengukuran.

$$g_B = 2 \pi G \rho h = 0.04192 \rho h \text{ mgal (on land)}$$

$$g_B = 2 \pi G (\rho_{rock} - \rho_{water}) h \text{ mgal (at sea)}$$

(2.7)



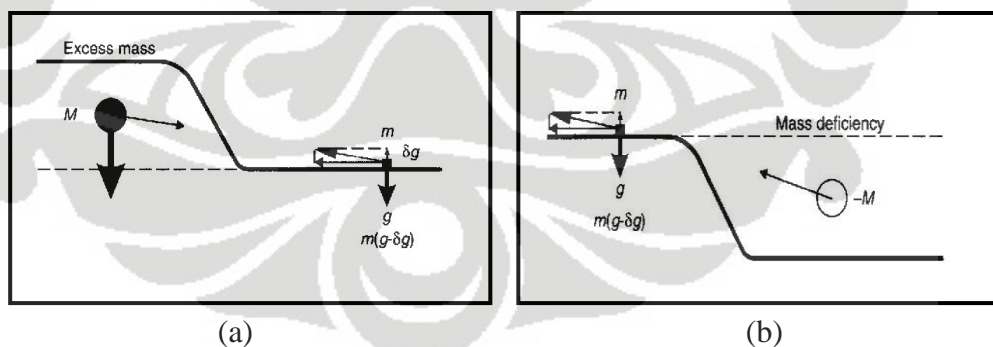
Gambar 2.4 Koreksi Bouguer (Reynolds, 1997)

2.3.6 Koreksi Terrain

Koreksi terrain ialah koreksi yang dilakukan karena di sekitar daerah pengukuran terdapat gunung atau lembah yang dapat mempengaruhi nilai percepatan gravitasi yang terukur.

- Apabila di sekitar daerah pengukuran terdapat gunung, maka pegas akan tertarik ke atas hal ini terjadi karena adanya kelebihan massa.
- Apabila di sekitar daerah pengukuran terdapat lembah, maka pegas akan tertarik ke atas hal ini terjadi karena adanya kekosongan massa.

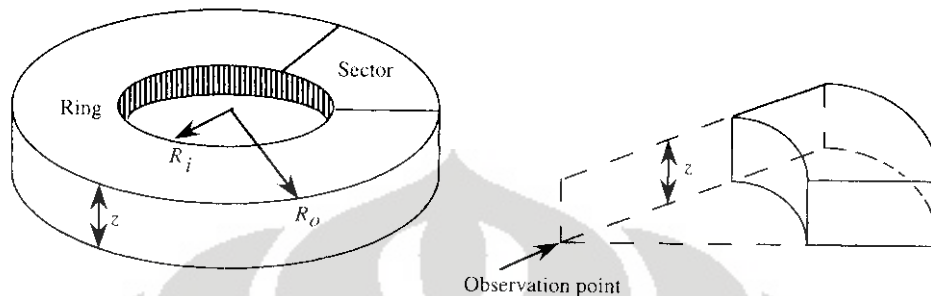
Jadi apabila pada daerah pengukuran dengan menggunakan metode gravitasi terdapat kondisi demikian maka untuk koreksi Terrain selalu ditambahkan.



Gambar 2.5 (a) efek gunung, (b) efek lembah terhadap nilai gravitasi (Reynolds, 1997)

Untuk perhitungan Koreksi Terrain, dapat dilakukan dengan menggunakan Hammer Chart. Yakni dengan menempatkan Hammer Chart di atas peta topografi. Persamaannya yaitu sebagai berikut :

$$g_{ring} = 2\pi G \rho [R_o - R_i + (R_i^2 + z^2)^{1/2} - (R_o^2 + z^2)^{1/2}] \quad (2.8)$$



Gambar 2.6 Penggunaan Hammer Chart untuk koreksi Terrain (Reynolds, 1997)

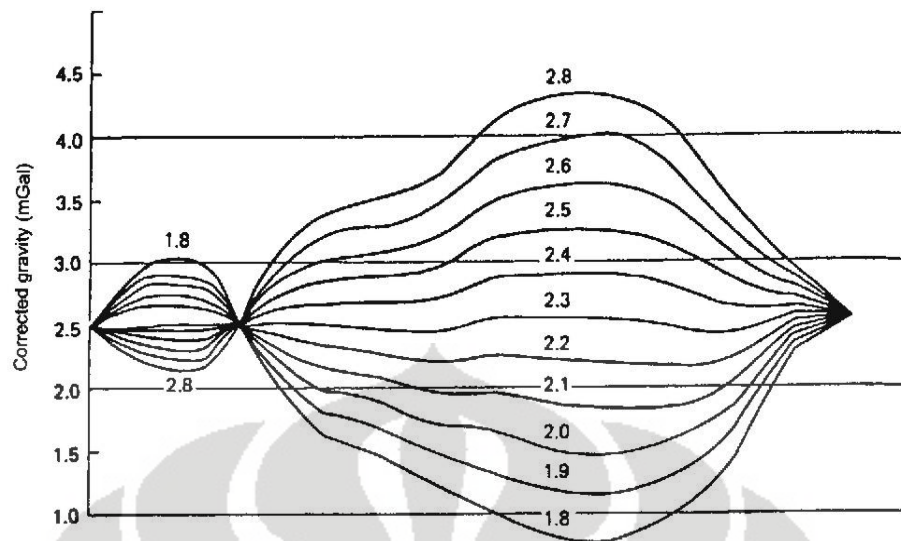
2.4 Penentuan Nilai Densitas Batuan

Ada beberapa cara yang dapat digunakan dalam melakukan penentuan nilai densitas batuan. Diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan metode Nettleton

Metoda ini dipakai dengan cara perhitungan Δg_B (Anomali gravitasi Bouguer) dari topografi massa antara titik-titik terendah dan tertinggi dari profil gravity yang dibagi-bagi secara vertikal.

Pada prinsipnya Δg_B dihitung untuk titik-titik sepanjang profil gravitasi dengan harga ρ yang berbeda-beda (dengan step 0,1 gr/cc). kemudian disusun profil vertikal gravitasi. Nilai densitas yang memiliki variasi paling minimum dengan peta topografi dianggap sebagai densitas yang benar. Oleh karena itu metoda ini tidak dapat digunakan dalam lapangan/ terrain datar atau dalam daerah yang densitas massa topografinya bervariasi sangat besar (Rosid, 2006).



Gambar 2.7 Penentuan densitas batuan menggunakan metode Nettleton
(Reynolds, 1997)

2. Dengan menggunakan metode Parasnis

Metode ini menggunakan *least square* :

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - 0,308 h + (0,04193 h - T) \rho)$$

$$(g_{obs.} - g_N + 0,3086 h) - \Delta g_B = - (0,04193 h - T) \rho$$

Dengan mengasumsikan harga anomali Bouguer yang nilai *random error*-nya untuk daerah survey sama dengan nol, lalu diplot nilai $(G_{obs} - G_N + 0.3086 h)$ terhadap nilai $(0.04193 h - T_c)$. Kemudian dengan metode *least square* didapatkan garis *fitting* dengan kemiringan ρ yang dianggap sebagai densitas yang benar.

2.5 Anomali Bouguer

Dalam survey gravitasi yang dicari adalah *anomali bouguer*. Anomali bouguer merupakan selisih antara gravitasi yang terukur di lapangan dengan harga gravitasi teoritis. Perbedaan tersebut merupakan akibat dari perbedaan massa batuan karena persebaran massa jenis batuan yang tidak merata.

Tabel 2.1 – 2.3 merupakan tabel nilai densitas batuan berdasarkan jenis batumannya.

Tabel 2.1 Nilai Densitas Rata-rata Batuan Beku (Telford et al., 1976)

| Rock Type | Range Average (wet) (g/cm ³) | | Rock Type | Range Average (wet) (g/cm ³) | |
|-------------------|---|------|---------------------|---|------|
| Rhyolite glass | 2,20-2,28 | 2,24 | Quartz diorite | 2,62-2,96 | 2,79 |
| Obsidian | 2,20-2,40 | 2,30 | Diorite | 2,72-2,99 | 2,85 |
| Vitrophyre | 2,36-2,53 | 2,44 | Lavas | 2,80-3,00 | 2,90 |
| Rhyolite | 2,35-2,70 | 2,52 | Diabase | 2,50-3,20 | 2,91 |
| Dacite | 2,35-2,80 | 2,58 | Essexite | 2,69-3,14 | 2,91 |
| Phonolite | 2,45-2,71 | 2,59 | Norite | 2,70-3,24 | 2,92 |
| Trachyte | 2,42-2,80 | 2,60 | Basalt | 2,74-3,30 | 2,99 |
| Andesite | 2,40-2,80 | 2,61 | Gabbro | 2,70-3,50 | 3,03 |
| Nephelite-Syenite | 2,53-2,70 | 2,61 | Hornblende-Gabbro | 2,98-3,18 | 3,08 |
| Granite | 2,50-2,81 | 2,64 | Peridotite | 2,78-3,37 | 3,15 |
| Granodiorite | 2,67-2,79 | 2,73 | Pyroxenite | 2,93-3,34 | 3,17 |
| Porphyry | 2,60-2,89 | 2,74 | Acid igneous (av.) | 2,30-3,11 | 2,61 |
| Syenite | 2,60-2,95 | 2,77 | Basic igneous (av.) | 2,09-3,17 | 2,79 |
| Anorthosite | 2,64-2,94 | 2,78 | | | |

Tabel 2.2 Nilai Densitas Rata-rata Batuan Metamorf (Telford et al., 1976)

| Rock Type | Range Average (wet) (g/cm ³) | | Rock Type | Range Average (wet) (g/cm ³) | |
|------------------|---|------|------------------|---|------|
| Quartzite | 2,50-2,70 | 2,60 | Serpentine | 2,40-3,10 | 2,78 |
| Schists | 2,39-2,90 | 2,64 | Slate | 2,70-2,90 | 2,79 |
| Graywacke | 2,60-2,70 | 2,65 | Gneiss | 2,59-3,00 | 2,80 |
| Granulite | 2,52-2,73 | 2,65 | Chloritic slate | 2,75-2,98 | 2,87 |
| Phyllite | 2,68-2,80 | 2,74 | Amphibolite | 2,90-3,04 | 2,96 |
| Marble | 2,60-2,90 | 2,75 | Eclogite | 3,20-3,54 | 3,37 |
| Quartzitic slate | 2,63-2,91 | 2,77 | Methamorphic-Av. | 2,40-3,10 | 2,74 |

Tabel 2.3 Nilai Densitas Rata-rata Batuan Sedimen (Telford et al., 1976)

| Rock Type | Range Average (wet) (g/cm ³) | | Range Average (dry) (g/cm ³) | |
|-----------------|---|---------|---|---------|
| | Range | Average | Range | Average |
| Alluvium | 1,96-2,00 | 1,98 | 1,50-1,60 | 1,54 |
| Clays | 1,63-2,60 | 2,21 | 1,30-2,40 | 1,70 |
| Glacial drift | - | 1,80 | - | - |
| Gravels | 1,70-2,40 | 2,00 | 1,40-2,20 | 1,95 |
| Loess | 1,40-1,93 | 1,64 | 0,75-1,60 | 1,20 |
| Sand | 1,70-2,30 | 2,00 | 1,40-1,80 | 1,60 |
| Sands and clays | 1,70-2,50 | 2,10 | - | - |
| Silt | 1,80-2,20 | 1,93 | 1,20-1,80 | 1,43 |
| Soils | 1,20-2,40 | 1,92 | 1,00-2,00 | 1,46 |
| Sandstones | 1,61-2,76 | 2,35 | 1,60-2,68 | 2,24 |
| Shales | 1,77-3,20 | 2,40 | 1,56-3,20 | 2,10 |
| Limestones | 1,93-2,90 | 2,55 | 1,74-2,76 | 2,11 |
| Dolomite | 2,28-2,90 | 2,70 | 2,04-2,54 | 2,30 |

Adanya perbedaan massa jenis batuan dari suatu tempat dengan tempat lain, akan menimbulkan medan gaya gravitasi yang tidak merata, dan perbedaan inilah yang terukur di permukaan bumi.

Setelah dilakukakan koreksi tidal dan koreksi drift, nilai anomali Bouguer didapatkan dengan melakukan koreksi-koreksi lainnya sebagai berikut (Telford et al., 1976):

$$\mathbf{BA} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{Obs} - \mathbf{G}_n + \mathbf{g}_{FA} - \mathbf{g}_B + \mathbf{TC} \quad (2.9)$$

Anomali Bouguer juga merupakan superposisi dari anomali yang bersifat regional dan anomali yang bersifat lokal. Anomali regional berasosiasi dengan kondisi geologi umum secara keseluruhan (geologi regional) daerah yang bersangkutan, dengan dicirikan oleh anomali yang berfrekuensi rendah. Sedangkan anomali lokal atau yang sering disebut juga sebagai anomali sisa (*residual*) mengandung informasi geologi setempat yang dicirikan oleh anomali yang mempunyai frekuensi tinggi.

2.6 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Tujuan dilakukannya *Trend Surface Analysis* (TSA) adalah untuk mendapatkan nilai anomali residual yang terdapat pada nilai gravitasi hasil pengolahan data dimana anomali ini tidak begitu terlihat pada peta anomali Bouguernya. Proses pemisahan anomali regional dan anomali residual dilakukan dengan pendekatan data anomali Bouguer yang diproses dengan suatu persamaan polinomial. Persamaannya dinyatakan dalam bentuk persamaan polinomial pada persamaan (2.10) (Abdelrahman et al., 1985)

$$Z(x, y) = \sum_i^p \sum_i^s \partial_{p-s,s} x^{p-s} y^s \quad (2.10)$$

dimana $ap - s, s$ adalah $\frac{1}{2}(p+1)(p+2)$, koefisien p adalah orde pada persamaan polinomial dua dimensi, x dan y adalah koordinat.

Contoh persamaan polinomial orde 2 :

$$g_i = A + Bx_i + Cy_i + Dx_i^2 + Ex_iy_i + Fy_i^2$$

Dimana :

$i = 1, 2, 3 \dots i =$ stasiun pengukuran

$g_i =$ Anomali bouger

$x_i y_i$ = Koordinat Stasiun

A, B..F= Konstanta polinomial

2.7 Dasar Intepretasi

Dalam menentukan sebuah besaran tertentu dari anomali Bouguer yang telah diperoleh, perlu adanya proses lanjutan yaitu interpretasi terhadap data tersebut. Interpretasi metode gravitasi secara umum dibedakan menjadi dua yaitu interpretasi kualitatif dan kuantitatif (Kartasaputra, 2008).

a. Interpretasi Kualitatif

Interpretasi kualitatif dilakukan dengan mengamati data gravitasi berupa anomali Bouguer. Anomali tersebut akan memberikan hasil secara global yang masih mempunyai anomali regional dan residual. Hasil interpretasi dapat menafsirkan pengaruh anomali terhadap bentuk benda, tetapi tidak sampai memperoleh besaran matematisnya. Misal pada peta kontur anomali Bouguer diperoleh bentuk kontur tertutup maka dapat ditafsirkan sebagai struktur batuan berupa lipatan (sinklin atau antiklin). Dengan interpretasi ini dapat dilihat arah penyebaran anomali atau nilai anomali yang dihasilkan.

b. Interpretasi Kuantitatif

Interpretasi kuantitatif dilakukan untuk memahami lebih dalam hasil interpretasi kualitatif dengan membuat penampang gravitasi pada peta kontur anomali. Teknik interpretasi kuantitatif mengasumsikan distribusi rapat massa dan menghitung efek gravitasi kemudian membandingkan dengan gravitasi yang diamati. Interpretasi kuantitatif pada penelitian ini adalah analisis model bawah permukaan dari suatu penampang anomali Bouguer dengan menggunakan metoda poligon yang diciptakan oleh Talwani. Metoda tersebut telah dibuat pada *software* GRAV2D.

Metoda yang digunakan dalam pemodelan gravitasi secara umum dibedakan ke dalam dua cara, yaitu pemodelan kedepan (*forward modelling*) dan inversi (*inverse modelling*). Prinsip umum kedua pemodelan ini adalah meminimumkan selisih anomali perhitungan dengan anomali pengamatan, melalui metoda kuadrat terkecil (*least square*), teknik matematika tertentu, baik linier atau

non linier dan menerapkan batasan–batasan untuk mengurangi ambiguitas. Menurut (Talwani et al., 1959), pemodelan ke depan untuk menghitung efek gravitasi model benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang yang dapat diwakili oleh suatu poligon bersisi- n dinyatakan sebagai integral garis sepanjang sisi-sisi poligon.



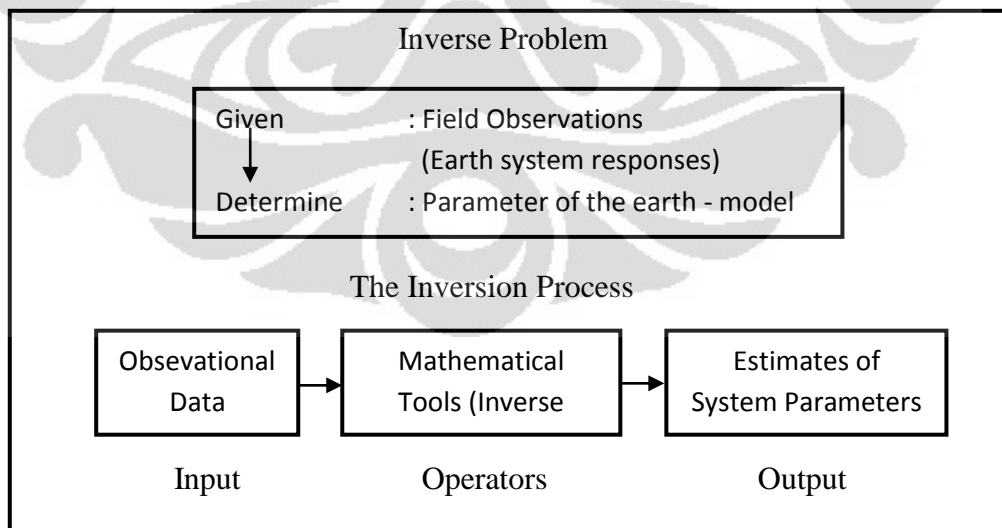
BAB 3

ALGORITMA PEMROGRAMAN

3.1 Pendahuluan

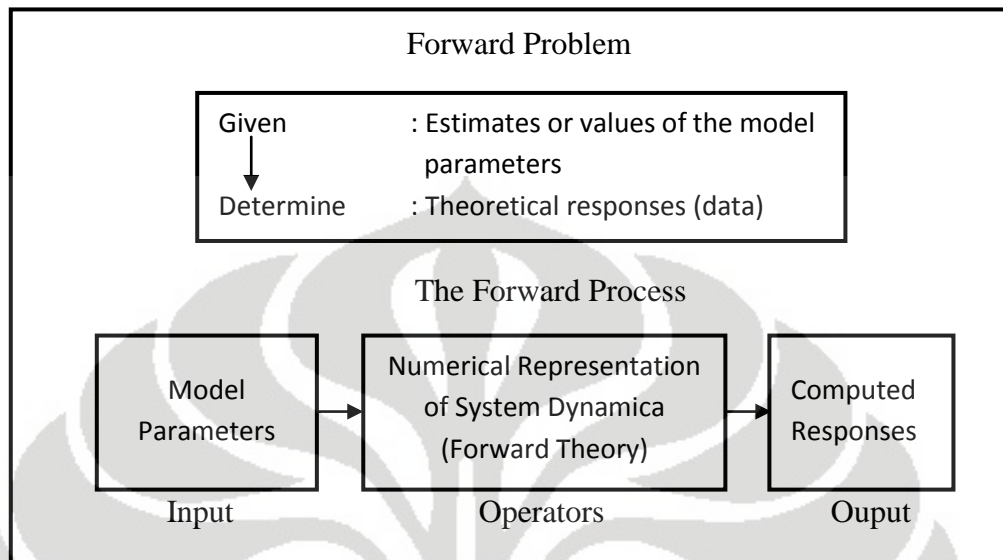
Dalam geofisika, kegiatan pengukuran lapangan selalu dilakukan berdasarkan prosedur yang sudah ditentukan. Kemudian, hasil pengukuran dicatat dan disajikan dalam bentuk tabel angka-angka pengukuran. Hasil pengukuran merupakan representasi dari kondisi dan sifat fisis batuan bawah permukaan. Tabel angka-angka itu selanjutnya disebut data observasi atau juga biasa disebut data lapangan.

Data eksperimen tersebut diharapkan dapat memberi informasi sebanyak-banyaknya, tidak sekedar mengenai sifat fisis batuan saja, melainkan juga kondisi geometri batuan bawah permukaan dan posisi kedalaman batuan tersebut. Informasi itu hanya bisa didapat bila diketahui hubungan antara sifat fisis batuan tersebut dan data observasinya. Penghubung dari keduanya hampir selalu berupa persamaan matematika atau biasa disebut sebagai model matematika. Maka dengan berdasarkan model matematika itulah, parameter fisis batuan dari data observasi dapat diekstrak. Proses ini disebut proses pemodelan *inversi* atau istilah asingnya disebut *inverse modelling*, lihat Gambar 3.1



Gambar 3.1 Alur Pemodelan Inversi (Meju, 1994)

Sementara proses kebalikannya dimana ingin diperoleh data prediksi hasil pengukuran berdasarkan parameter fisis yang sudah diketahui, maka proses ini disebut proses *forward* atau *forward modelling*, lihat Gambar 3.2



Gambar 3.2 Alur Pemodelan Forward (Meju, 1994)

Proses inversi adalah suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan. Di dalam proses inversi, kita melakukan analisis terhadap data lapangan dengan cara melakukan *curve fitting* (pencocokan kurva) antara model matematika dan data lapangan. Tujuan dari proses inversi adalah untuk mengestimasi parameter fisis batuan yang tidak diketahui sebelumnya (*unknown parameter*). Proses inversi terbagi dalam level-level tertentu mulai dari yang paling sederhana seperti *fitting* garis untuk data seismik refraksi sampai kepada level yang rumit seperti tomografi akustik dan *matching* (pencocokan) kurva resistivity yang multidimensi (Supriyanto, 2007). Contoh problem inversi dalam bidang geofisika adalah :

1. Penentuan struktur bawah tanah
2. Estimasi parameter-parameter bahan tambang
3. Pemodelan respon *lithosphere* untuk mengamati proses sedimentasi
4. Analisis sumur bor pada hidrogeologi

Seperti telah dijelaskan pada Bab I, bahwa penulis akan menggunakan pemodelan inversi untuk memodelkan data gravitasi baik menggunakan data sintetik maupun data real.

