



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KOMPARASI METODE FILTERING UNTUK
PEMISAHAN ANOMALI REGIONAL DAN RESIDUAL DARI
DATA ANOMALI BOUGUER**

SKRIPSI

INDAH PERMATA SARI

0806452463

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KOMPARASI METODE FILTERING UNTUK
PEMISAHAN ANOMALI REGIONAL DAN RESIDUAL DARI
DATA ANOMALI BOUGUER**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains

INDAH PERMATA SARI

0806452463

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

PROGRAM STUDI FISIKA

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Indah Permata Sari

NPM : 0806452463

Tanda Tangan : 

Tanggal : Depok, 1 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

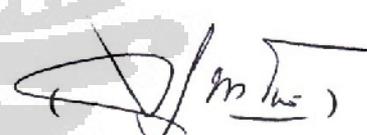
Nama : Indah Permata Sari
NPM : 0806452463
Program Studi : Fisika/S-1 Reguler
Judul Skripsi : **Studi Komparasi Metode Filtering untuk Pemisahan Anomali Residual dan Regional dari Data Anomali Bouguer**

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang di perlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Drs. M. Syamsu Rosid, Ph.D ()

Pembimbing : Dr. Ir. Eko Widiyanto, MT ()

Penguji : Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc ()

Penguji : Drs. Hendar Gunawan, M.Sc ()

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 1 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, petunjuk, dan ilmu kepada penulis, sehingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **”Studi Komparasi Metode Filtering Untuk Pemisahan Anomali Regional dan Residual dari Data Anomali Bouguer”**. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Science Jurusan Fisika pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

Dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan baik berupa bimbingan, konsultasi maupun dorongan moril kepada penulis dari berbagai pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Orang tua saya, Mama dan Papa yang memberikan dukungan penuh dan mendoakan segala kegiatan saya dari mulai perkuliahan sampai dengan penyusunan skripsi ini;
- 2) Drs. M. Syamsu Rosid, Ph.D dan Dr. Ir. Eko Widiyanto, MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, serta pikiran dalam membimbing dan mendukung saya selama penyusunan skripsi ini;
- 3) Dr. Eng. Yunus Daud, M.Sc dan Drs. Hendar Gunawan, M.Sc selaku Penguji dalam sidang skripsi yang telah banyak meluangkan waktu dan memberikan masukan dalam penyelesaian skripsi ini;
- 4) Dr. Satoso Soekirno sebagai Ketua Departemen Fisika Universitas Indonesia dan Drs. M. Syamsu Rosid, Ph.D sebagai ketua Peminatan Geofisika, Universitas Indonesia dan Pembimbing Akademis penulis;
- 5) Fahmi Andrian Prabowo, terima kasih banyak atas semua dukungan, semangat dan bantuan sampai dengan skripsi ini diselesaikan;
- 6) Adikku Fitria Puspa Sari (iya), Kak Kiki dan Kak Wawan, terima kasih atas semua dukungan dan doa yang selalu dipanjatkan demi kesuksesan skripsi ini;

- 7) Anita Hartati, Yan Sulisty Arbi, Rahman Torkis, Kak Fristy dan Maulana, teman seperjuangan skripsi yang selalu saling membantu dan mengingatkan, semoga sukses selalu;
- 8) Semua dosen-dosen Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, terima kasih banyak Bapak dan Ibu, terima kasih banyak dan semoga semua ilmu dan pelajaran hidup yang diberikan dapat bermanfaat;
- 9) Semua Dosen Geofisika, diantaranya Pak Abdul Haris, Pak Syamsu Rosid, Pak Supriyanto, Pak Yunus Daus, Pak Kris Hendarjo dan dosen lain yang memperkenalkan dan mengajarkan ilmu Geofisika kepada Penulis.
- 10) Qonita Amriyah, Zulimatul Safaah, dan Ilham Kurniawan, sahabat yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis;
- 11) Semua teman-teman Fisika angkatan 2008 dan teman-teman Geofisika sesama angkatan 2008, terima kasih banyak atas semua doa dan dukungannya yang sangat berharga bagi saya;
- 12) Teman-teman fisika angkatan 2007, 2006, 2005 dan 2009, terima kasih atas semua bantuan dan dukungan yang diberikan;
- 13) Mba Ratna (Sekretariat), Pak Katman (Lab Elek), Pras (UPP), Mas Heri (Perpus Fisika), Pak Mardi, Pak Budi dan Pak Dwi.
- 14) AAPG-SC UI, HMGF UI, HMD Fisika, tempat Penulis mengembangkan kemampuan *softskill* dalam berorganisasi dan bersosialisasi;
- 15) Sahabat-sahabat SMP dan SMA penulis, Gina Lenggo Gini, Ovi Wulandari, Diana, Difa Novary, Bendi Devi, Ilham K, dan Ayu Fitriana, terima kasih banyak atas semua dukungannya;
- 16) Teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu saya. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Penulis