Permasalahan Inversi Gravitasi biasanya berkaitan dengan sampel data yang diskrit, tidak akurat dan tidak teratur yang mengandung informasi tentang distribusi anomali massa bawah permukaan dimana sumber anomali gravitasi dapat terdeteksi. Karakterisasi permasalahan inversi adalah solusinya yang tidak unik (Camacho et al., 2002).

Hal tersebut membutuhkan geologi dan hipotesa matematika yang membatasi masalah dan memungkinkan untuk mendapatkan hasil yang realistis. Sebagai contoh, biasanya pendekatan terdiri dari pembatasan kemungkinan kontras densitas dari struktur anomali dan kemudian mencari geometri dari bodi anomali. Prosedur diatas berhubungan dengan suatu keadaan tidak linear (Camacho et al., 2002).

Dalam kasus seperti ini, metode-metode tradisional untuk pendekatan non-linier bekerja secara iterasi, misalnya dengan cara perhitungan gradien (Farquharson dan Oldenburg, 1998 dalam Camacho et al., 2002). Dimulai dari perkiraan solusi awal. Metode-metode ini tergantung pada kualitas model awal untuk menentukan parameter geometris yang tidak diketahui dan untuk menjamin konvergensi dari proses tidak linear.

Kemudian diusulkan metode 3D (tiga dimensi) inversi gravitasi terinspirasi oleh metode Rene (1986, dalam Camacho et al., 2002) dan didasarkan pada proses "Growth" yang bekerja dengan cara eksplorasi kemungkinan model dengan pembatasan untuk kontras densitas (Camacho et al., 2000 dalam Camacho et al., 2002).

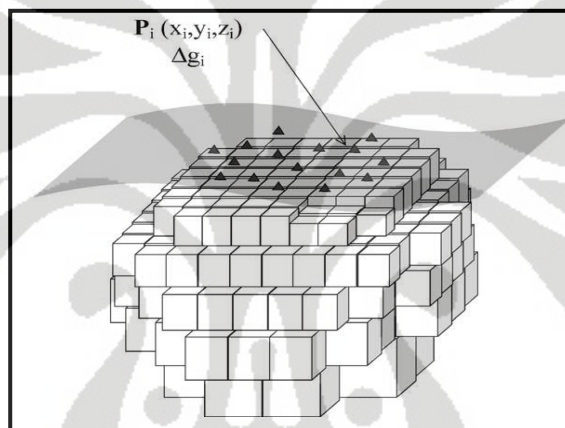
Sebelum masuk pada penjelasan formula matematis dan algoritma pemrograman terlebih dahulu akan dijelaskan mengenai deskripsi dari tiga subroutine program yang menyusun program Inversi Gravitasi 3-Dimensi ini, yaitu :

- 1) "PARAM" merupakan suatu program pendahuluan untuk pilihan parameter.
- 2) "GROWTH" merupakan program utama untuk inversi gravitasi.

3) “SECTIONS” merupakan suatu program sederhana untuk visualisasi hasil. Pada program “SECTIONS” dapat juga ditampilkan topografi, anomali hasil pengukuran dan perhitungan beserta *error*-nya dan gravitasi regional dari daerah penelitian.

3.2 Formula Matematis

Perhatikan sebuah kumpulan data gravitasi pada n stasiun gravitasi yang terdistribusi tidak teratur (lihat gambar 3.3). ketidakpastian yang terdapat pada data gravitasi digambarkan sebagai suatu matriks data kovarian (n,n) , Q_D (Tarantola, 1987), dimana elemen $q_{ij} = 0$, untuk $i \neq j$ dan $q_{ii} = e_i^2$, dan e_i , $i = 1, \dots, n$ merupakan standar deviasi dari nilai gravitasi.



Gambar 3.3 Sketsa stasiun gravitasi dan grid 3D jajaran-genjang yang merepresentasikan volume bawah permukaan yang bertetangga. (Camacho et al., 2002)

Dimana :

(x_i, y_i, z_i) , $i = 1, \dots, n$, merupakan koordinat planar (koordinat UTM)

P_i = elevasi stasiun gravitasi

Δg = anomali gravitasi (Bouguer)

Untuk menentukan geometri anomali bodi, disusun volume bawah permukaan yang bertetangga menjadi sebuah grid 3D dari m sel yang bersebelahan. Sel dasar yang diadopsi j , $j = 1, \dots, m$ merupakan jajaran genjang yang tertarik, untuk tiap unit massa densitas pada titik survey, P_i , $i = 1, \dots, n$, yang digambarkan sebagai a_{ij}

dan dapat dihitung berdasarkan persamaan (3.1) (Pick, 1973 dalam Camacho et al 2002).

$$a_{ij} = -G \left[\left[x \ln(y + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}) + y \ln(x + (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}) + z \arctan \right. \right. \quad (3.1)$$

$$\left. \left. \times (z(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} x^{-1} y^{-1}) \right] \frac{u_2^j - x_i}{u_1^j - x_i} \frac{v_2^j - y_i}{v_1^j - y_i} \right] \frac{w_2^j - z_i}{w_1^j - z_i},$$

Dimana :

- G merupakan konstanta gravitasi
- u_1^j, u_2^j untuk koordinat x
- v_1^j, v_2^j untuk koordinat y
- w_1^j, w_2^j untuk koordinat z
- Biasanya diandaikan $m > n$

3.3 Algoritma Pemrograman

Dalam komputasi, algoritma merupakan kumpulan perintah untuk menyelesaikan suatu masalah. Perintah-perintah ini dapat diterjemahkan secara bertahap dari awal hingga akhir. Masalah tersebut dapat berupa apa saja, dengan catatan untuk setiap masalah, ada kriteria kondisi awal yang harus dipenuhi sebelum menjalankan algoritma. Algoritma akan dapat selalu berakhir untuk semua kondisi awal yang memenuhi kriteria.

Pada kasus ini, bodi anomali akan bertanggung jawab terhadap anomali gravitasi hasil pengamatan yang akan ditentukan sebagai suatu susunan atau pertumbuhan sel prisma dengan kontras densitas yang telah ditentukan.

Terlepas dari data dan partisi bawah permukaan, karakteristik elemen ketiga dari metode inversi adalah adanya himpunan kontras densitas yang ditetapkan untuk bodi anomali. Namun ada juga pertimbangan beberapa tambahan kontras densitas untuk mengisi sel-sel dan kemudian membangun bodi anomali.

Keuntungan yang menarik dari metode ini adalah mempertimbangkan berbagai kemungkinan baik kontras densitas positif maupun negatif (kelebihan dan defisit densitas anomali dari non-anomali bawah permukaan).

Jadi untuk tiap j th sel, dapat diterima tiga kemungkinan model anomali kontras densitas: $\Delta\rho_j^-$, $\Delta\rho_j^+$ dan 0 (bukan anomali). Kemudian pengisian sel dengan kontras densitas yang mungkin untuk bodi anomali ditentukan selangkah demi selangkah pada proses “*Growth*”.

Jadi $\Delta\rho_j^-$, $\Delta\rho_j^+$, $j=1..,m$ dapat mewakili nilai-nilai konstan untuk seluruh volume bawah permukaan, dan juga nilai-nilai yang berbeda secara spasial yang ditentukan (misalnya, menurut zona yang ditentukan atau sebagai hasil dari stratifikasi vertikal geologi berdasarkan hipotesis, tetapi hanya tiga nilai, nol positif dan negatif, untuk setiap sel) atau secara “temporer” nilai-nilai variabel yang melewati proses pertumbuhan.

Dengan unsur-unsur dasar ini (pembagian medium ke sel prisma 3D dan adanya tambahan nilai-nilai kontras densitas) program mencoba untuk menentukan bodi anomali dengan proses “ekspansi” atau “*growth*”, selangkah demi selangkah mengisi sel-sel grid 3D dengan kontras densitas yang ditentukan.

Algoritma bekerja selangkah demi selangkah. Untuk langkah k th, pertumbuhan bodi anomali disusun dari sel ($k-1$), diisi dengan tambahan kontras densitas yang mungkin. Sel baru dicari (di antaranya benar-benar tidak dipenuhi sel) harus diisi, dengan kontras densitas yang ditentukan, sebagai perluasan baru dari bodi anomali

Kondisi untuk memilih sel pada ekspansi k th adalah bahwa struktur yang baru (sebelumnya disusun oleh $k-1$ ditambah sel sel yang dianggap baru) cocok dengan skala faktor yang positif dari anomali gravitasi yang diamati. Kemudian proses terus menghasilkan ekspansi lebih lanjut dari bodi anomali. Ketika bodi anomali mencapai ukuran “*real*”, faktor skala model anomali sesuai dengan anomali pengamatan dan sangat dekat dengan 1, dan kemudian algoritma berhenti.

Kemudian jika dilakukan adopsi kontras, adopsi kontras tambahan tersebut secara drastis mengurangi ketidakpastian, tetapi pada kenyataannya menerima kontras densitas baik positif maupun negatif menghasilkan lagi masalah yang tidak unik, sehingga memerlukan hipotesis umum baru yang memungkinkan untuk mencari solusi yang pasti untuk inversi gravitasi ini.

Sebagai langkah pertama, beberapa model yang mungkin (setiap sel dan setiap kontras densitas yang ditentukan) dieksplorasi untuk memilih sel pertama (dengan kontras positif atau negatif yang ditentukan) sehingga efek gravitasi yang sesuai pada stasiun merupakan tempat yang paling cocok. Dengan faktor skala $f \geq 1$, sesuai untuk anomali pengamatan

Kemudian, elemen kedua dicari, sekali lagi, dengan cara eksplorasi, sehingga model yang disusun oleh elemen kedua cocok, dengan faktor skala f_2 ($f_1 \geq f_2 \geq 1$) dari anomali yang diamati. Proses "growth" terus berlangsung selangkah demi selangkah. Meskipun demikian, sudah dari pemilihan elemen kedua positif-negatif memperkenalkan pilihan tidak unik dalam inversi. Nilai gravitasi yang dibuat dengan model (k-1) ini pada stasiun i th adalah :

$$g_i^{(k-1)} = \sum_{j=\lambda_1}^{\lambda_{k-1}} a_{ij} \Delta \rho_j \quad (3.2)$$

Sebuah sel baru dicari untuk kemudian diisi dengan demikian memperluas model. Kekuatan yang lebih besar dari metode inversi, kita mencoba untuk secara simultan menyesuaikan trend regional yang sederhana, linier misalnya, dengan koefisien yang tidak diketahui p_o, p_x, p_y ($P_o^{(k)}, P_x^{(k)}, P_y^{(k)}$ untuk setiap langkah k).

Kemudian dilakukan tes setiap j th, $j \neq \lambda_1, \dots, \lambda_{k-1}$, sel bebas dan setiap kontras densitas yang mungkin berturut-turut $\Delta \rho_j$ (i.e., $\Delta \rho_j^+, \Delta \rho_j^-$) mengandung residual $v_i^{(k)}$ ($v_i^{(k)}$ ($\Delta \rho_j^+$), $v_i^{(k)}$ ($\Delta \rho_j^-$) secara berurutan) untuk stasiun gravitasi dalam bentuk :

$$\Delta g_i - (g_i^{(k-1)} + a_{ij} \Delta \rho_j) f_k - (p_o^{(k)} + p_x^{(k)}(x_i - x_M) + p_y^{(k)}(y_i - y_M)) = v_i^{(k)} \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.3)$$

K-model yang dibentuk oleh k-1 diisi sel sebelumnya dan sel j th diuji dengan salah satu kemungkinan kontras densitas. Untuk model ini, nilai-nilai yang tidak diketahui $f_k, P_o^{(k)}, P_x^{(k)}, P_y^{(k)}$ untuk faktor skala dan tren linear, ditentukan dengan suatu penyesuaian kuadrat yang sesuai dengan anomali model k th "actual" ini untuk data gravitasi yang diamati.

Memperhitungkan pilihan positif dan negatif, dan kecenderungan yang tidak diketahui dengan minimalisasi residual $v_j^{(k)}$ tidak cukup untuk menentukan kesesuaian sel dan kontras densitasnya untuk langkah k ini. Untuk menjawab

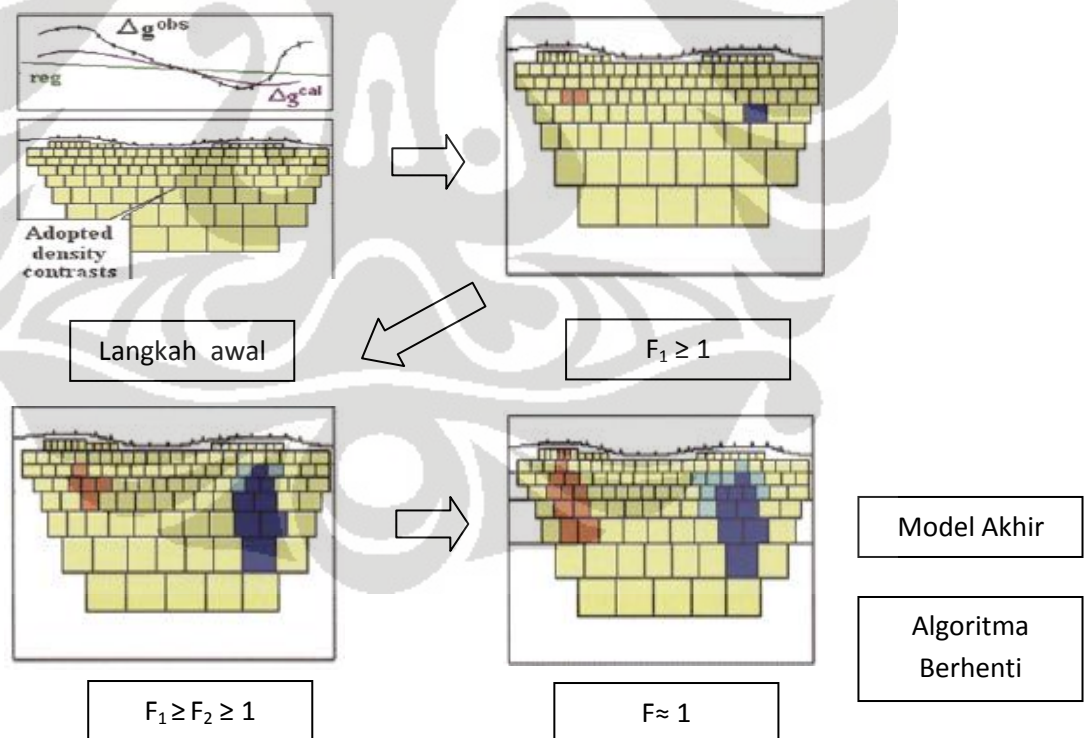
pertanyaan tersebut, diusulkan meminimalisasi kondisi campuran residual dari pengaturan (“*fitness*”) dan massa total anomali (“*smoothness*”):

$$\mathbf{v}_k^T \mathbf{Q}_D^{-1} \mathbf{v}_k + \lambda f_k^2 \mathbf{m}_k^T \mathbf{Q}_M^{-1} \mathbf{m}_k = \min, \quad (3.4)$$

Dimana :

- \mathbf{v}_k = vektor kolom dari residual untuk tiap langkah k th.
- \mathbf{m}_k = vektor kolom dari kontras densitas terdapat di model k th (yang telah ditentukan sebelumnya $\Delta\rho_{\lambda 1}, \dots, \Delta\rho_{\lambda k}$ ditambah $\Delta\rho_j$ yang telah dites untuk tiap langkah)
- λ = faktor positif yang tetap untuk menyeimbangkan model *fitness* dan model *smoothness*.
- \mathbf{Q}_M adalah matriks kovarians yang sesuai dengan kemampuan menentukan faktor atau kepekaan dari grid sel-sel 3D dari stasiun gravitasi.

Alur Algoritmanya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.4 Alur algoritma pemrograman (Berino and Camacho, 2008)

Dari pembahasan tersebut dapat disimpulkan bahwa metode inversi gravitasi yang diusulkan ini memiliki keunggulan :

- 1) Data yang tidak akurat, non planar dan distribusi yang tidak teratur dapat diterima;
- 2) Model sebelumnya tidak terlalu diperlukan, tetapi jika ada model tersebut dapat digabungkan dalam proses inversi
- 3) Memerlukan keadaan 3D.
- 4) Jumlah bodi anomali yang tidak berhingga dapat diatur.
- 5) Suatu pengaturan dari level pencocokan dan model yang rumit dapat dilakukan.
- 6) Trend regional sederhana dapat diatur secara simultan dan
- 7) Kontras densitas positif maupun negatif dapat diterima secara simultan pada model.

3.3 Modifikasi Program

Modifikasi yang dilakukan pada program ini dimaksudkan untuk menggabungkan 3 program yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya dan merubah tampilan dari program tersebut yang semula ditampilkan dalam platform DOS kemudian diubah sehingga dapat ditampilkan dalam platform Windows.

Pada program pemodelan inversi gravitasi 3-Dimensi ini ada beberapa kekurangan yang ditemukan, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Penulisan program tidak terstruktur, sehingga menyulitkan pembacaan alur program
2. Tidak ada keterangan yang ditampilkan dimonitor pada saat memasukkan data. Hal ini tentunya akan membingungkan pemakai program ini saat akan memasukkan data atau parameter yang dibutuhkan program.
3. Data masukkan tidak disimpan dalam file, sehingga jika terjadi kesalahan maka pemasukkan data harus diulang.
4. Output program hanya ditampilkan berupa angka-angka saja.
5. Tampilan kurang menarik dan kurang *user friendly* sehingga pemakai masih sering mengalami kesulitan.

```

-----
          GROWTH Gravity Inversion
    PARAM: Selection of the model parameters
-----

    (input 0 for default (def.)          )
    (capital letters Y,N mean suggested option )

    DEFINING A 3-D GRID OF PRISMATIC CELLS

    >> Scale factor for coordinates (def. .240) ? 0
    >> Center of local coordinates (def. 492240. 4280160. 120.) ? 0
    >> Depth (m) of model bottom (def. -1236.) ? 0
    >> Side (m) of the smallest prisms (e.g. 168.) ? 168
    >> Top margin of the model (m) (def. 84.) ? 0
    >> Max. value to limit the volume: 0,...,100 (def. 80) ? 0
    >> Coeff. for vertical enlarge 0,...,1 (def. .10) ? 0
    >> Previous model (file MOD.DAT): Yes(1)/No(0) ? 0
    ... please wait .....

    ==> Number of cells = 410          Continue(0)/ abort(1) ? 0

    DEFINING PRESCRIBED DENSITY CONTRASTS (- and +)

    >> Stratification of the anomalous contrasts: y(1)/N(0) ? 0
    >> Extreme density contrasts (kg/m3) (e.g. -500,500) ? 0,500

    DEFINING OTHER VALUES FOR THE FURTHER INVERSION

    >> Lambda factor >0 (e.g. 5.0) ? 5
    >> Smooth. coefficient : 0,...,30 (def. 6) ? 0
    >> Random. coefficient : 1,...,10 (def. 8) ? 0
    >> Further weighting of the gravity data: y(1)/N(0) ? 0
    >> Further use of a priori model errors: y(1)/N(0) ? 0
    >> Number of a priori horiz. discont. 0,...,4 (def. 0) ? 0
    >> Fixed values for regional trend: y(1)/N(0) ?

```

Gambar 3.5 Program PARAM ketika dijalankan

```

-----
          GROWTH Gravity Inversion

    SECTIONS: several views of data and model features
-----

    (press (Enter) for default (def.))

    >> Density model   file a12 (def. "mod.dat") ?
    >> Maximum error for prisms: 0,...,500 (def. 600) ?
    ==> Number of model prisms = 410

    >> Gravity data    file a12 (def. "gra.dat") ?
    ==> Number of gravity points = 420

    >> Base map       file a12 (def. "map.bln") ?
    ==> Number of base map points = 188

    >> Press (Enter)

```

Gambar 3.6 Program SECTIONS ketika dijalankan

```

-----
                GROWTH Gravity Inversion
SECTIONS: several views of data and model features
-----

1 Limits of figures, axis
2 Data: altitudes
3 Data: gravity anomaly
4 Data: gravity "error"
5 Adjusted anomaly
6 Residual anomaly
7 Regional trend
8 Model sections: "errors"
9 Model sections: "density"
10 Mass distrib. vs. depth
11 Mass of isolated bodies
99 Exit

>> Option ?

```

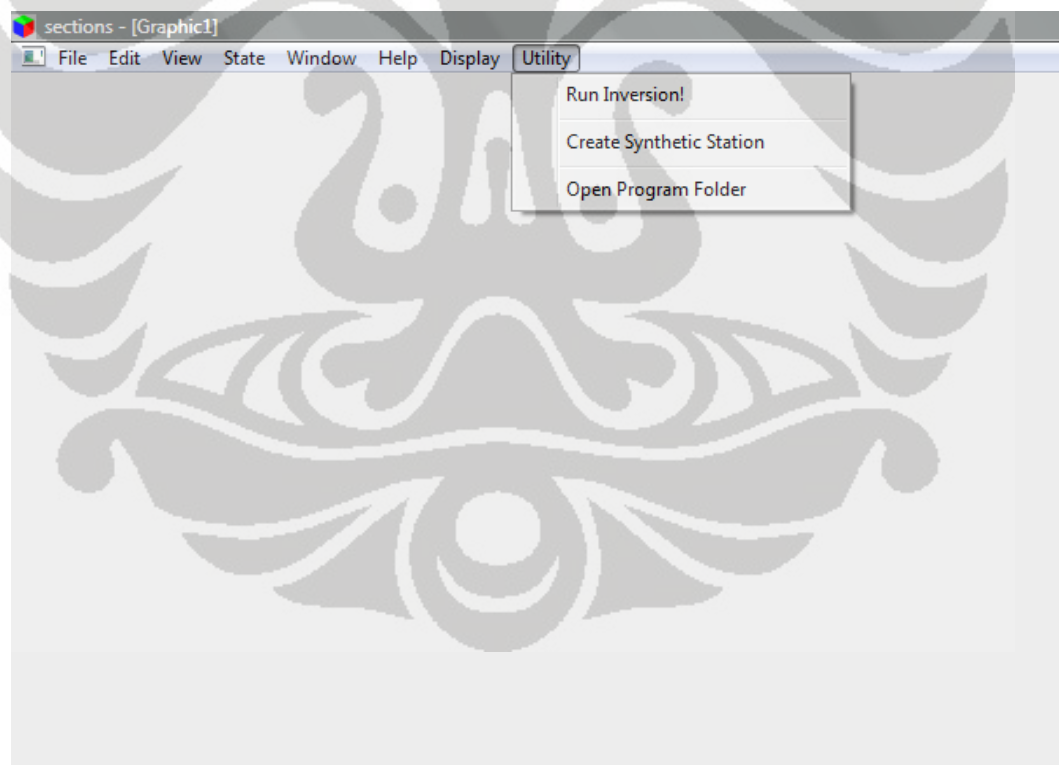
Gambar 3.7 Pilihan yang terdapat pada program SECTIONS

Hasil modifikasi yang dilakukan antara lain adalah :

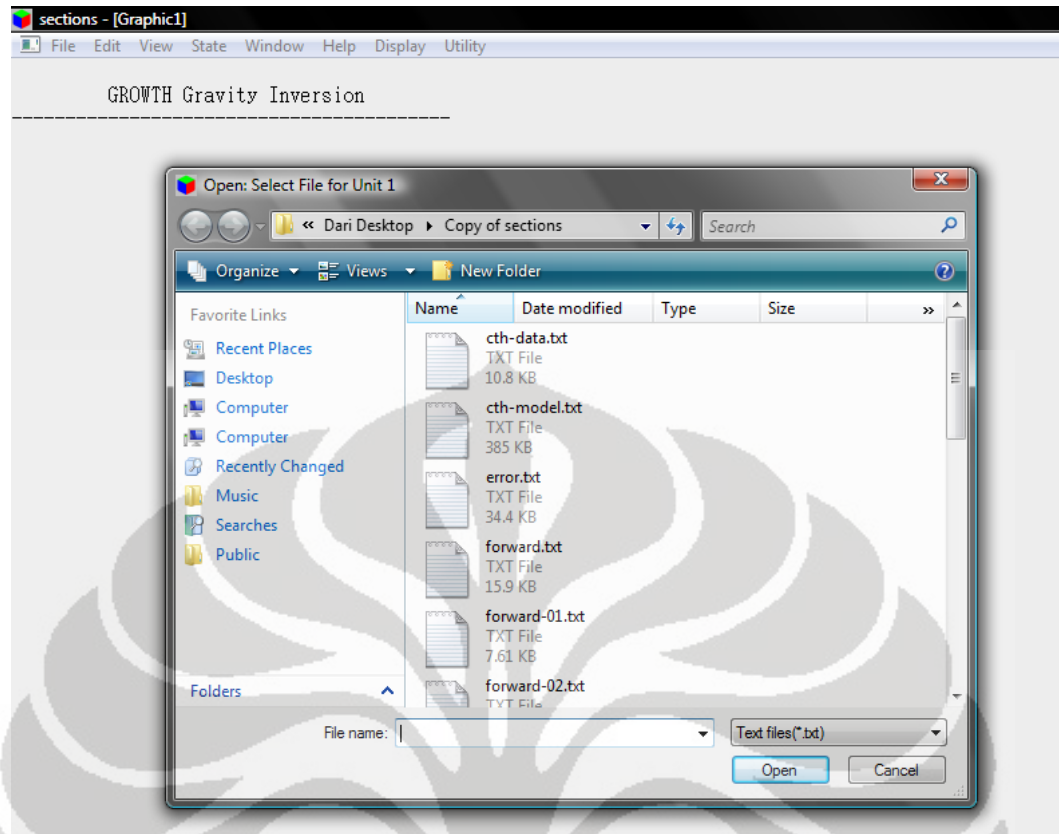
1. Mengubah tampilan program inversi gravitasi 3-Dimensi menjadi berbasis Windows bukan DOS lagi.
2. Dibuat kolom-kolom untuk memasukkan data lengkap dengan keterangan dan satuannya sehingga pemakai dapat dengan mudah memasukkan data.
3. Proses memasukkan data menjadi lebih mudah. Jika terjadi kesalahan dalam memasukkan data dapat langsung diperbaiki. Format data yaitu .txt
4. Pada program pemodelan inversi gravitasi 3-Dimensi yang baru ini juga dapat dibuat data sintetik



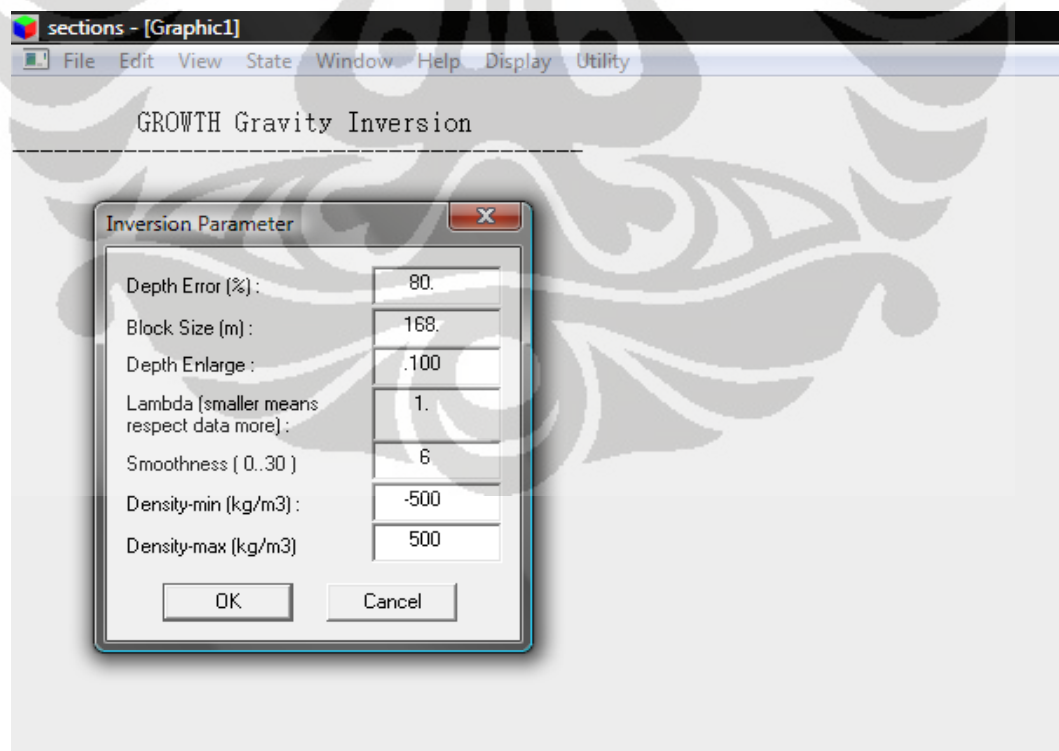
Gambar 3.8 Tampilan awal Program Inversi Gravitasi 3D hasil modifikasi



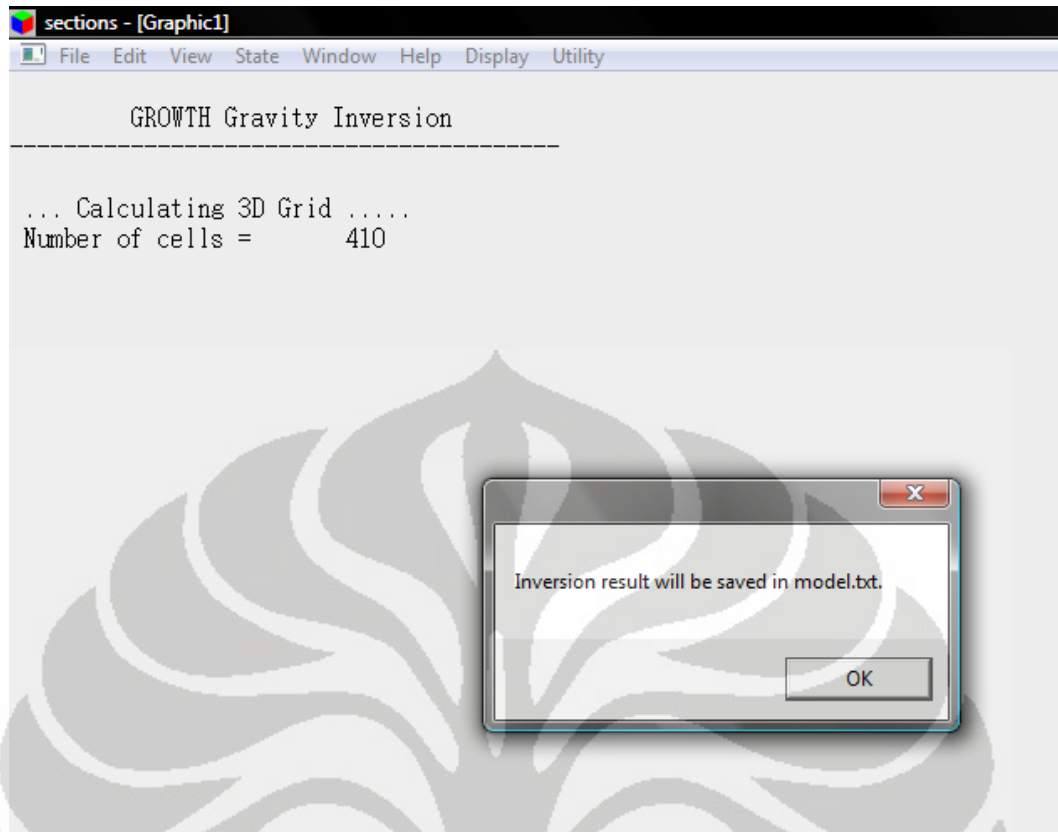
Gambar 3.9 Program Inversi Gravitasi 3D ketika dijalankan



Gambar 3.10 Proses input data



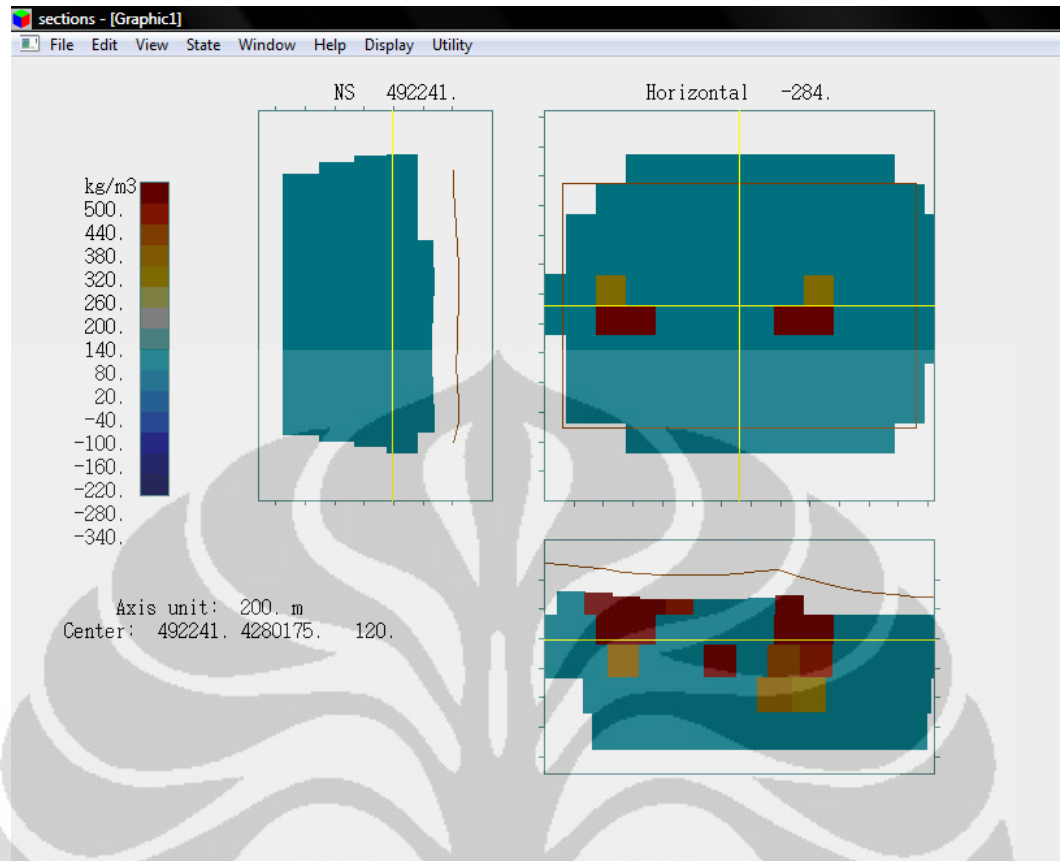
Gambar 3.11 Proses input parameter



Gambar 3.12 Proses inversi sedang berlangsung



Gambar 3.13 Pilihan pengaturan penampang pada program SECTIONS



Gambar 3.14 Pemodelan hasil inversi dari penampang yang telah dipilih

4.5 Pengujian Program

Pengujian program dilakukan dengan menggunakan dua model dengan spesifikasi tertentu yang dibuat melalui proses *forward*. Tujuan dilakukan pengujian program ini adalah untuk melihat bagaimana program ini dapat memodelkan suatu kondisi bawah permukaan dari bentuk benda yang sederhana, diantaranya bentuk kotak.

1. Model 1

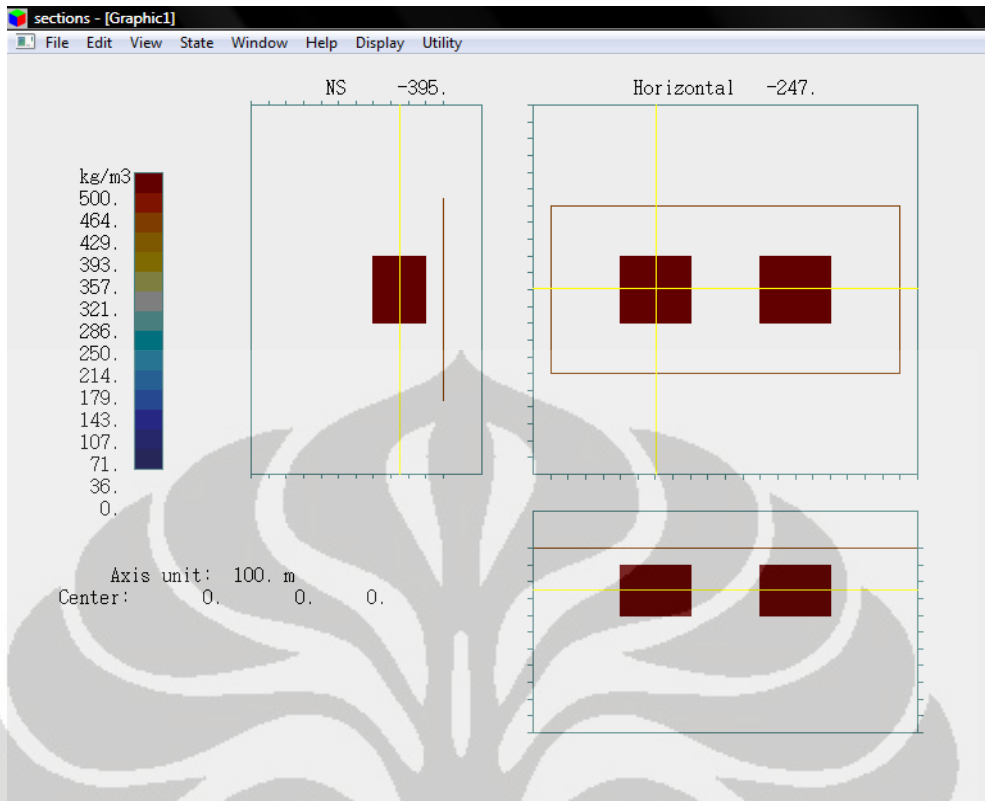
Kedalaman 100 - 500 m

Ukuran 400 m

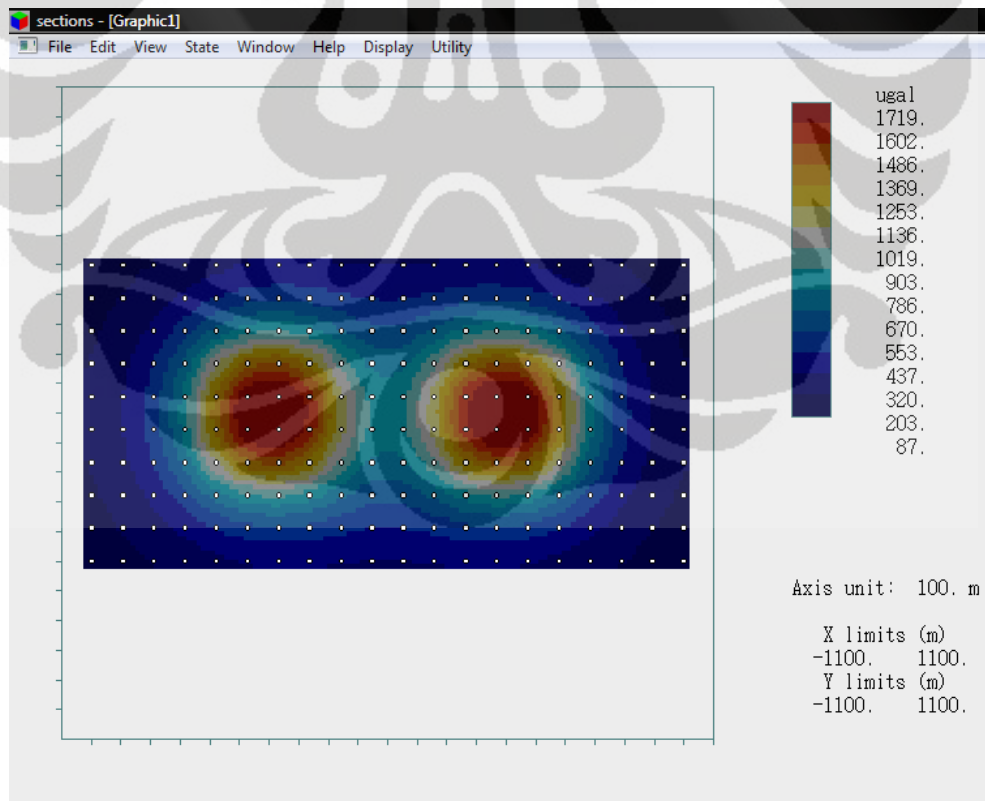
Densitas 500 kg/m^3

Jarak $x = 2 \text{ km}$ (20 stasiun) dan $y = 1 \text{ km}$ (10 stasiun)

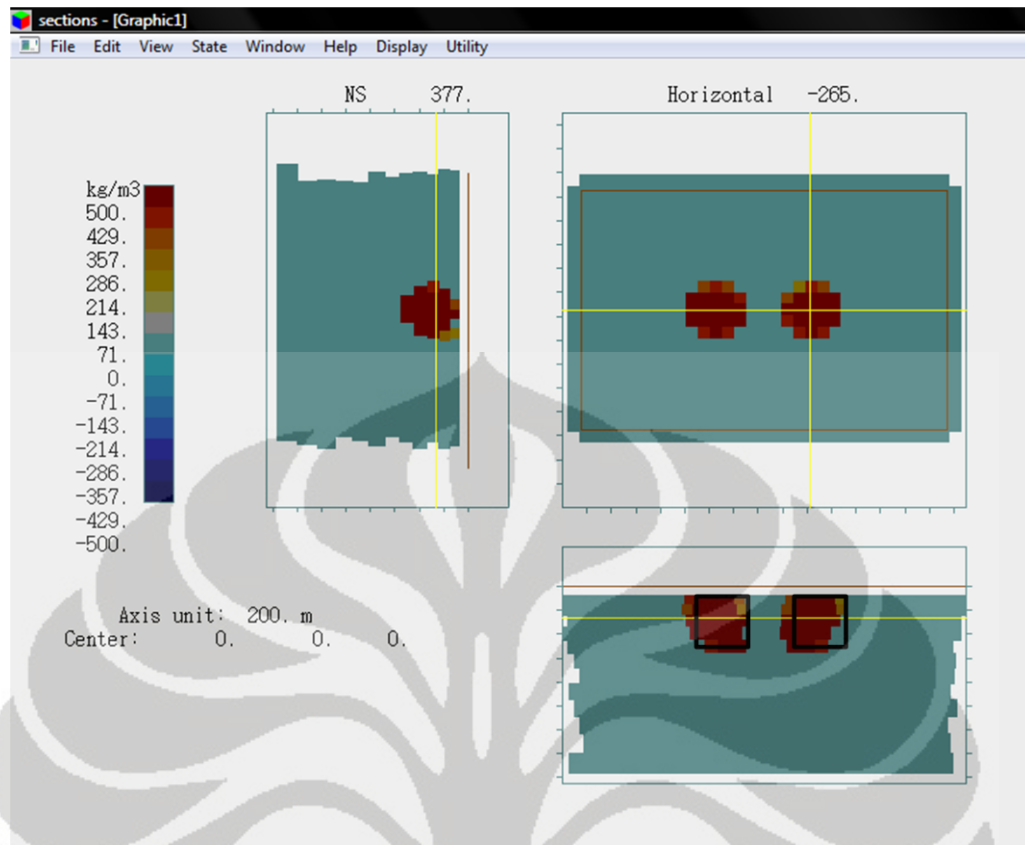
Pada model 1 ini terdapat 2 kotak, ternyata dengan program inversi ini dapat dimodelkan. Terlihat pada Gambar 3.15