2012

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Indah Permata Sari
NPM : 0806452463
Program Studi : Fisika
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Skripsi

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

“Studi Komparasi Metode Filtering untuk Pemisahan Anomali Residual dan Regional dari Data Anomali Bouguer”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, 1 Juni 2012

Yang Menyatakan



Indah Permata Sari

0806452463

ABSTRAK

Nama : Indah Permata Sari
Program Studi : Fisika
Judul : **Studi Komparasi Metode Filtering untuk Pemisahan Anomali Residual dan Regional dari Data Anomali Bouguer**

Anomali Bouguer dalam survey gravitasi merupakan jumlah medan gravitasi yang dihasilkan oleh semua sumber anomali bawah permukaan, yaitu anomali regional dan residual. Anomali regional berasosiasi dengan frekuensi rendah dan anomali residual diidentifikasi dengan frekuensi tinggi yang mengandung informasi mengenai sumber anomali dangkal. Target dalam eksplorasi geofisika pada umumnya struktur-struktur kecil pada kedalaman yang dangkal. Hal inilah menyebabkan pemisahan anomali regional dan residual sangat penting dalam interpretasi data gravitasi. Pemisahan anomali dilakukan dengan variasi metode, yaitu, *polynomial trend surface analysis*, *upward continuation* dan *lowpass frequency filter*. Metode-metode tersebut di aplikasikan menggunakan model sintetik yakni model Syn dan model Intrusi. Hasil dari ketiga metode untuk memisahkan komponen regional dan residual kemudian ditampilkan dan dibandingkan. Dari hasil penelitian, diperoleh bahwa anomali regional dan residual yang dihasilkan oleh metode *polynomial trend surface analysis* mempunyai error yang paling minimum diantara kedua metode lain yang digunakan. Rms error anomali regional berturut-turut untuk metode *polynomial trend surface analysis*, *upward continuation* and *lowpass filter* dari model Syn adalah 0,706 mgal, 0,785 mgal, 0,766 mgal and dari model Intrusi yakni 0,410 mgal, 0,451 mgal, 0,540 mgal.

kata kunci : Anomali Bouguer, separasi regional-residual, *polynomial trend surface analysis*, *upward continuation*, *lowpass filter*

ABSTRACT

Name : Indah Permata Sari

Program Study : Physics

Title : **Studi Komparasi Metode Filtering untuk Pemisahan Anomali Residual dan Regional dari Data Anomali Bouguer**

Bouguer anomaly in gravity surveys are the sum of gravity fields produced by all underground sources, from residual and regional anomaly. Regional anomaly is identified by low frequency and residual anomaly is identified by high frequency that contains information of shallow sources. The targets for geophysical surveys are often small scale structure buried at shallow depths. That's why regional-residual field separation is essential in gravity data interpretation. A variety of separation techniques have been proposed, namely, polynomial trend surface analysis, upward continuation and lowpass frequency filter. The proposed methods were tested using variation of synthetic models, that are, Syn and Intrusion 3D models. Results from three methods to separate residual and regional component are presented, compared and evaluated. The results show regional and residual anomaly produced by polynomial trend surface analysis have minimal error than two other methods. The rms errors of regional anomaly of Syn model are 0.706 mgal, 0.785 mgal, 0.766 mgal and rms errors of regional anomaly of Intrusion model are 0.410 mgal, 0.451 mgal, 0.540 mgal for polynomial trend surface analysis, upward continuation and lowpass filter, respectively.

Keywords : Bouguer anomaly, regional-residual separation, polynomial trend surface analysis, upward continuation, lowpass filter

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Halaman Pernyataan Orisinalitas	ii
Halaman Pengesahan	iii
Kata Pengantar	iv
Abstrak	vii
Daftar Isi.....	ix
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah Penelitian.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Waktu dan Tempat Penelitian	4
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Jadwal Kegiatan Penelitian	6
1.7 Sistematika Penulisan.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Prinsip Dasar Metode Gravitasi	9
2.1.1 Hukum Newton	9
2.1.2 Percepatan Gravitasi	10
2.1.3 Potensial Gravitasi	10
2.2 Faktor Koreksi dalam Gravitasi	11
2.3 Anomali Bouguer	14
2.4 Transformasi Fourier	15
2.5 Analisis Spektrum	17
2.4 Proses Separasi Anomali Regional-Residual	20
2.4.1 Metode <i>Polynomial Trend Surface Analysis</i>	21
2.4.2 Metode <i>Upward Continuation</i>	24
2.4.3 Metode <i>Lowpass Filter</i>	26
BAB III MODEL SINTETIK	28
3.1 Rapat Massa Batuan	28
3.2 Pemodelan Kedepan (<i>Forward Modelling</i>)	29
3.3 Grav3d	31
3.4 Model Sintetik dan Anomali Sintetik	33
3.4.1 Model Syn.....	33
3.4.2 Model Intrusi	39
BAB IV PEMISAHAN ANOMALI RESIDUAL-REGIONAL	44
4.1 Anomali Bouguer Sintetik	44
4.2 Analisis Spektrum	45
4.2.1 Analisis Spektrum Model Syn	49
4.2.2 Analisis Spektrum Model Intrusi	51
4.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual	53