Gambar 3.15 Pengujian Program dengan Model 1



Gambar 3.16 Plot Anomali Bouger hasil perhitungan program



Gambar 3.17 Pemodelan Inversi untuk model 1 (ukuran sel 50 m)

2. Model 2

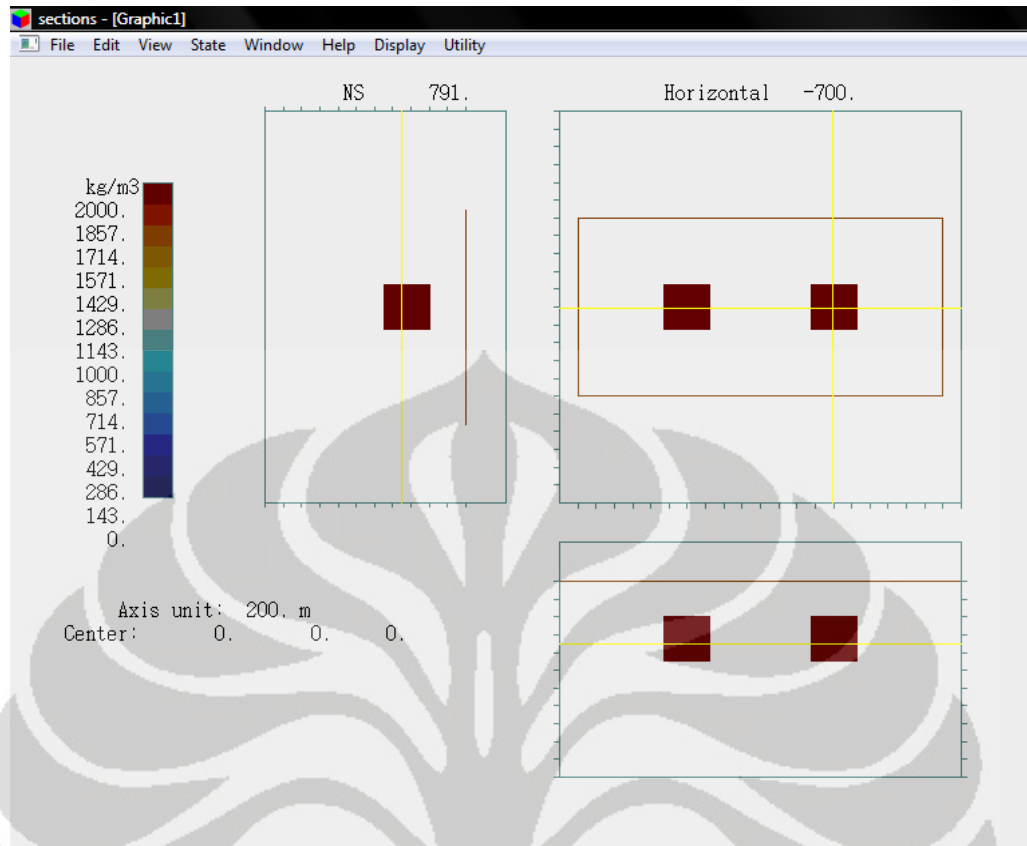
Kedalaman 400 - 900 m

Ukuran 400 m

Densitas 2000 kg/m^3

Jarak $x = 3 \text{ km}$ (20 stasiun) dan $y = 1 \text{ km}$ (10 stasiun)

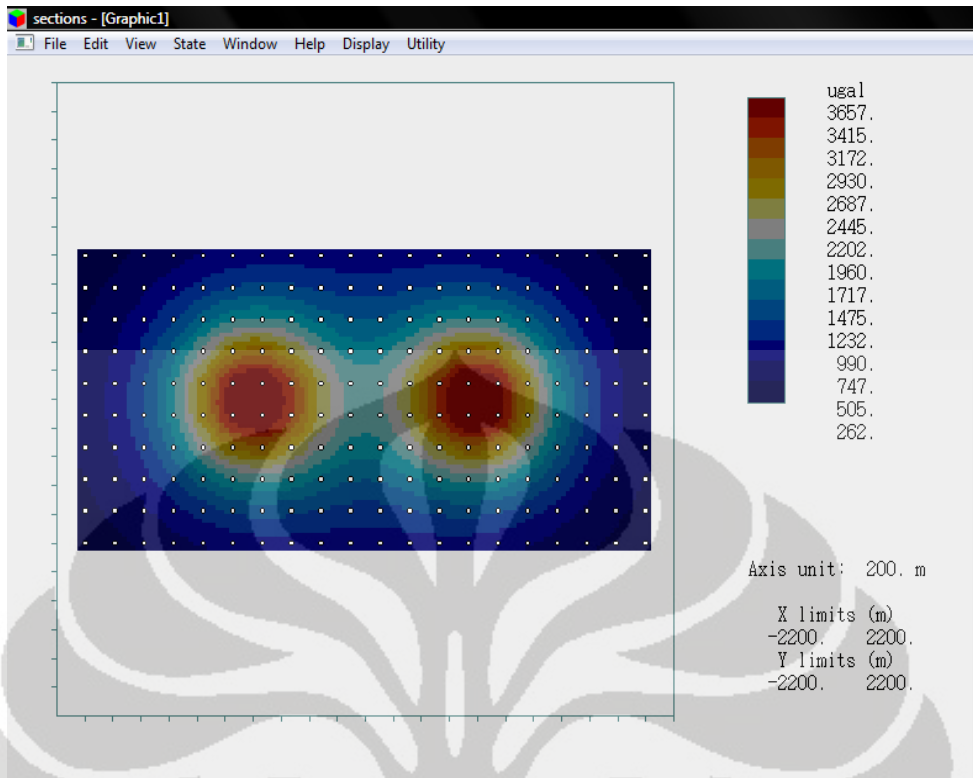
Pada model 2 ini terdapat 2 kotak, ternyata dengan program inversi ini dapat dimodelkan. Terlihat pada Gambar 3.18



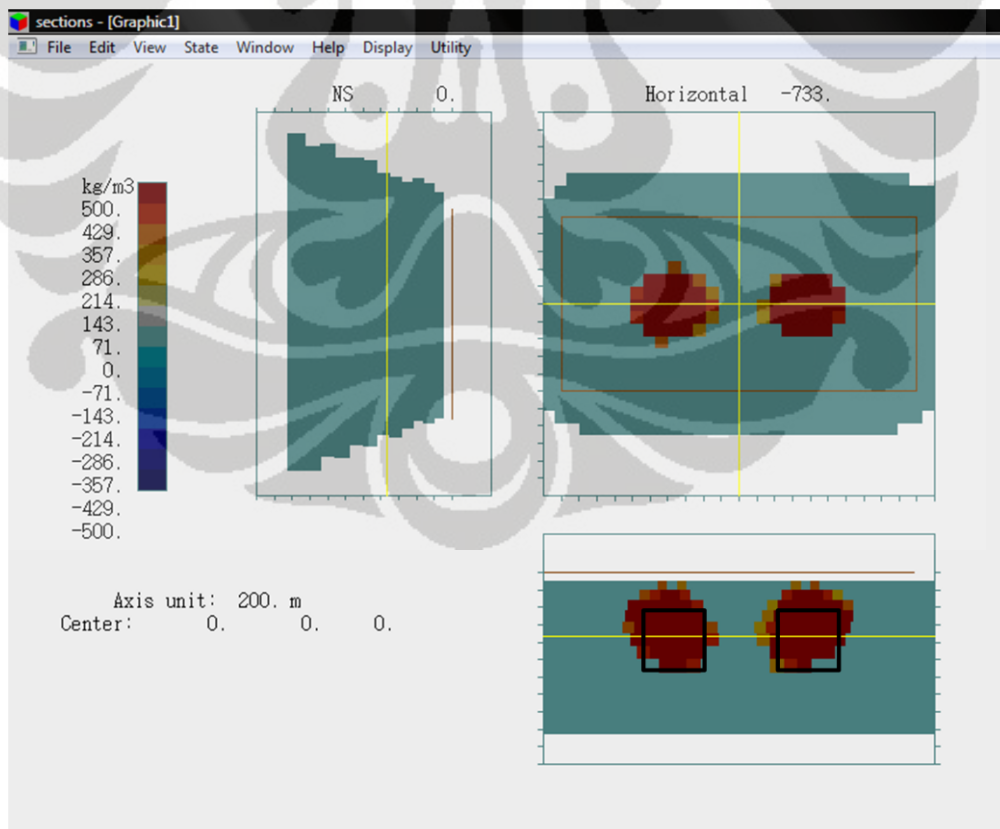
Gambar 3.18 Pengujian Program dengan Model 2

Pada pengujian program dengan kedalaman 400 – 900 m, model yang dihasilkan mengalami perubahan sehingga tidak tergambar dengan baik. 2 kotak yang dimodelkan ternyata hanya dianggap sebagai 1 bodi anomali oleh program inversi gravitasi 3D ini.

Melalui pengujian dengan menggunakan model 1 dan model 2 terlihat bahwa program bekerja dengan baik, sehingga dua model tersebut dapat dipetakan walaupun untuk memodelkan benda dengan kedalaman 400 – 900 m tidak terlalu baik tetapi masih bisa menunjukkan bahwa pada kedalaman tersebut terdapat benda anomali.



Gambar 3.19 Anomali Bouger hasil perhitungan program



Gambar 3.20 Pemodelan Inversi untuk model 1 (Ukuran sel 50 m)

BAB 4

PEMODELAN GRAVITASI 3-DIMENSI

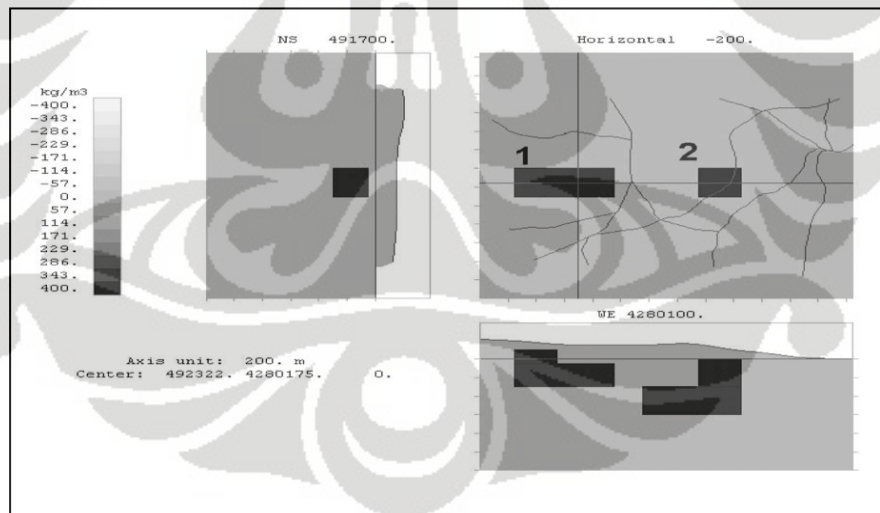
4.1 Pemodelan dengan data sintetik

Pemodelan dengan data sintetik ini menggunakan data yang terdapat pada program inversi. Pada data sintetik ini diberikan dua bodi anomali yang terkubur berbentuk huruf L dengan kontras densitas sebesar 400 kg/m^3 (Lihat Gambar 4.1). Beberapa kedalaman (selalu positif ke atas) mendefinisikan pembatasan permukaan horisontal untuk bodi geometris (100, 0, -50, -300, dan -600 m).

Massa anomali dan pusat-pusat massa bodi-bodi ini adalah:

1. Bodi 1 : massa = $264 \times 10^{11} \text{ kg}$
: pusat (X, Y, Z) = 4, 91, 559, 42, 80, 100; -134m
2. Bodi 2 : massa = $360 \times 10^{11} \text{ kg}$
: pusat (X, Y, Z) = 4, 92, 560, 42, 80, 100; -360m

Massa anomali keseluruhan : $624 \times 10^{11} \text{ kg}$ dengan kedalaman Z -264m.

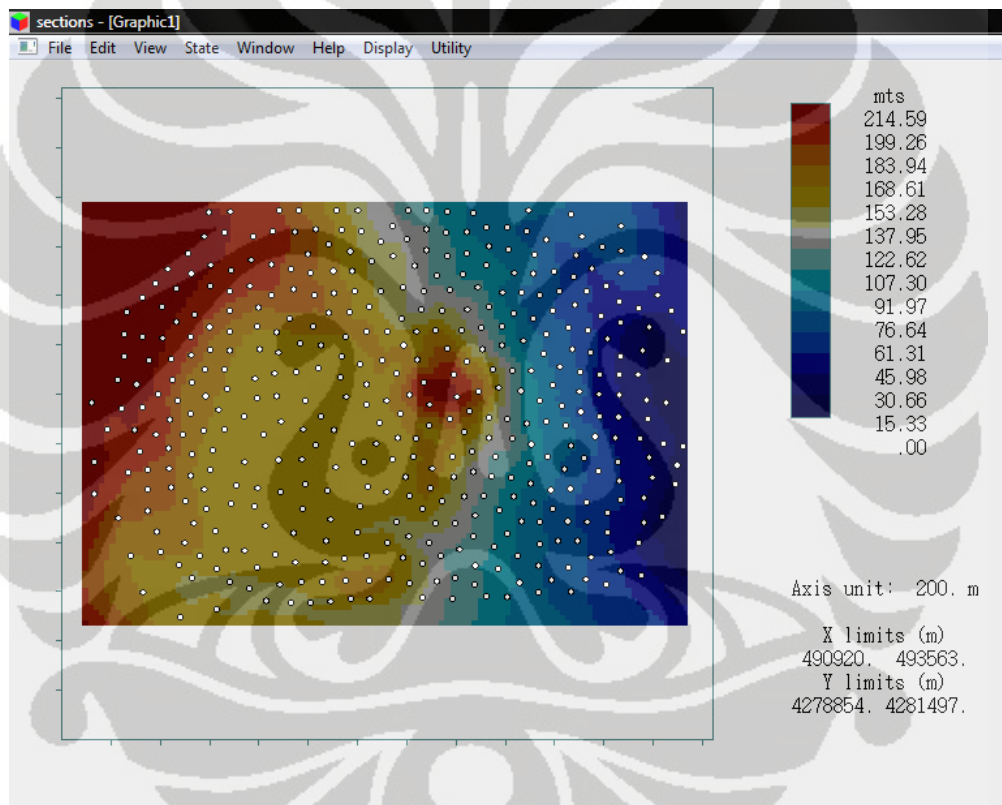


Gambar 4.1 Pemodelan dengan data sintetik (Camacho et al., 2002)

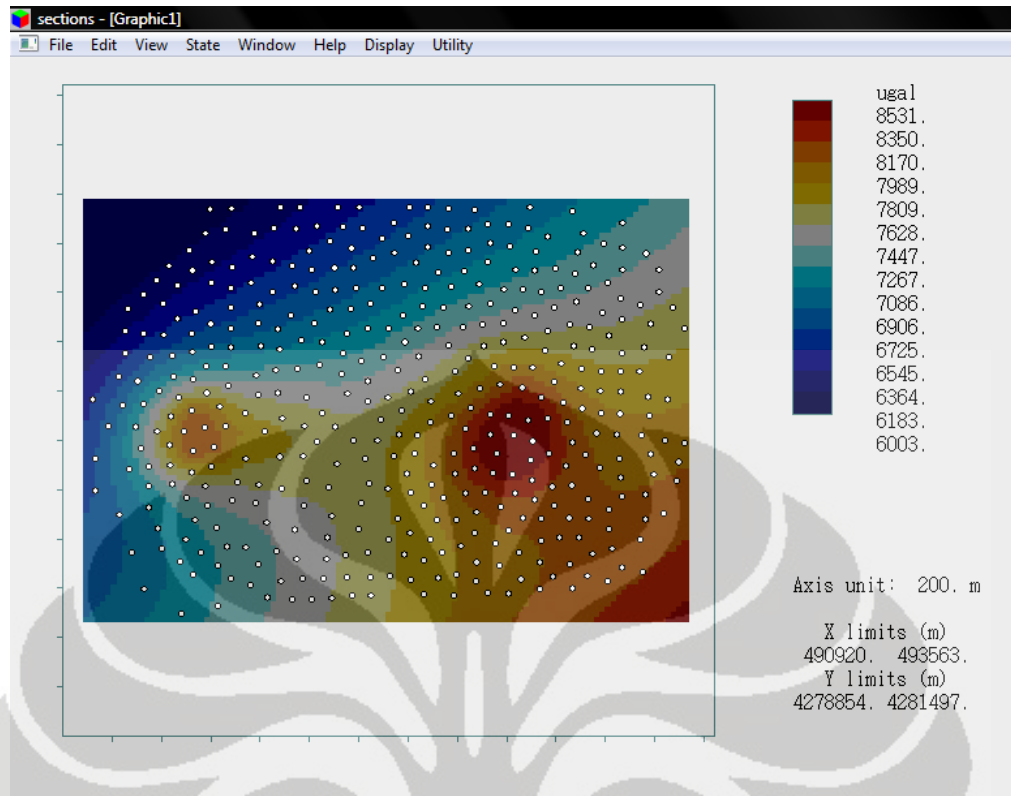
Pada kasus ini, untuk mengaplikasikan program gravitasi inversi seperti yang sudah didiskusikan sebelumnya. Program “PARAM” menyarankan nilai $\delta = 0.240$, $x_m = 4,92,240$, $y_m = 42,80,160$ dan $z_m = 120$. Untuk mendapatkan volume yang lebih terbatas dan mengadopsi parameter yang sesuai, diterapkan proses

inversi mulai dari model-model resolusi rendah yang memungkinkan untuk diperoleh tes dengan cepat dari nilai-nilai yang cocok untuk λ . Setelah Beberapa tes dengan peningkatan resolusi, didapatkan adopsi model terakhir sebagai berikut: ukuran sel terkecil = 25 m, jumlah sel $m=8500$, $\lambda=1,4$ (nilai kecil dekat dengan batas operasi).

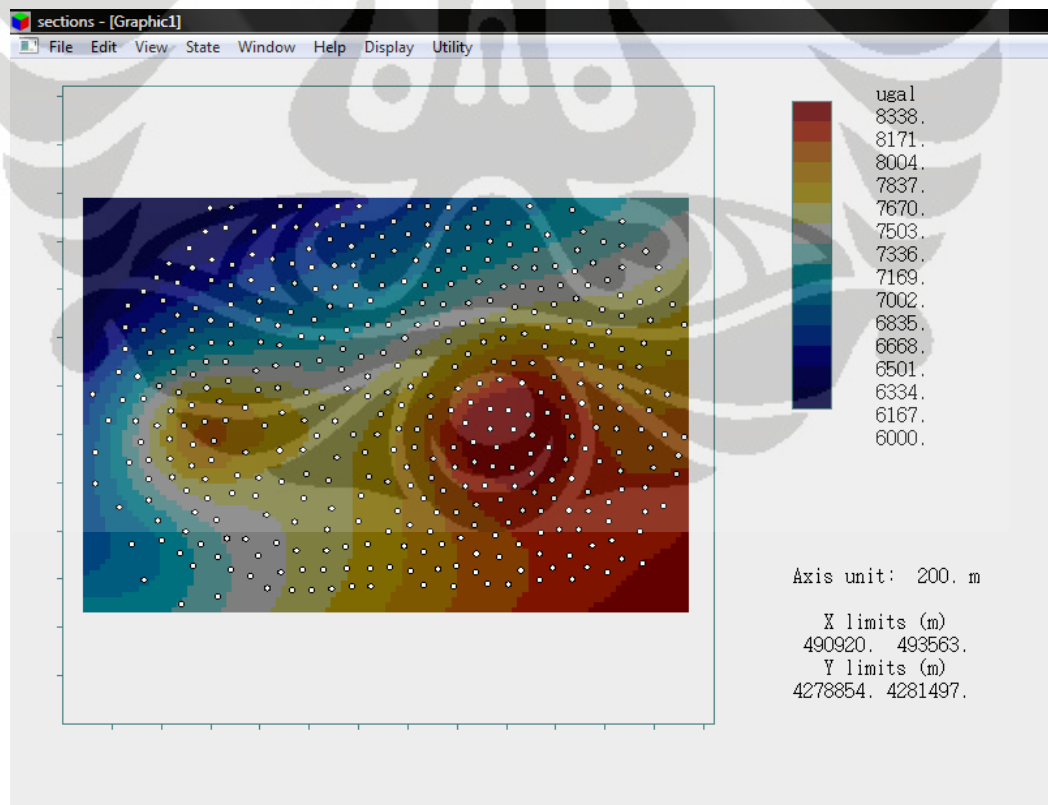
Gambar 4.2 – Gambar 4.6 merupakan hasil dari pemodelan menggunakan Program Inversi 3-Dimensi setelah semua parameter model dimasukkan. Parameter model tersebut berfungsi untuk memberikan kondisi awal dan pembatasan dari model yang dibuat.



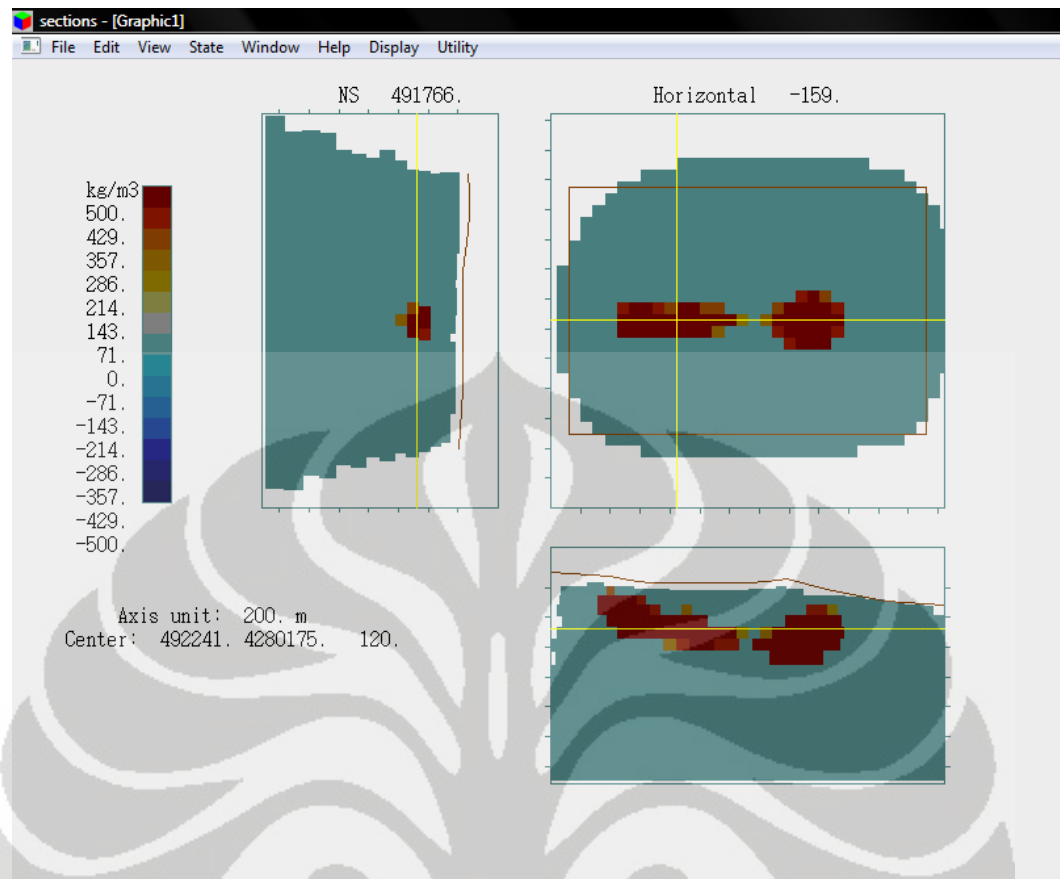
Gambar 4.2 Plot topografi



Gambar 4.3 Plot Anomali Bouger



Gambar 4.4 Plot Anomali Bouger Hasil perhitungan program



Gambar 4.5 Hasil inversi dengan data Sintetik

Dari hasil pemodelan tersebut didapatkan informasi seperti dibawah ini :

Massa anomali dan pusat-pusat massa bodi-bodi ini adalah:

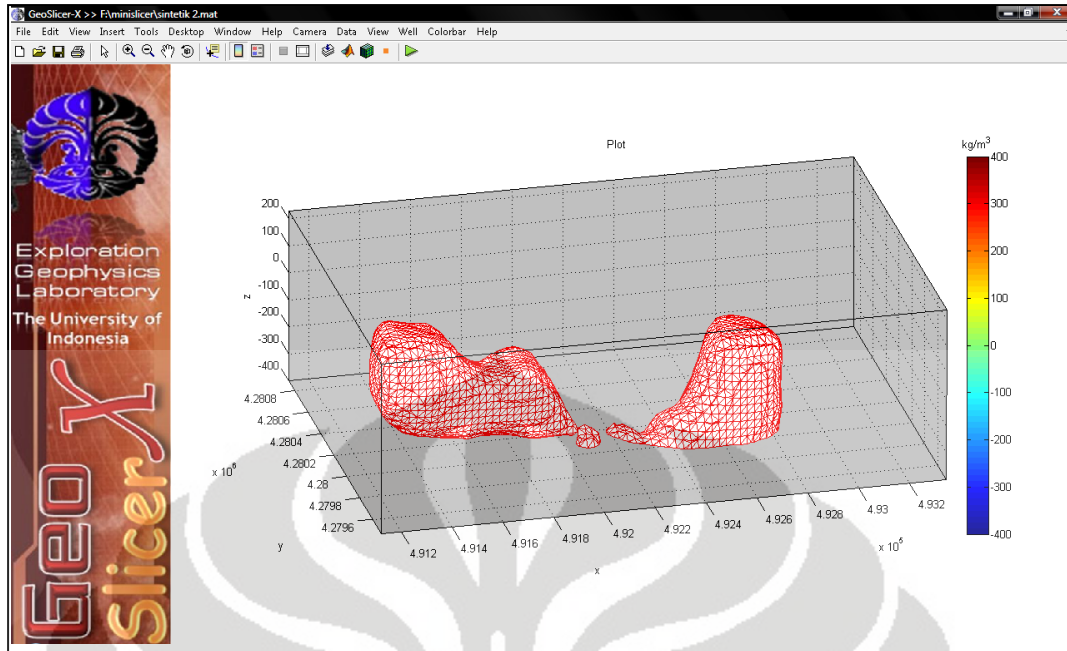
1. Bodi 1 : massa = 274×10^{11} kg; kontras = 400 kg/m^3
: pusat (X, Y, Z) = 4, 91, 582, 42, 80, 102; -147m
2. Bodi 2 : massa = 328×10^{11} kg; kontras = 400 kg/m^3
: pusat (X, Y, Z) = 4, 92, 576, 42, 80, 102; -336m

Massa anomali keseluruhan : 613×10^{11} kg (berkorespondensi dengan kontras densitas positif 607×10^{11} kg dan berkorespondensi dengan kontras densitas negatif 6×10^{11} kg) dengan kedalaman Z -250 m. Dekat dengan nilai sebenarnya.

Nilai-nilai yang didapatkan untuk trend regional yaitu :

$$p_0 = 6992 \text{ mGal}, p_x = 703 \text{ mGal/km and } p_y = 702 \text{ mGal/km}$$

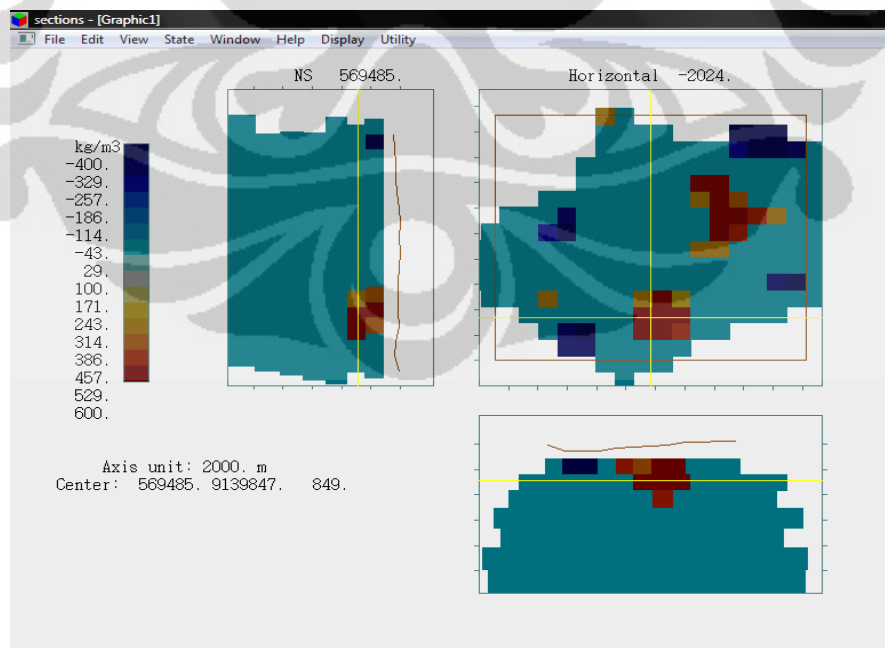
Untuk mendapatkan hasil pemodelan yang lebih jelas digunakan Geo Slicer untuk menampilkan hasil inversi tersebut. Akan tetapi ada perubahan bentuk pada bodi anomali tersebut sehingga tidak lagi berbentuk L.



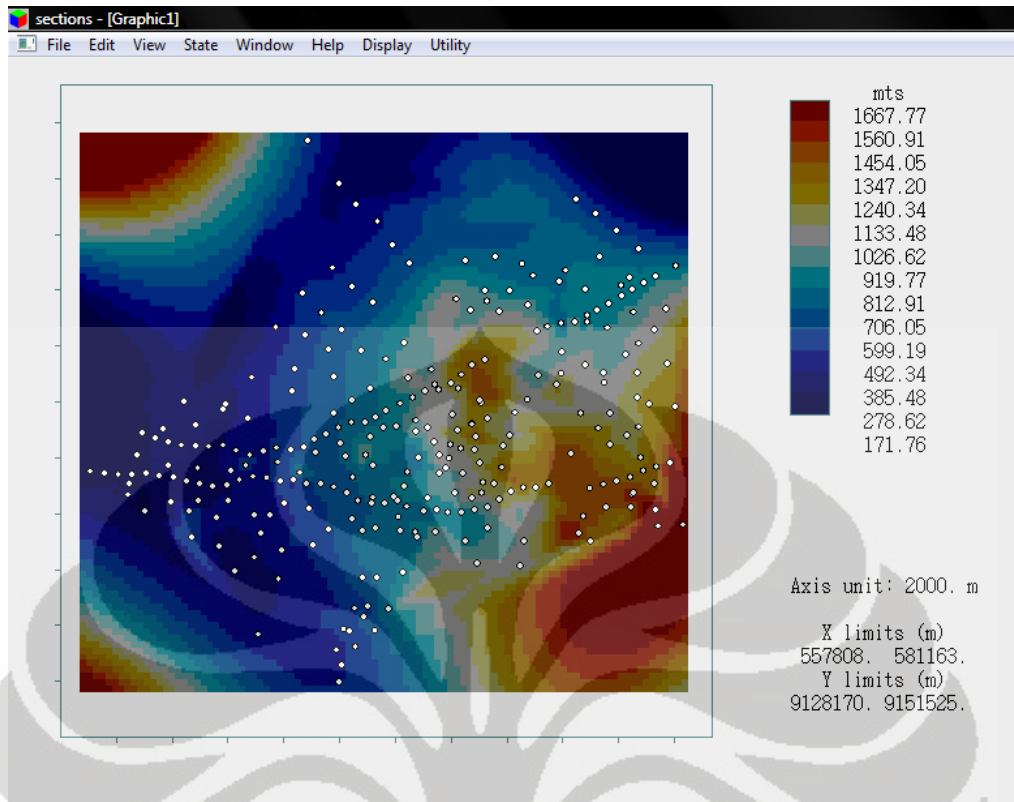
Gambar 4.6 Pemodelan data sintetik 3D berbentuk blok

4.2 Pemodelan dengan data real

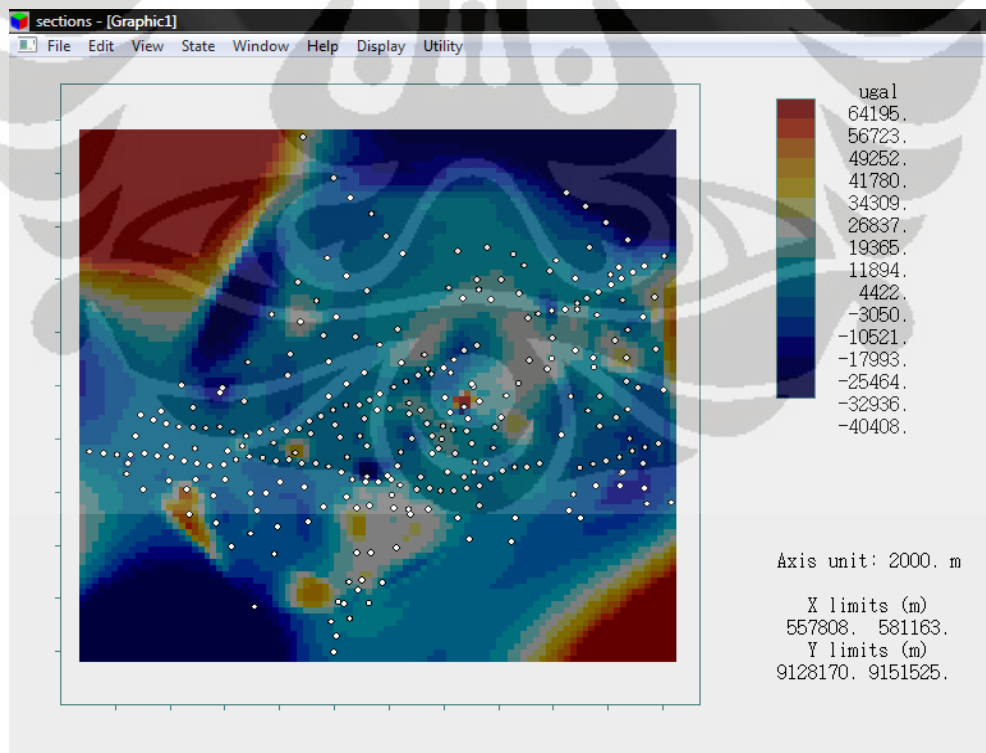
Pemodelan dengan data real ini menggunakan data gravitasi dari daerah potensi geothermal “X”. Pemodelan ini dilakukan untuk melihat apakah program inversi gravitasi 3-Dimensi ini dapat memetakan sistem geothermal daerah “X” tersebut atau tidak.



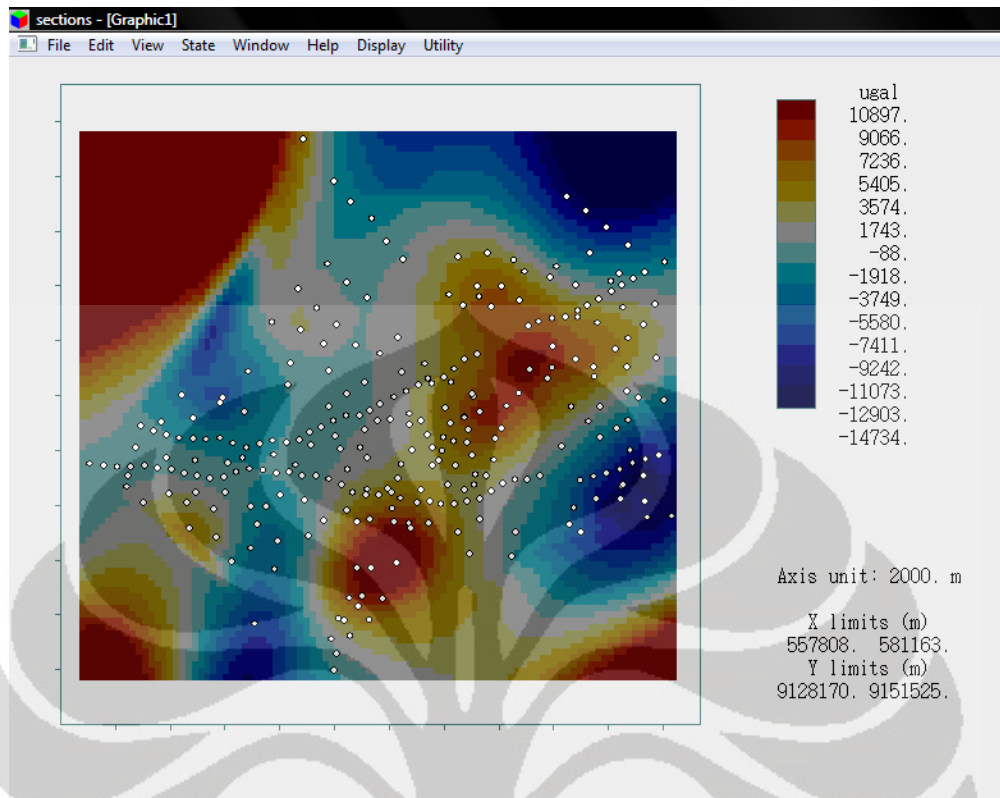
Gambar 4.7 Hasil inversi dengan data Real



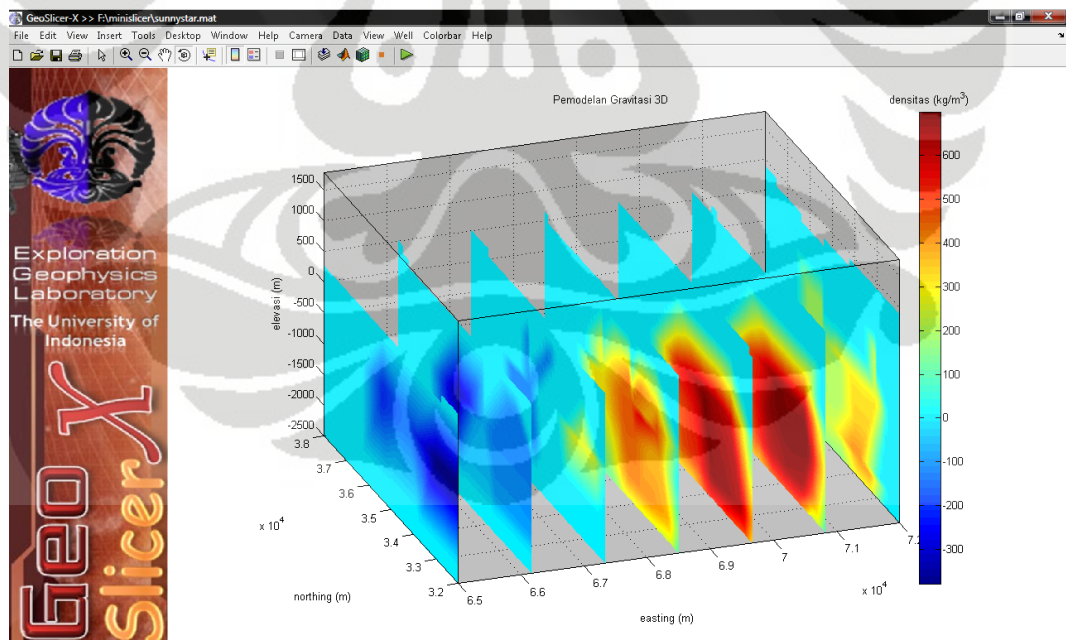
Gambar 4.8 Plot topografi



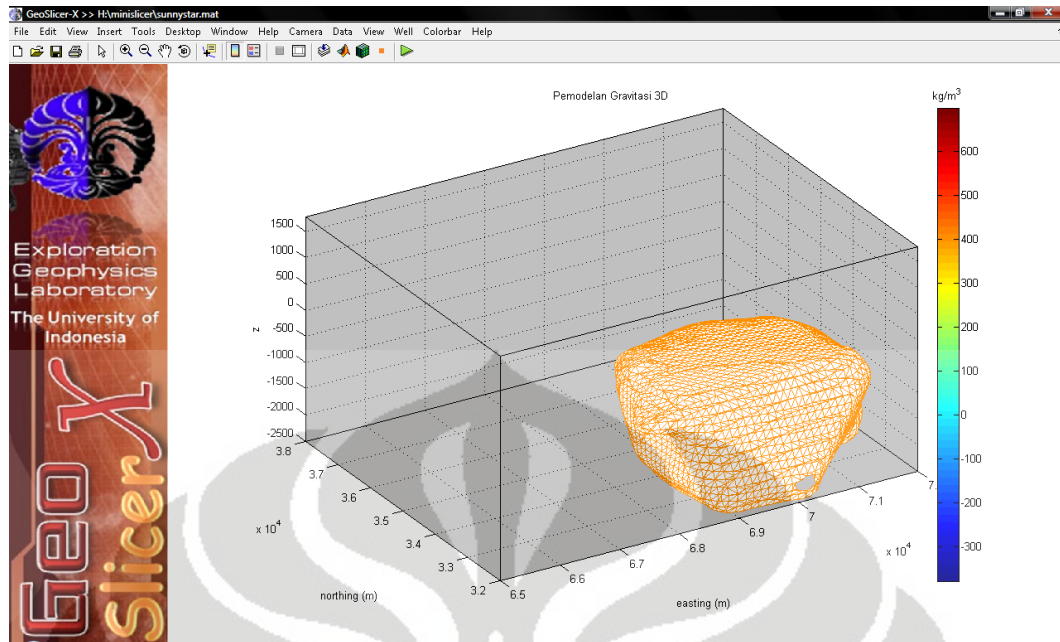
Gambar 4.9 Plot Anomali Bouger



Gambar 4.10 Plot Anomali bouger hasil perhitungan program



Gambar 4.11 Plot model gravitasi 3D hasil inversi



Gambar 4.12 Plot model gravitasi 3D hasil inversi berbentuk blok

Berdasarkan hasil pemodelan dengan menggunakan program pemodelan inversi gravitasi 3-Dimensi pada daerah X, dapat disimpulkan bahwa program ini dapat digunakan untuk memetakan suatu sistem geothermal.