4.4 Metode <i>Polynomial Trend Surface Analysis</i>	53
4.4.1 Pengujian Metode <i>Polynomial TSA</i> Model Syn.....	54
4.4.2 Pengujian Metode <i>Polynomial TSA</i> Model Intrusi.....	61
4.5 Metode <i>Upward Continuation</i>	64
4.5.1 Pengujian Metode <i>Upward Continuation</i> Model Syn.....	66
4.5.2 Pengujian Metode <i>Upward Continuation</i> Model Intrusi	69
4.6 Metode <i>Lowpass Filter</i>	71
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	75
5.1 Model Sintetik dan Anomali Bouguer Sintetik	75
5.1.1 Model Syn	75
5.1.2 Model Intrusi	77
5.2 Analisis Spektum	79
5.2.1 Analisis Spektrum Model Syn	79
5.2.2 Analisis Spektrum Model Intrusi	81
5.3 Metode <i>Polynomial TSA</i>	83
5.3.1 Pengujian Metode <i>Polynomial TSA</i> Model Syn.....	85
5.3.2 Pengujian Metode <i>Polynomial TSA</i> Model Intrusi.....	89
5.4 Metode <i>Upward Continuation</i>	92
5.4.1 Pengujian Metode <i>Upward Continuation</i> Model Syn.....	92
5.4.2 Pengujian Metode <i>Upward Continuation</i> Model Intrusi	96
5.5 Metode <i>Lowpass Filter</i>	98
5.6 Anomali Optimum Masing-masing Metode	101
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	104
6.1 Kesimpulan	104
6.2 Saran	105
Referensi	106
Lampiran	107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bumi berbentuk ellips karena terjadinya pemipihan (Rosid. 2005)	11
Gambar 2.2	Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang dalam menentukan estimasi kedalaman sumber anomali (Fitriana, 2011).....	18
Gambar 2.3	Ilustrasi Proses Kontinuasi Keatas	25
Gambar 2.4	Frekuensi Filter diantaranya lowpass, high pass dan bandpass filter	27
Gambar 3.1	Model tiga dimensi dengan pendekatan prisma rectangular (Blakely,1995)	29
Gambar 3.2	Volume mesh yang digunakan dalam pemodelan sintetik	32
Gambar 3.3	Kolom untuk menambahkan blok dan memberi nilai densitasnya.....	33
Gambar 3.4	Model Syn sebagai model sintetik.....	34
Gambar 3.5	Model Syn 1 tampak atas	34
Gambar 3.6	Model Syn 1 dilihat dari beberapa sisi	35
Gambar 3.7	Respon Anomali Bouguer Sintetik dari model Syn.....	35
Gambar 3.8	Model benda sumber anomali dalam.....	36
Gambar 3.9	Respon gravitasi benda sumber anomali dalam (Anomali Regional)	36
Gambar 3.10	Model Syn 1 dengan 4 jenis benda penyebab anomali residual	37
Gambar 3.11	Respon gravitasi benda sumber anomali dangkal (Anomali Regional Teoritis – 4 Bodi).....	37
Gambar 3.12	(a) Model Syn 1 dengan 3 jenis benda penyebab anomali residual. (b) Anomali Regional Teoritis – 3 body	38
Gambar 3.13	(a) Model Syn 1 dengan 2 jenis benda penyebab anomali residual dan (b) Respon gravitasi- Anomali Regional Teoritis (2 body)	38
Gambar 3.14	Model Syn 1 dengan 1 jenis benda penyebab anomali residual dan (b) Anomali Regional Teoritis – 1 body	39
Gambar 3.15	Model Intrusi sebagai model pendekatan kondisi real untuk pengujian metode pemisahan anomali regional – residual	39
Gambar 3.16	Kontur anomali regional teoritis untuk model intrusi	40
Gambar 3.17	Kontur anomali residual teoritis untuk model intrusi.....	41
Gambar 3.18	(a) Model regional dengan luas 45000 m x 45000 m (b) Kontur anomali regional yang dihasilkan berupa <i>closure</i>	42
Gambar 3.18	(a) Model regional dengan luas 45000 m x 45000 m (b) Kontur anomali regional yang dihasilkan berupa <i>closure</i>	43
Gambar 4.1	Anomali Bouguer Sintetik dari (a) model Syn dan (b) model Intrusi	45
Gambar 4.2	Anomali Bouguer Sintetik dari model Syn yang menunjukkan lokasi 3 slice yang akan digunakan dalam proses analisis spektrum	47
Gambar 4.3	Anomali Bouguer Sintetik dari model Intrusi yang menunjukkan lokasi 2 lintasan yang akan digunakan dalam proses analisis spektrum	46
Gambar 4.4	Program Numeri yang digunakan dalam proses Transformasi Fourier.....	49
Gambar 4.5	Tren anomali regional dan residual lintasan 1. Spasi grid 160 m.....	50
Gambar 4.6	Tren anomali regional dan residual lintasan 1. Spasi grid 80 m.....	50
Gambar 4.7	Tren anomali regional dan residual lintasan 1. Spasi grid 320 m.....	51
Gambar 4.8	Tren anomali regional dan residual lintasan 2. Spasi grid 160 m.....	51