BAB 5

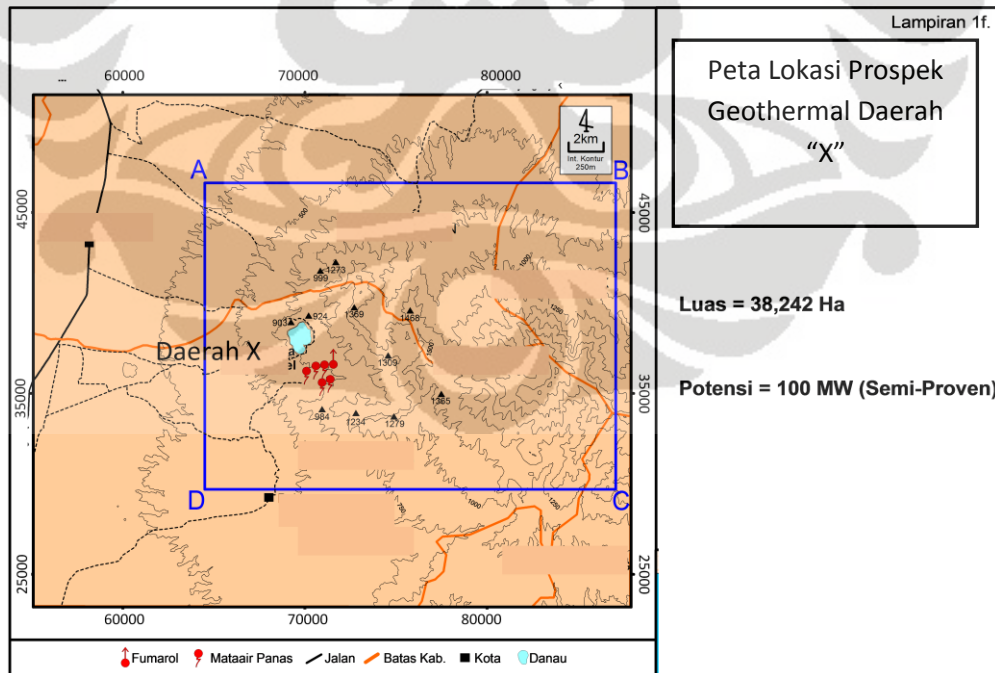
PEMBAHASAN

5.1 Data Pendukung

Dalam melakukan interpretasi data geofisika dibutuhkan data pendukung lainnya, seperti data geologi daerah penelitian, data sumur bor, sampel batuan dan data metode geofisika lainnya sebagai korelasi. Sebab tanpa data-data pendukung lainnya data geofisika hanya merupakan data angka dan tabel yang berisikan data fisis namun tidak dapat menjelaskan dan memberikan gambaran dari objek yang dicari. Untuk itulah dilakukan interpretasi terintegrasi, dengan menggabungkan data geologi dan pendukung lainnya diharapkan dapat dibuat model konseptual dari sistem geothermal daerah penelitian.

5.1.1 Data Geologi

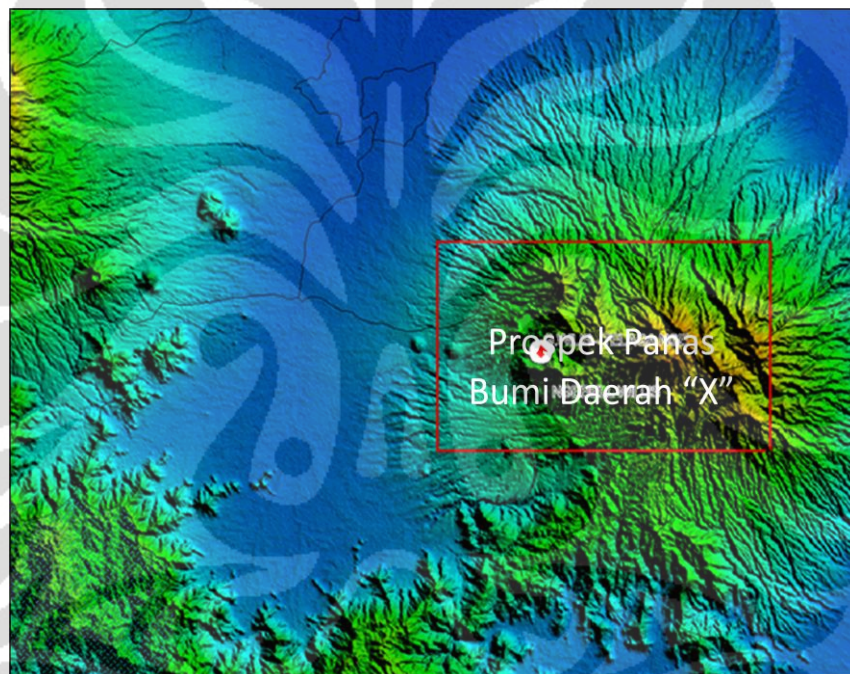
Gambar 5.1 menjelaskan tentang lokasi penelitian prospek geothermal Daerah "X" dengan luas sebesar 38.242 Ha.



Gambar 5.1 Peta Daerah Penelitian

Fisiografi Daerah Penelitian

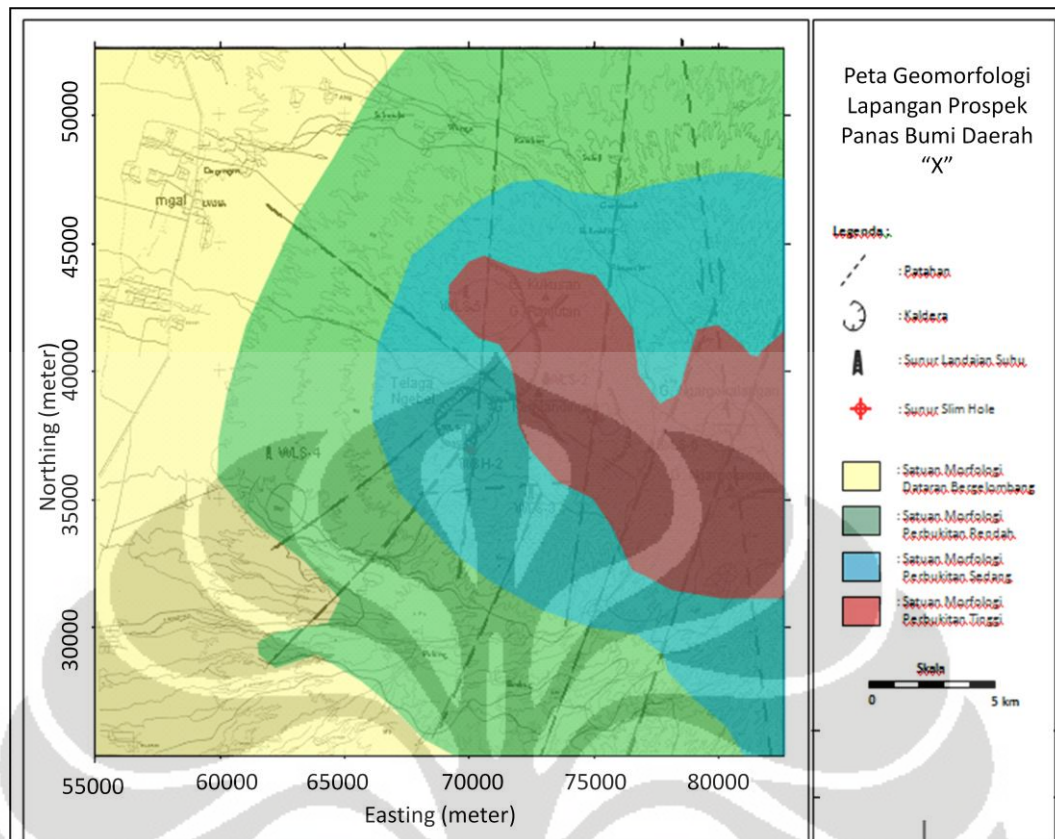
Lapangan Daerah “X” merupakan bagian dari rangkaian pegunungan vulkanik tua berarah barat laut – tenggara dimulai dari gunung A di bagian barat dan gunung B di bagian timur (Gambar 2). Daerah ini pada umumnya berupa pegunungan tinggi dengan elevasi 400 meter hingga 2500 meter di atas permukaan laut, puncak-puncaknya adalah Gunung X, Gunung S, Gunung Ls, Gunung Ln dan Gunung W. Di beberapa tempat dijumpai morfologi berbentuk kaldera dan kerucut-kerucut gunung api. Secara regional daerah ini terletak pada tepi cekungan sedimen Tersier di bagian utara dari Pegunungan Selatan Jawa.



Gambar 5.2 Fisiografi daerah penelitian

Geomorfologi

Puncak tertinggi di daerah “X” adalah Gunung Ln (2563 m.a.s.l), yang mempunyai relief kasar, berlereng terjal dan pada beberapa tempat membentuk gawir. Telaga “X” yang berada pada ketinggian 690 m m.a.s.l merupakan suatu telaga kepundan yang dikelilingi gunung-gunung di sekitarnya.



Gambar 5.3 Peta Geomorfologi Daerah Penelitian

Secara morfologis, daerah "X" tersusun oleh 4 satuan morfologi (Gambar 5.3), yaitu:

1. Satuan Morfologi Perbukitan Tinggi

Morfologi dengan elevasi dan kelerengan yang tinggi menempati di bagian tengah ke arah timur dengan pelamparan sekitar 15% daerah "X". Satuan morfologi ini terbentuk oleh puncak-puncak gunung api yang merupakan pusat erupsi dan beberapa membentuk struktur kaldera. Elevasi morfologi adalah diatas 1000 m.a.s.l dengan elevasi tertinggi mencapai 2563 m (G. Ln).

2. Satuan Morfologi Perbukitan Sedang

Morfologi ini merupakan punggung-punggung perbukitan yang melingkari satuan morfologi perbukitan tinggi. Elevasi dari morfologi ini berkisar 500 m hingga 1000 m dengan kelerengan yang sedang 15-25 derajat. Daerah Telaga "X" dengan elevasi 600 m dan sekitarnya merupakan bagian dari satuan morfologi perbukitan sedang ini.

Pelamparan satuan morfologi ini menempati sekitar 20% daerah penelitian.

3. Satuan Morfologi Perbukitan Rendah

Satuan morfologi ini mempunyai elevasi kurang dari 500 m dan kelerengan kurang dari 15%. Bentuk morfologi merupakan bagian dari kaki perbukitan yang paling bawah, melingkari satuan morfologi perbukitan sedang. Pelamparan dari satuan morfologi ini sekitar 30 % dari daerah penelitian.

4. Satuan Morfologi Dataran Bergelombang

Satuan morfologi ini menempati di daerah barat, dengan ciri merupakan hamparan dataran di bagian paling barat dan ke arah timur makin bergelombang hingga berbatasan dengan satuan morfologi perbukitan perbukitan rendah. Satuan morfologi ini pada umumnya terbentuk oleh endapan alluvial yang melampar ke arah barat dengan pelamparan sekitar 35% daerah penelitian.

Vulkano Stratigrafi

Daerah X - Gunung W tersusun oleh tiga satuan formasi gunung api, yaitu Satuan Vulkanik X - B, Satuan Vulkanik Ln dan Satuan Vulkanik W - Ls.

1. Satuan Vulkanik X - B

Pelamparan satuan ini terdapat di bagian barat dari Gunung W, dimana Telaga "X" merupakan sisa kawah dari erupsi samping Gunung Wm, Telaga "X" juga merupakan sisa kawah dari erupsi samping G. W, yang di bagian atasnya berjejer gunung membentuk lengkungan dengan puncak-puncaknya berupa Gunung Mn, G. Kln, Ptk, Bntng, Jdng dan Gunung B.

Batuan penyusun satuan ini terdiri dari material piroklastik berupa lapili, pasir gunung api dan debu gunung api yang membentuk breksi vulkanik. Di bagian barat dan tenggara Telaga "X" dijumpai pula lava andesit.

Hasil perhitungan umur dengan K-Ar, satuan ini dihasilkan oleh erupsi vulkanik setidaknya dimulai pada 1,45 juta tahun yang lalu atau pada kala Pleistosen Awal.

2. Satuan Vulkanik Ls

Ls kemungkinan terbentuk dalam waktu bersamaan dengan Gunung B, yaitu dengan membandingkan dalamnya erosi vertikal yang terjadi. Gunung W dengan sebaran produknya yang terpancar ke arah selatan hingga tenggara diperkirakan mempunyai pusat erupsi di sekitar daerah Gunung Ng, Gunung Tu, Gunung Drw, Gunung K dan Gunung Pr pada satuan Ln.

Di sebelah utara Gunung W terhampar produk Gunung Ls. Terdapatnya gawir yang memanjang berarah tenggara-baratlaut di bagian barat satuan ini, ditafsirkan sebagai sisa kaldera Gunung Ls. Disamping itu adanya gawir lain berbentuk lengkungan yang berada ditengah gawir pertama, menunjukkan kegiatan vulkanisme G. Ls berlangsung lebih dari satu perioda.

Gunung W dan Gunung Ls mempunyai derajat penorehan yang relative sama, namun begitu dapat ditentukan bahwa G. Ls lebih muda daripada G. W, dengan melihat keduanya. Pada kontak tersebut terlihat aliran produk Gunung Ls terhambat oleh punggung Gunung W yang membentang barat-timur, sehingga produk Gunung Ls yang mengalir ke selatan sebagian teralihkan ke arah barat baru kemudian kembali ke selatan.

Kegiatan vulkanisme berikutnya terjadi melalui pusat erupsi yang sekarang menjadi Telaga "X". Produk "X" yang mengalir ke arah barat sebagian menghalangi bahan-bahan yang dikeluarkan oleh Gunung Km yang terjadi belakangan. Gunung Km merupakan satuan termuda pusat erupsi yang menempati badan Gunung Km (Gunung Ce dan Gunung S) ditafsirkan sebagai sisa sumbat kepundan.

3. Satuan Vulkanik Ln

Satuan Liman yang menempati bagian tengah kompleks W diperkirakan sebagai satuan yang terbentuk paling akhir. Produk Liman

yang mengalir kearah selatan sebagian teralihkan kearah barat oleh punggung formasi Andesit Tua. Pada daerah yang diduga sebagai pusat erupsi Gunung W, kemudian muncul pusat erupsi baru (Gunung Ng, Gunung Tu, Gunung K dan Gunung Pr).

Batuannya terdiri dari material piroklastik berupa lapili, pasir gunung api dan debu gunung api yang membentuk breksi vulkanik. Batuan lava andesit dan basaltic dijumpai diperkirakan merupakan produk dari Gunung Ng. Berdasarkan hasil analisa K-Ar, produk satuan batuan ini terbentuk mulai dari 1,39 juta tahun yang lalu dan aktif kembali pada 0.836 juta tahun yang lalu atau pada kala Pleistosen Awal.

| Produk Satuan X - B | Produk Satuan Ln | Produk Satuan W - Ls | Umur (tahun) |
|-------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| | G. Ngrsp G. Ma G. Tu | | Pleistosen Akhir (0.7 – 0,8 juta) |
| G. Ce G. S G. Skp | G. Ng G. Pr G. K G. Pu G. Ln | G. Pj G. Su G. Ls G. W | Pleistosen Tengah (1,20 juta) |
| G. Km G. X | | | Pleistosen Awal (1,439 juta) |
| G. B | | | Pliosen (1,80 juta) |
| | Formasi Andesit Tua | | Oligosen |

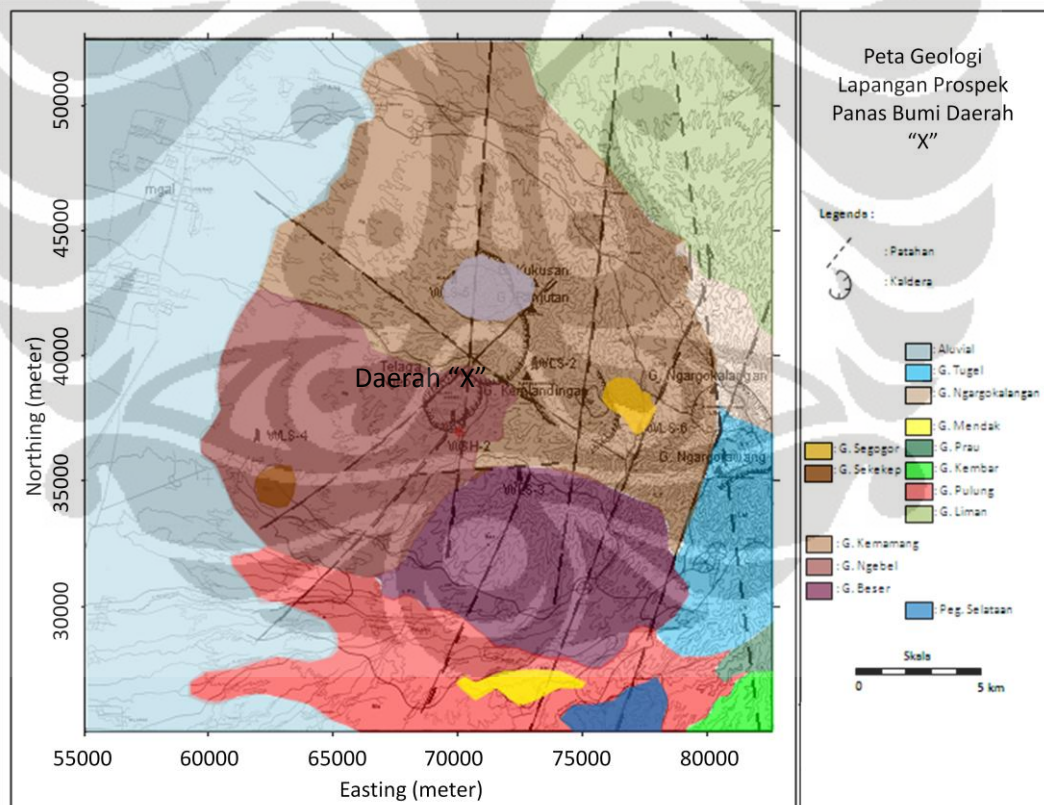
Tabel 5.1. Urutan Vulkanostratigrafi daerah X-W

Struktur Geologi

Daerah gunung W dalam kerangka regional terletak di sekitar cekungan sedimen Tersier di sebelah utara dari Pegunungan Selatan Jawa. Gambaran struktur kelurusan berarah utara baratlaut- selatan tenggara dan utara timurlaut – tenggara dan timurlaut – baratdaya. Meskipun demikian kelurusan struktur yang berarah timur – barat juga teramati di bagian barat daerah penelitian.

Ada tiga kelompok struktur sesar berdasarkan bentuk-bentuk kelurusan, yaitu:

1. Kelompok kelurusan struktur yang berarah utara baratlaut - selatan dan utara timurlaut - selatan baratdaya, yaitu mendominasi daerah penelitian serta mengontrol pusat-pusat erupsi di daerah gunung W, yaitu meliputi:
 - a. Kelurusan struktur G. X-Jmbn-Cmr
 - b. Kelurusan struktur G. Btr-Sg-Km
 - c. Kelurusan struktur G. Mnk-Bendo
 - d. Kelurusan struktur G. Pr-Ng
 - e. Kelurusan struktur G. Do-Jo
 - f. Kelurusan struktur G. W
 - g. Kelurusan struktur G. Tjg-Cmr
 - h. Kelurusan struktur G. Ls-Ang
 - i. Kelurusan struktur G. Su-Ln
 - j. Kelurusan struktur G. K-Ng-B



Gambar 5.4 Peta Geologi Daerah Penelitian

2. Kelompok kelurusan struktur yang umumnya melalui kelurusan sungai atau membentuk gawir yang memotong perbukitan, yaitu meliputi:
 - a. Kelurusan struktur Ws-X-G.Ku
 - b. Kelurusan struktur Pg-G. Je
 - c. Kelurusan struktur G. Sg-G. Ls
 - d. Kelurusan struktur G. Ang-Br
 - e. Kelurusan struktur Slj-Sbrjb
3. Kelompok kelurusan struktur berarah timur-barat, yang berkembang hanya di bagian barat daerah penelitian yaitu sekitar Telaga X. Umumnya berbentuk relief pendek dan memperlihatkan kenampakan yang memotong perbukitan.

Kelurusan-kelurusan struktur yang terjadi di daerah X-W adalah struktur yang terbentuk oleh tektonik regional pulau Jawa dimana gaya utama berarah hampir utara-selatan. Struktur kelurusan berarah timur laut barat daya diperkirakan merupakan struktur patahan geser, sedangkan struktur kelurusan yang berarah barat laut – tenggara merupakan struktur antitetik. Aktivitas vulkanik yang berlangsung di daerah ini diperkirakan menyebabkan terbentuknya kelurusan struktur berarah utara-selatan berupa patahan normal atau graben-graben yang berbentuk melingkar dari bekas kaldera yang runtuh.

Manifestasi Geothermal

Indikasi adanya aktivitas magmatis di bawah permukaan ditunjukkan oleh beberapa manifestasi panas bumi di permukaan.

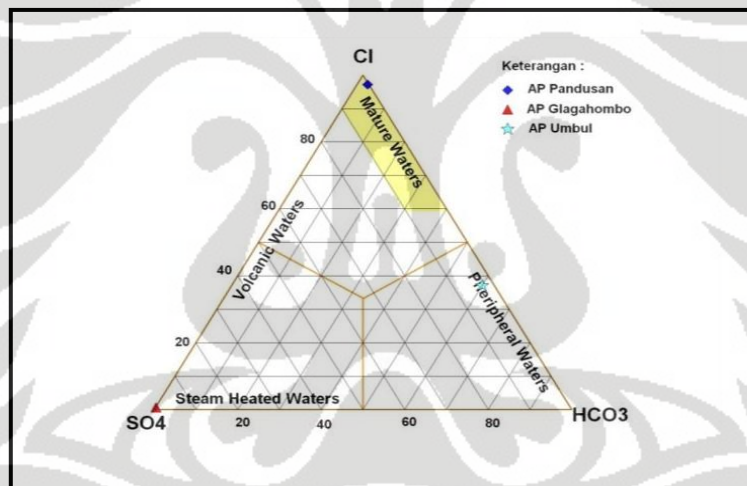
Mata air panas dengan suhu 50°C – 60°C ditemukan di daerah Pds pada tebing dasar sungai Tpr di sebelah selatan Telaga X. Sedangkan manifestasi jenis sulfatara dan air panas dengan kenampakan lumpur yang mendidih ditemukan di desa Gl yang terletak lebih kurang 1 km kearah timur dari Pds. Ditemui juga kenampakan aktivitas gas CO_2 di dua tempat yang muncul melalui mata air dingin di lokasi berjarak 750 meter di sebelah selatan fumarol Gl. Batuan ubahan hasil alterasi hidrotermal ditemui sepanjang tebing sungai di daerah Pds. Selain itu juga ditemukan mata air panas dengan suhu 32°C di daerah U yang berjarak 15 km di sebelah barat Telaga X.