Gambar 4.9	Tren anomali regional dan residual lintasan 3. Spasi grid 160 m.....	52
Gambar 4.10	Tren anomali regional dan residual lintasan 1 model intrusi hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.	53
Gambar 4.11	Tren anomali regional dan residual lintasan 2 model intrusi hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.	53
Gambar 4.12	Diagram alir pemisahan anomali dengan metode Polynomial TSA	55
Gambar 4.13	Anomali Bouguer Sintetik dari model Syn 1	56
Gambar 4.14	Hasil proses TSA dengan persamaan polinomial orde	57
Gambar 4.15	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 1	57
Gambar 4.16	Hasil proses TSA dengan persamaan polinomial orde 2.....	58
Gambar 4.17	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 2.....	58
Gambar 4.18	Hasil proses TSA dengan persamaan polinomial orde 3.....	59
Gambar 4.19	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 3	59
Gambar 4.20	Hasil proses TSA dengan persamaan polinomial orde 4.....	60
Gambar 4.21	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 4.....	60
Gambar 4.22	Hasil proses TSA dengan persamaan polinomial orde 5.....	61
Gambar 4.23	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 5	61
Gambar 4.24	Anomali Bouguer model intrusi	62
Gambar 4.25	Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 1 untuk intrusi	62
Gambar 4.26	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 1(61)	
Gambar 4.27	Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 2 model intrusi.....	63
Gambar 4.28	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 2	63
Gambar 4.29	Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 3 model intrusi.....	64
Gambar 4.30	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 3	64
Gambar 4.31	Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 4 model intrusi.....	65
Gambar 4.32	Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 4	65
Gambar 4.33	Diagram alir pemisahan anomali dengan <i>upward continuation</i>	67
Gambar 4.34	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 1$ m.....	68
Gambar 4.35	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 50$ m.....	68
Gambar 4.36	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 200$ m.....	69
Gambar 4.37	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 500$ m.....	69
Gambar 4.38	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 700$ m.....	70
Gambar 4.39	Hasil proses kontinuasi keatas model Syn dengan ketinggian $h = 1000$ m.....	70
Gambar 4.40	Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 1$ m	71
Gambar 4.41	Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 100$	71
Gambar 4.42	Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 200$ m.....	72
Gambar 4.43	Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 500$ m.....	72
Gambar 4.44	Lowpass filter	73
Gambar 4.45	Penentuan bilangan gelombang cutoff dari proses analisis spektrum	74
Gambar 4.46	Hasil proses lowpass filter model Syn dengan lebar jendela 15.....	75
Gambar 4.47	Hasil proses lowpass filter model Intrusi dengan lebar jendela 15	76
Gambar 5.1	Model sintetik dan kontur anomali Bouguer sintetik	78
Gambar 5.2	Kontur anomali residual teoritis dan anomali regional teoritis	79
Gambar 5.3	Model intrusi sintetik dan kontur anomali Bouguer sintetik	80
Gambar 5.4	Kontur anomali residual teoritis dan anomali regional teoritis	80

Gambar 5.5	Proses analisis spektrum (a) Kontur anomali Bouguer dan lokasi 3 lintasan (b) Plot spektrum amplitude LnA terhadap bilangan gelombang	81
Gambar 5.6	Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan <i>Polynomial TSA</i> (a) Teoritis (b)orde 1 (c) orde 2 (d) orde 3. (e) orde 4. (f) orde 5	87
Gambar 5.7	Anomali residual hasil pemisahan anomali menggunakan <i>Polynomial TSA</i> (a) Teoritis (b)orde 1 (c) orde 2 (d) orde 3 (e) orde 4 (f) orde 5	88
Gambar 5.8	Plot rms error anomali regional terhadap orde polynomial TSA	90
Gambar 5.9	Plot rms error anomali residual terhadap orde polynomial TSA	90
Gambar 5.10	Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan <i>Polynomial TSA</i> (a) Teoritis (b)orde 1 (c) orde 2 (d) orde 3 (e) orde 4 (f) orde 5	91
Gambar 5.11	Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan <i>Polynomial TSA</i> (a) Teoriti (b)orde 1 (c) orde 2 (d) orde 3 (e) orde 4 (f) orde 5	92
Gambar 5.12	Plot rms error anomali regional terhadap orde polynomial model intrusi	93
Gambar 5.13	Plot rms error anomali residual terhadap orde polynomial model intrusi	93
Gambar 5.14	Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan metode <i>Upward Continuation</i> . (a) Anomali Regional Teoritis (b) Anomali residual h=5m. (c) h=50m. (d) h=150m. (e) h = 250m (f) h=500 m.....	93
Gambar 5.15	Anomali residual hasil pemisahan anomali menggunakan metode <i>Upward Continuation</i> . (a) Anomali Residual Teoritis (b) Anomali residual h=5m. (c) h=50m. (d) h=150m. (e) h = 250m (f) h=500 m.....	95
Gambar 5.16	Plot standar deviasi minimum (rms error) terhadap ketinggian bidang kontinuitas h dari data anomali regional	97
Gambar 5.17	Anomali regional model Intrusi hasil pemisahan anomali menggunakan metode <i>Upward Continuation</i> . (a) Anomali Regional Teoritis (b) h=100m. (c) h=200m. (d) h=250m. (e) h = 400m (f) h=800m	98
Gambar 5.18	Anomali regional model Intrusi hasil pemisahan anomali menggunakan metode <i>Upward Continuation</i> . (a) Anomali Residual Teoritis(b) h=100m. (c) h=200m. (d) h=250m. (e) h = 400m (f) h=800m	99
Gambar 5.19	Plot standar deviasi minimum (rms error) terhadap ketinggian bidang kontinuitas h dari data anomali regional model Intrusi (98)	
Gambar 5.20	Hasil Lowpass filter dengan lebar jendela 15 model Syn	101
Gambar 5.21	Hasil Lowpass filter dengan lebar jendela 15 model Intrusi	101
Gambar 5.22	Hasil Pemisahan Anomali Regional–Residual dari Model Syn	103
Gambar 5.23	Hasil Pemisahan Anomali Regional–Residual dari Model Intrusi	103