5.1.2 Geokimia Daerah Penelitian

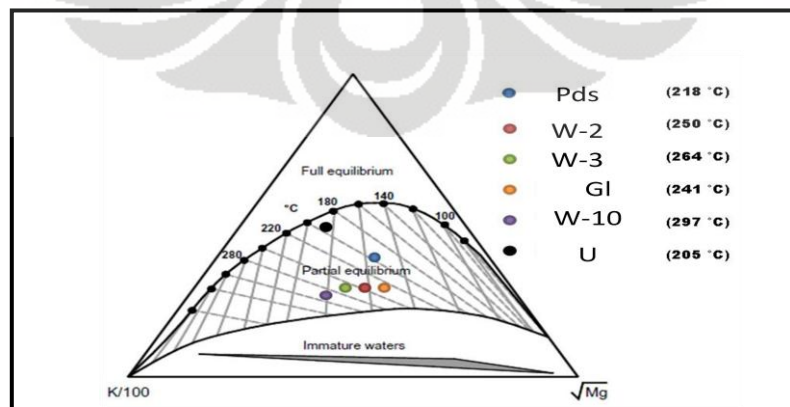
Keberadaan aktifitas magmatis di bawah sekitar Telaga X dan Pds dapat diperkirakan dengan tingginya konsentrasi kadar SO_4^{-2} (4828 ppm) dan Cl^- (408-817 ppm) yang terkandung dalam air panas hasil kondensasi di daerah Gl. Selain itu kandungan Ca^{2+} (224 ppm), Mg^{2+} (76,9 ppm) dan Na^+ (73,5 ppm). Suhu air panas tersebut di atas merupakan tipe sulfat klorida dengan suhu 60-73 °C dan ph <2.

Air panas di daerah Pds mengandung Cl^- sangat tinggi (1227-4975 ppm) dan HCO_3^- tinggi (337 ppm). Kandungan SO_4^{-2} sangat rendah (28 ppm).

Air panas U mengandung Cl^- agak tinggi (517-886 ppm), Na^+ (296,8 ppm), Ca^{+2} (156,3 ppm) dan Mg^{+2} (78,1 ppm) serta kandungan HCO_3^- yang tinggi (830 ppm). Suhu air panas ini adalah 32 °C dengan ph 7 dan termasuk kedalam tipe klorida kearah tipe bikarbonat-klorida.



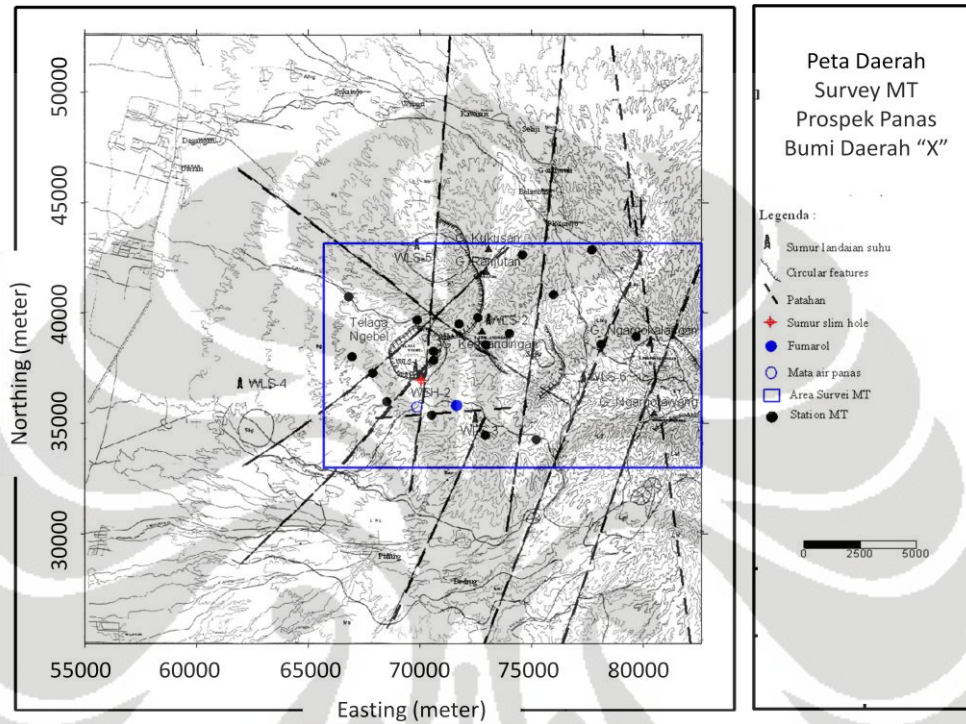
Gambar 5.5 Tipe komposisi kimia lapangan prospek daerah penelitian



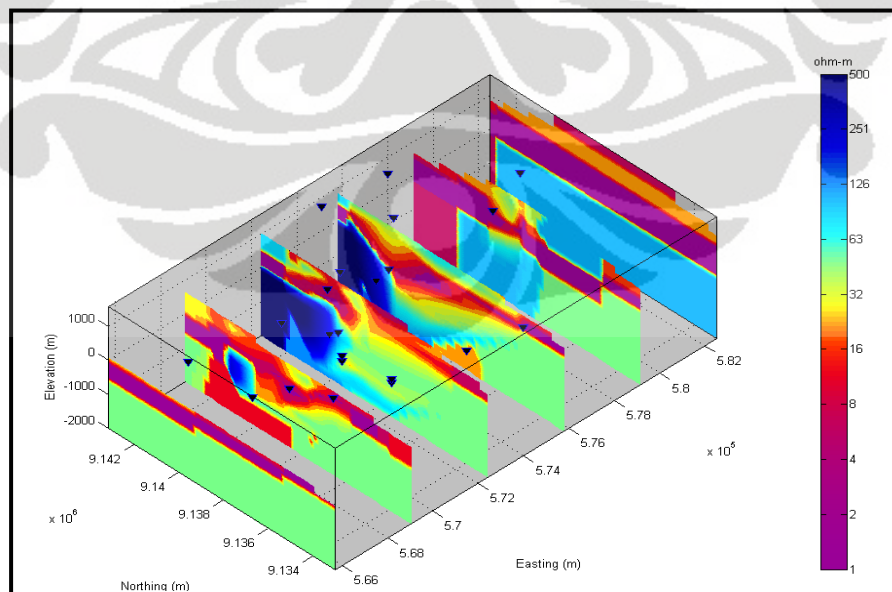
Gambar 5.6 Geothermometry Lapangan prospek daerah penelitian

Hasil analisa kimia mengindikasikan temperatur di reservoir yang cukup tinggi $\pm 250^{\circ}\text{C}$ serta perkembangan struktur yang cukup kompleks arah Timur laut – Barat daya.

5.1.3 Data MT Daerah Penelitian



Gambar 5.7 Titik-titik pengukuran MT



Gambar 5.8 Pemodelan 3D Data MT

Dari data hasil pengukuran dengan menggunakan metode MT, setelah dimodelkan nampak pada daerah penelitian tersebut terdapat suatu sistem geothermal. Seperti telah disebutkan pada bagian sebelumnya, pada daerah potensi geothermal umumnya akan ditemukan suatu sistem geothermal yang terdiri dari :

- sumber panas (*heat source*)
- reservoir geothermal
- batuan penudung (*cap rock*)
- fluida yang membawa panas ke permukaan

Masing-masing bagian dari sistem geothermal tersebut mempunyai nilai resistivitas yang berbeda-beda. Pada bagian atas dari *cap rock* umumnya merupakan batuan yang belum teralterasi dan terpengaruh oleh panas dari bawah sehingga memiliki nilai resistivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *cap rock*. Pada bagian *cap rock* biasanya dicirikan dengan nilai resistivitas yang rendah, hal ini disebabkan batuan pada lapisan tersebut mengalami alterasi karena mendapat pengaruh panas dari reservoir dan *heat source* sehingga dihasilkan lapisan clay. Lapisan clay ini cenderung impermeabel.

Pada bagian selanjutnya yakni reservoir dan *heat source*, dicirikan dengan nilai resistivitas yang tinggi. Makin ke bawah nilai resistivitasnya akan semakin tinggi. Pada bagian reservoir, nilai resistivitas tinggi disebabkan pengaruh dari lapisan clay yang mulai berkurang dan fluida pengisi dari reservoir itu tersebut didominasi oleh uap. Sedangkan pada bagian *heat source* nilai resistivitasnya semakin tinggi, hal ini dikarenakan pada bagian ini tidak lagi ditemukan lapisan clay dan fluida, baik berupa air maupun uap. Pengaruh terbesar pada sistem geothermal adalah keberadaan dari lapisan clay.

Maka dengan melihat pemodelan tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai resistivitas rendah (1 - 8 ohm-m) ditunjukkan dengan warna ungu merupakan lapisan clay dengan kedalaman berkisar antara 500 – 1000 m di bawah permukaan tanah. Kemudian warna merah dengan nilai resistivitas yang lebih tinggi (10 - 20 ohm-m) merepresentasikan batuan di atas lapisan clay yang tidak teralterasi, terdapat pada kedalaman kurang dari 500 m di bawah permukaan tanah. Warna biru dengan nilai resistivitas yang tinggi (250 – 500 ohm-m) mungkin saja merepresentasikan reservoir dari sistem geothermal, akan tetapi sedikitnya data

MT dititik tersebut dapat menimbulkan keraguan bahwa daerah tersebut merupakan reservoir. Belum lagi berdasarkan data geokimia, di titik tersebut tidak ditemukan manifestasi permukaan yang dapat menguatkan bahwa daerah tersebut memang benar reservoir geothermal. Anomali resistivitas tinggi tersebut terdapat pada kedalaman berkisar antara 2000 – 3000 m di bawah permukaan tanah. Kemudian warna hijau dengan nilai resistivitas sedang (40 – 100 ohm-m), merepresentasikan daerah sekitar nilai anomali resistivitas tinggi, terdapat pada kedalaman berkisar antara 1500 – 3000 m di bawah permukaan tanah.

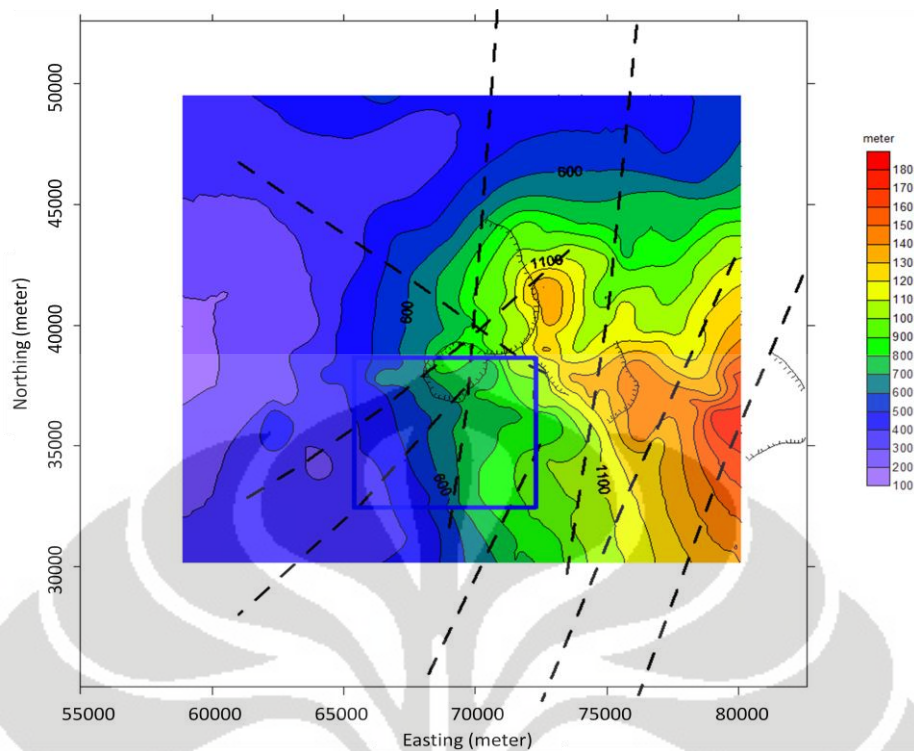
5.2 Model Gravitasi 3-Dimensi

Sebelum dilakukan pemodelan terlebih dahulu dilakukan pengolahan data gravitasi hasil pengukuran di lapangan. Untuk mereduksi koreksi *drift*, biasanya survey ini dilakukan dengan *loop* atau sistem pengamatan tertutup. Gravimeter yang akan digunakan untuk pengukuran ke lapangan terlebih dahulu mengukur gravitasi pada stasiun *base* sebelum dan sesudah melakukan pengukuran di lapangan. Kemudian data gravitasi pengukuran lapangan dikoreksi dengan data gravitasi pengukuran *base* untuk mereduksi efek pasang surut.

Dari perbedaan gravitasi *base* daerah penelitian dan stasiun BMG Jakarta diketahui nilai gravitasi absolut daerah penelitian adalah sebesar 978125,147 mgal. Nilai gravitasi observasi didapatkan dari hasil pengukuran gravitasi relatif di lapangan yang telah dikoreksi dengan koreksi drift dan koreksi pasang surut, ditambah dengan nilai gravitasi absolut ini.

Kemudian untuk koreksi lintang, dilakukan konversi koordinat titik-titik pengamatan dalam koordinat jarak (UTM) menjadi koordinat lintang terlebih dahulu. Nilai koordinat lintang tersebut kemudian dimasukkan ke persamaan (2.3) untuk mendapatkan nilai gravitasi normal untuk tiap titik pengamatan.

Selanjutnya koreksi udara bebas dan koreksi Bouguer didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.4) dan (2.5). Untuk koreksi terrain dilakukan dengan menggunakan Hammer Chart.



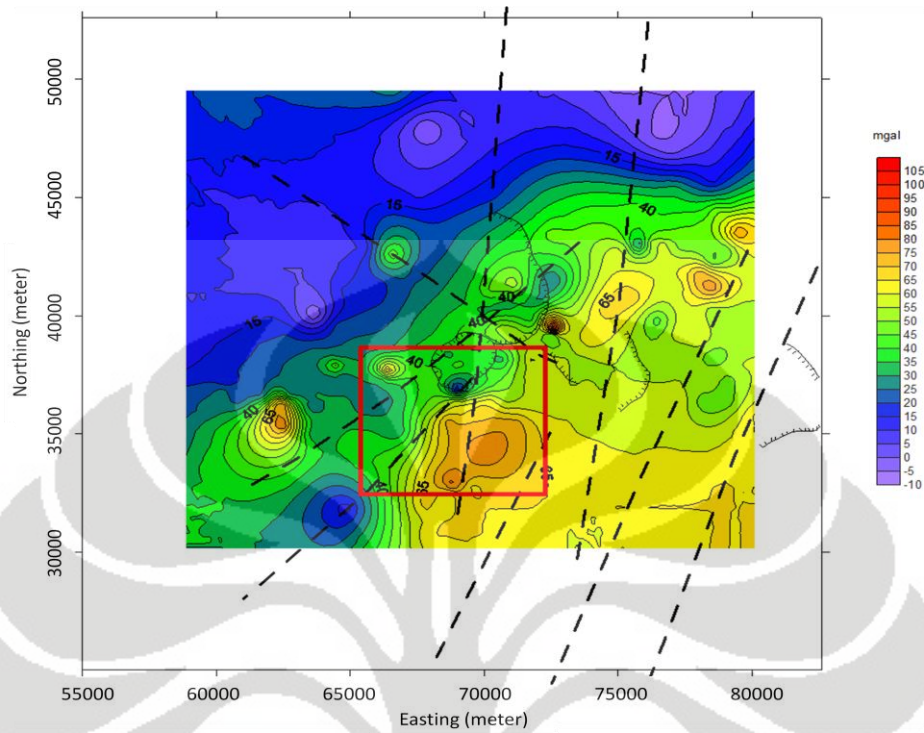
Gambar 5.9 Peta Topografi Daerah Penelitian

Setelah melakukan koreksi-koreksi diatas terhadap nilai gravitasi observasi sesuai dengan aturan pada persamaan (2.7), maka didapatkan nilai anomali Bouguer. Anomali Bouguer ini kemudian dipetakan dengan Surfer8 untuk melihat pola anomali yang ada pada daerah penelitian (gambar 5.10).

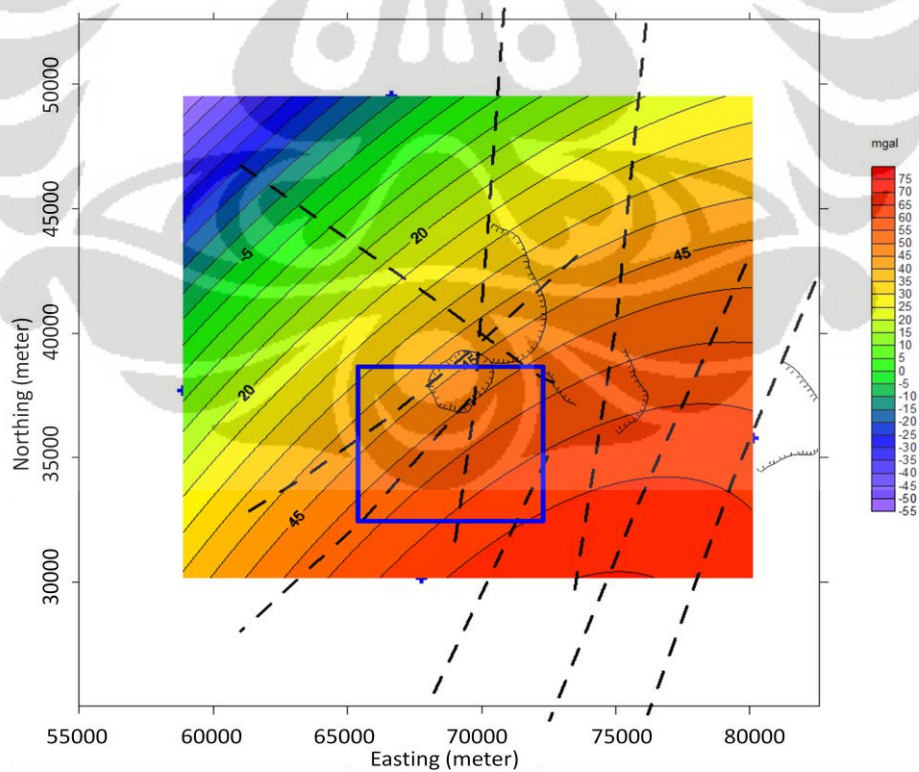
Selanjutnya dari nilai anomali Bouguer ini akan dipisahkan antara anomali regional dan anomali residualnya dengan *Trend Surface Analysis* (TSA) menggunakan fasilitas yang ada pada software Surfer 8. Gambar 5.11 dan Gambar 5.12 merupakan hasil dari pemisahan anomali bouger menggunakan *Trend Surface Analysis* (TSA) dengan orde 3.

Pada prinsipnya tingkat orde TSA mencerminkan tingkat nilai efek anomali gravitasi yang ditimbulkan regional wilayah survey. Orde satu mencerminkan efek regional dari area yang sangat luas dan sangat dalam. Semakin tinggi orde TSA mencerminkan akumulasi nilai anomaly gravitasi karena efek regional ditambah dengan efek-efek lokal yang diimplementasikan oleh suku-suku tinggi dari polinomial TSA. Oleh karena itu pada studi ini dipilih

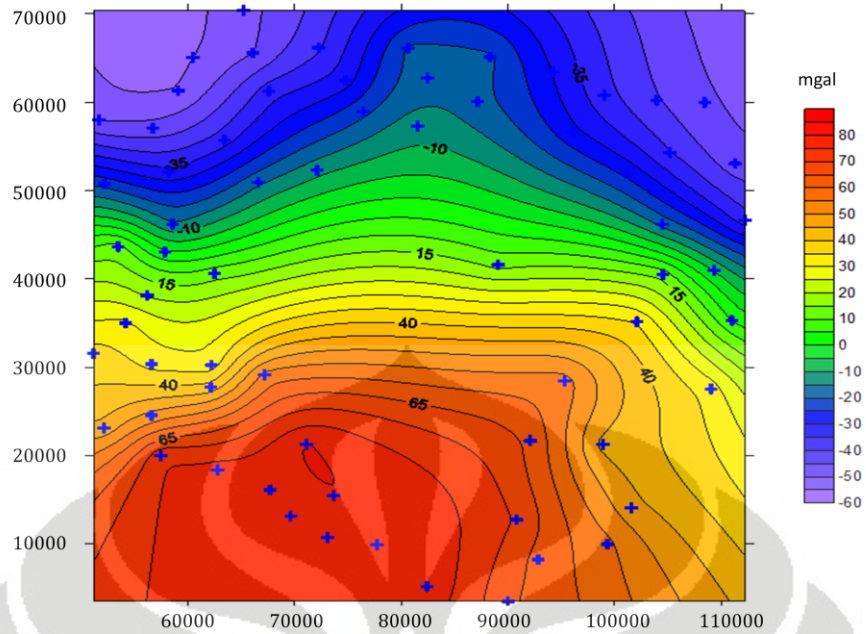
TSA orde dua dengan mempertimbangkan efek regional dari area studi yang tidak terlalu dalam dan lingkupnya yang lebih lokal.



Gambar 5.10 Peta Anomali Bouger Daerah Penelitian

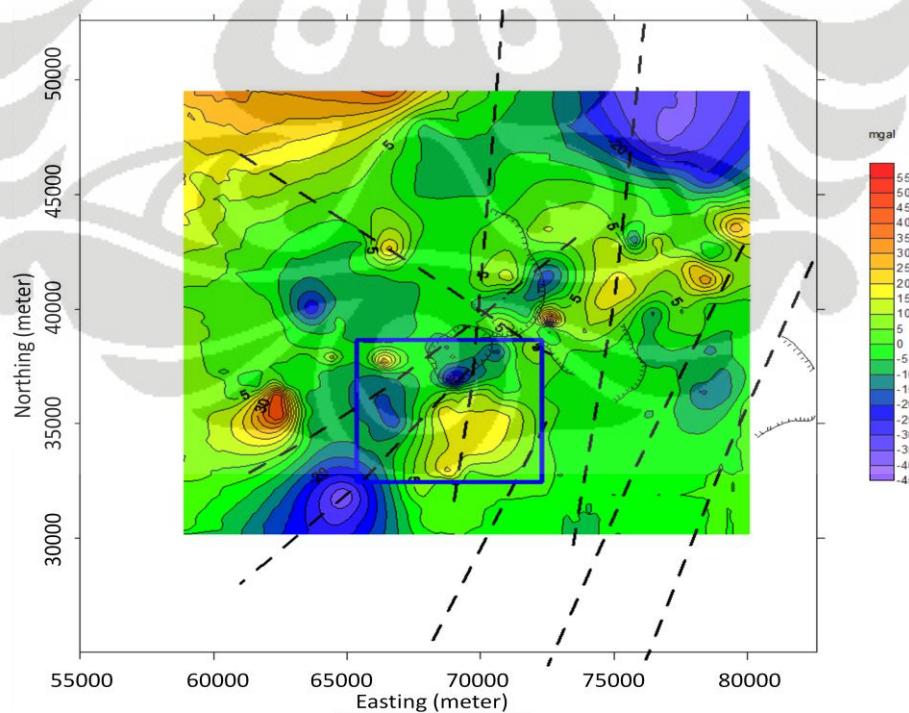


5.11 Anomali Regional orde 2



Gambar 5.12 Anomali Regional hasil pengukuran lapangan

Gambar 5.12 merupakan anomali regional hasil pengukuran lapangan untuk dibandingkan dengan anomali regional hasil perhitungan menggunakan *Trend Surface Analysis* (TSA). Ternyata hasil perhitungan dengan TSA mempunyai tren yang hampir sama.



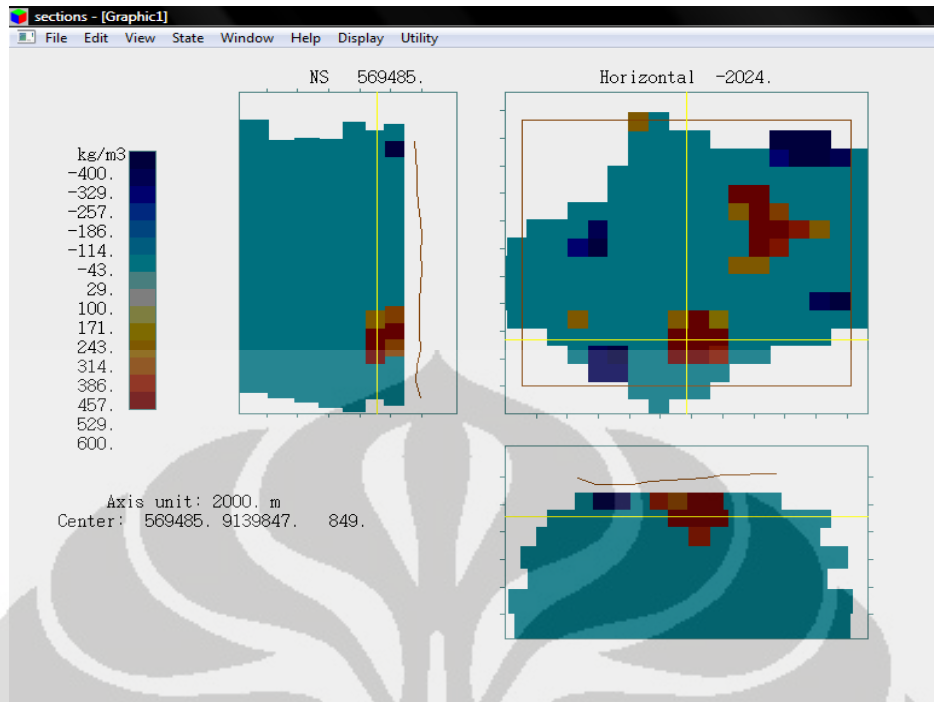
Gambar 5.13 Anomali residual orde 2

Kemudian setelah didapatkan nilai anomali residual, proses selanjutnya adalah melakukan input data ke program Inversi Gravitasi 3D agar dapat dibuat pemodelan gravitasi 3 dimensi.

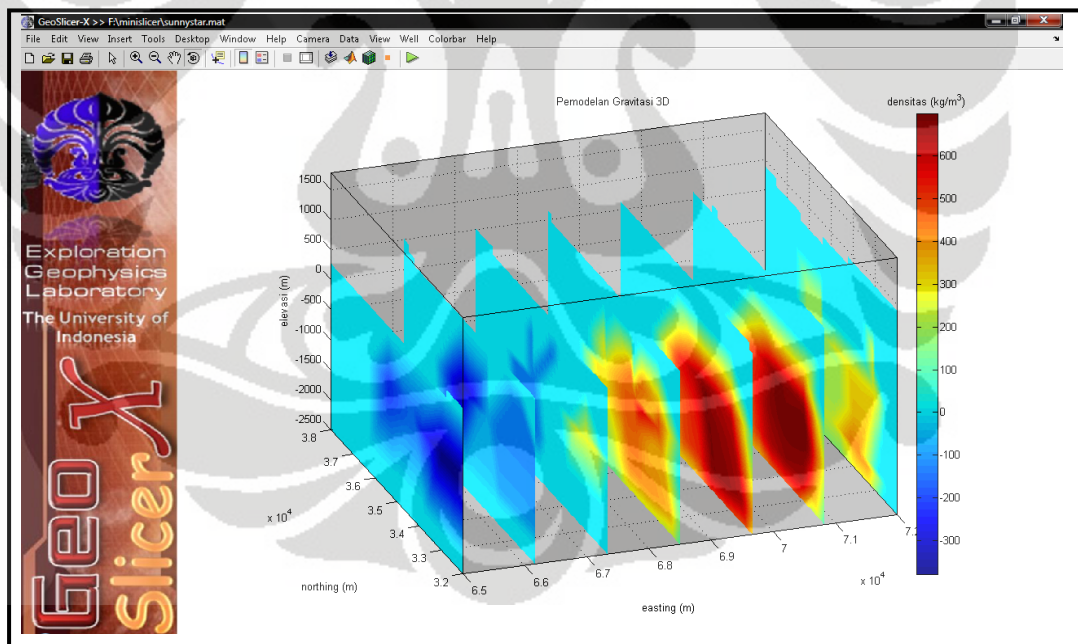
Kotak merah pada Gambar 5.13 merupakan daerah yang akan dilakukan pemodelan inversi gravitasi 3D. Gambar 5.14 dan Gambar 5.15 merupakan hasil inversi dari program pemodelan inversi gravitasi 3D.

Pada penggunaan program inversi gravitasi 3D, hanya dapat memetakan anomali yang cukup kontras dengan lingkungan sekitarnya. Jika tidak terlalu kontras dengan lingkungan sekitarnya maka akan diasumsikan sebagai benda bukan anomali dan diberi harga nol. Sedangkan jika suatu benda memiliki kontras yang cukup dengan sekitarnya maka akan dimunculkan nilai kontras densitas dari benda tersebut. Dengan mengasumsikan densitas batuan *basement* adalah 2300 kg/m^3 .

Dari Gambar 5.14 hasil pemodelan dengan program inversi gravitasi 3D ini sesuai dengan kenampakan anomali pada Gambar 5.12 (bagian dalam kotak berwarna merah dengan nilai anomali tinggi). Terlihat bahwa pada daerah penelitian terdapat area yang memiliki kontras densitas dengan lingkungan sekitarnya Hal ini dapat dicurigai sebagai suatu anomali berupa adanya intrusi batuan. Benda anomali yang dicurigai berupa intrusi batuan tersebut berada pada kedalaman $2000 - 3000 \text{ m}$ di bawah permukaan tanah, dengan densitas batuan berkisar antara $2700 - 3000 \text{ kg/m}^3$.



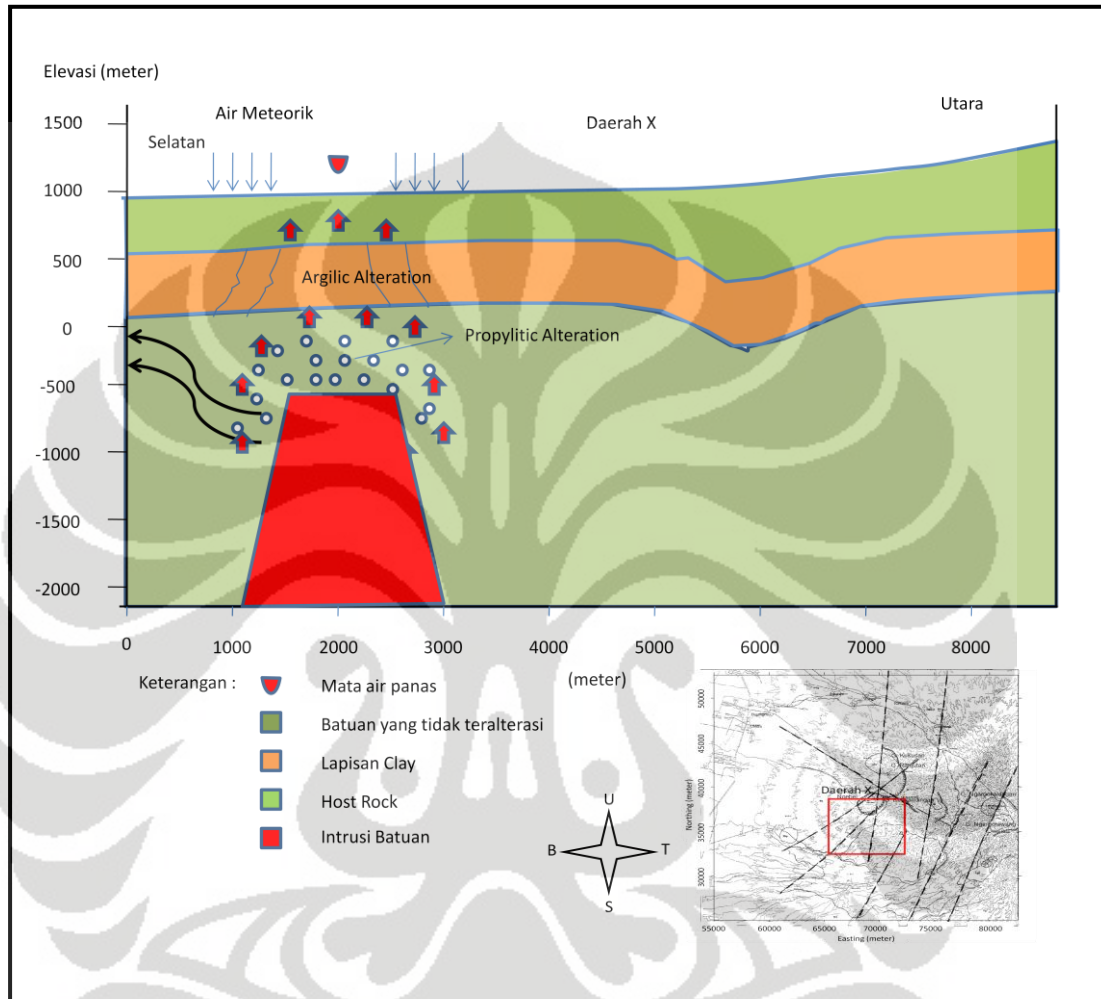
Gambar 5.14 Pemodelan inversi 3D daerah penelitian



Gambar 5.15 Plot model gravitasi 3D daerah penelitian hasil inversi

5.3 Model Konseptual Geothermal Daerah Penelitian

Berdasarkan data gravitasi dan data pendukung lainnya seperti data geologi, data geokimia dan data MT dapat dibuat model konseptual geothermal daerah penelitian seperti pada Gambar 5.16



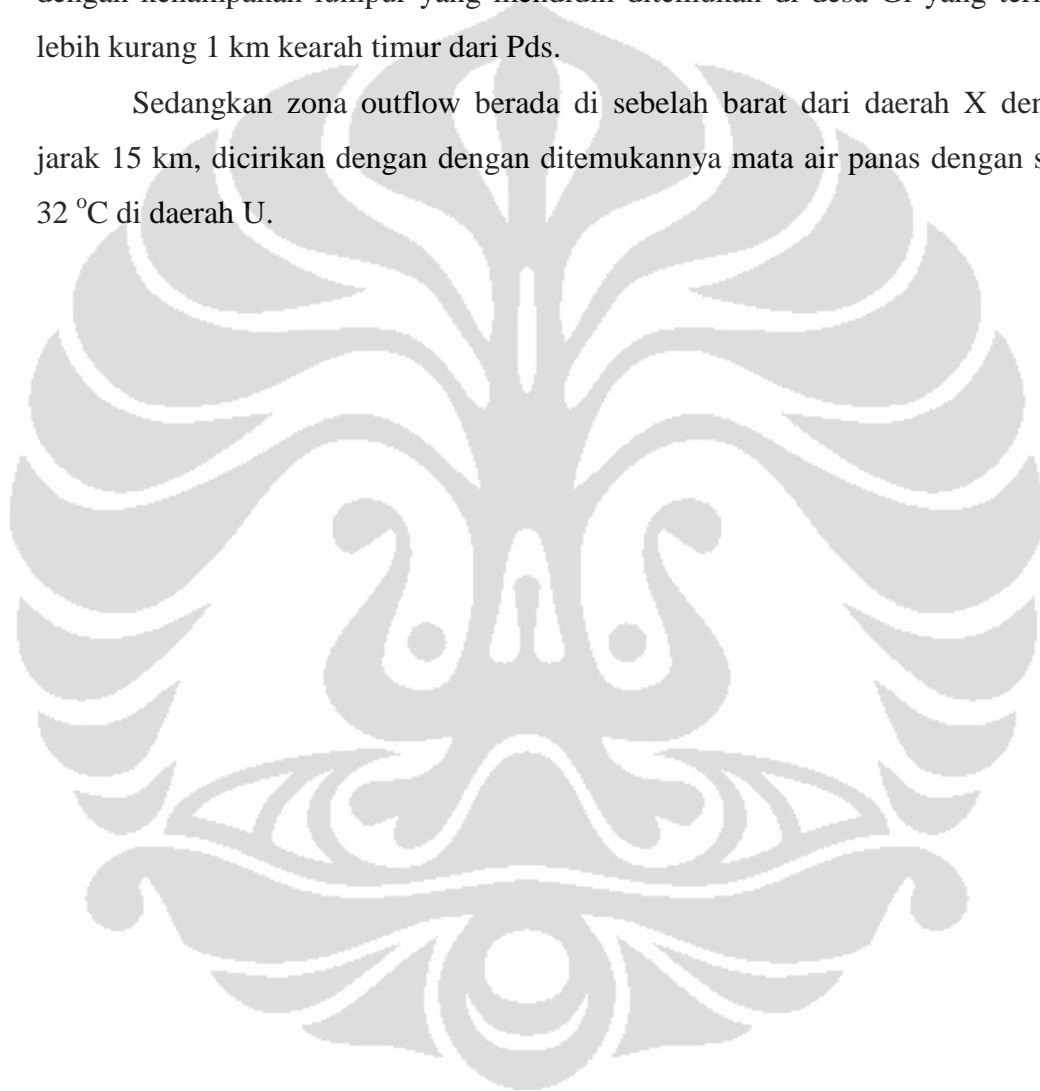
Gambar 5.16 Model konseptual geothermal daerah penelitian

Dari Gambar 5.16 dapat terlihat warna *orange* merupakan lapisan clay dengan kedalaman berkisar antara 500 – 1000 m di bawah permukaan tanah. Kemudian warna hijau tua merepresentasikan batuan di atas lapisan clay yang tidak teralterasi, terdapat pada kedalaman kurang dari 500 m di bawah permukaan tanah. Terdapat juga intrusi batuan digambarkan dengan warna merah, terdapat pada kedalaman 2000 – 3000 m dibawah permukaan tanah, kemungkinan pada titik tersebut terdapat reservoir geothermal. Hal ini didukung adanya manifestasi permukaan seperti mata air panas dan sulfatara di sekitar daerah tersebut. Dan

warna hijau merepresentasikan daerah sekitar intrusi, terdapat pada kedalaman berkisar antara 1500 – 3000 m di bawah permukaan tanah

Untuk zona up flow dari sistem geothermal ini berada diatas dari ditemukannya batuan intrusi, dicirikan dengan adanya manifestasi permukaan yaitu berupa mata air panas dengan suhu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada bagian selatan dari daerah X, sedangkan manifestasi permukaan berupa sulfatara dan air panas dengan kenampakan lumpur yang mendidih ditemukan di desa G1 yang terletak lebih kurang 1 km kearah timur dari Pds.

Sedangkan zona outflow berada di sebelah barat dari daerah X dengan jarak 15 km, dicirikan dengan dengan ditemukannya mata air panas dengan suhu $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ di daerah U.



BAB 6

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari studi ini adalah :

- Pengembangan program yang dilakukan yaitu pada program ini dapat dilakukan pembuatan data sintetik melalui pemodelan *forward*.
- Pengujian program dengan model sederhana juga berhasil dilakukan dengan melihat kecocokan model hasil inversi dengan benda sederhana yang dijadikan sebagai model.
- Pengaplikasian program ini pada data gravitasi sintetik dan *real* dapat dilakukan, tetapi penggunaannya masih terbatas pada daerah dengan kondisi geologi yang tidak terlalu kompleks
- Pengaplikasian program pada data *real* daerah geothermal dengan tambahan data pendukung menghasilkan suatu model konseptual.
 - Zona up flow dari sistem geothermal ini berada diatas zona reservoir, dengan jarak sekitar 2 – 3 km ke arah selatan daerah X.
 - Sedangkan zona outflow berada di sebelah barat dari daerah X dengan jarak 15 km.
 - Zona reservoir dimana terdapat intursi batuan dari sistem geothermal, terdapat pada kedalaman berkisar antara 2000 – 3000 m di bawah permukaan tanah.

6.2 Saran

Modifikasi yang dilakukan masih terbatas pada penggabungan dan merubah tampilan program. Modifikasi akan lebih baik bila dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman yang lebih *user friendly* seperti Matlab atau Visual Basic (VB) sehingga bisa dihasilkan tampilan program yang lebih baik.

Untuk pengaplikasian pada data real sebaiknya digunakan pada daerah dengan kondisi geologi yang sederhana dan tidak terlalu kompleks.

DAFTAR ACUAN

- Abdelrahman E. M., Riad S., Refai E., Amin Y., 1985, *On the least-squares. residual anomaly determination*, Geophysics, 50, pp. 473-480.
- Alimuddin, 2002, *Penyelidikan Struktur Bawah Permukaan Gunungapi Ungaran Dengan Analisis Anomali Medan gravitasi*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Berrino, G., and Camacho, A.G., 2008, *3D Gravity Inversion by Growing Bodies and Shaping Layers at Mt. Vesuvius (Southern Italy)*.
- Camacho, A.G, Montesinos, F.G., Vieira, Ricardo. 2002. *A 3-D gravity inversion tool based on exploration of model possibilities*. Ciudad Universitaria, Madrid.
- Daud, Yunus. 2005. *Catatan Kuliah Eksplorasi Geothermal*. Departemen Fisika, Universitas Indonesia.
- Jati, Satrio. 2009. *Monitoring Lapangan Panas Bumi Kamojang Menggunakan Pengukuran Gravitasi Berulang*. Skripsi Sarjana, Jurusan Fisika Universitas Indonesia, Depok, Tidak diterbitkan.
- Kartasaputra, Kusdinar. 2008. *Pemodelan Cekungan Sedimen Daerah Menggala dan Sekitarnya, Propinsi Lampung Berdasarkan Data Gaya Berat*. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto.
- Meju, A. Max. 1994. *Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice*, Society of Exploration Geophysicists (SEG).
- Reynolds, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley & Sons, Inggris.
- Riamon, Yudi. 2007. *Pemodelan Dua Dimensi Data Gravitasi Lapangan Minyak Talang Jimar Menggunakan Metode Talwani*. Skripsi Sarjana, Jurusan Fisika, Universitas Indonesia, Depok, Tidak diterbitkan
- Rosid, Syamsu. 2006. *Catatan Kuliah Metode Gravitasi*. Departemen Fisika, Universitas Indonesia.

Shin, Y.H., Choi, K.S, Xu, H. 2005. *Three-dimensional forward and inverse models for gravity fields based on the Fast Fourier Transform*. Pusan National University, Pusan, Korea.

Supriyanto, 2007, *Analisis Data Geofisika : Memahami Teori Inversi*, Universitas Indonesia, Depok.

Talwani M., Worzel J. L., and Landisman M., 1959, *Rapid gravity computations for twodimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone*, J.Geophysics. 64, pp. 49-59.

Tarantola, A., 1987. *The Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*. Elsevier, Amsterdam, 613pp.

Telford W. M, Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys D. A, 1976, *Applied geophysics*, Cambridge Univ. Press.