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Besar bilangan gelombang cutoff dan lebar jendela yang akan digunakan dalam proses filter <i>Lowpass</i> model Syn.....	75
Tabel 4.2 Besar bilangan gelombang cutoff dan lebar jendela yang akan digunakan dalam proses filter <i>Lowpass</i> model Intrusi	75
Tabel 5.1 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum untuk model Syn	82
Tabel 5.2 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum dengan bervariasi spasi grid untuk lintasan 1	83
Tabel 5.3 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum untuk model Intrusi	84
Tabel 5.4 Frekuensi potong (<i>cutoff frequency</i>) menggunakan analisis spektrum model Syn	84
Tabel 5.5 Frekuensi potong (<i>cutoff frequency</i>) menggunakan analisis spektrum model Intrusi.....	84
Tabel 5.6 Besar error rms anomali regional terhadap ketinggian bidang kontinuitas	96
Tabel 5.7 Besar error rms terhadap ketinggian bidang kontinuitas	99
Tabel 5.8 Rms error anomali regional Model Syn Untuk masing-masing metode	103
Tabel 5.9 Rms error anomali regional Model Intrusi Untuk masing-masing metode	103

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel densitas batuan	107
Lampiran 2. Kontinuitas keatas.....	108

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Metode gaya berat atau gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui struktur-struktur geologi bawah permukaan. Penerapan metode gaya berat untuk pencitraan struktur bawah permukaan telah banyak dilakukan dalam eksplorasi minyak dan gas bumi, panas bumi, mineral logam, air tanah dan studi geologi dan tektonik. Dalam metode gaya berat, data yang diperoleh dan setelah dilakukan koreksi-koreksi diantaranya koreksi apung (*drift*), *free air*, lintang, Bouguer dan terrain merupakan data anomali Bouguer. Anomali Bouguer merupakan gabungan hasil superposisi komponen anomali regional dan anomali residual. Anomali regional adalah komponen yang memberikan informasi mengenai benda-benda sumber anomali pada kedalaman yang dalam, bersifat *smooth* dan mempunyai frekuensi yang rendah, sedangkan anomali residual mempunyai frekuensi tinggi yang merepresentasikan benda-benda sumber anomali pada kedalaman yang dangkal.

Dalam eksplorasi, data yang digunakan dalam pemodelan dapat menggunakan data anomali residual dikarenakan pada eksplorasi wilayah *interest* berada pada kedalaman yang dangkal. Untuk mendapatkan data anomali residual, maka perlu dilakukan proses separasi regional-residual dari data anomali Bouguer. Oleh karena itu proses separasi regional-residual merupakan tahap yang sangat penting dalam memperoleh data anomali lokal karena dapat mempengaruhi proses interpretasi dan pemodelan baik 2D maupun 3D.

Telah dibahas sebelumnya bahwa anomali Bouguer terdiri dari komponen anomali regional dan residual. Dalam hal ini sebelum melakukan filtering, penting untuk melakukan analisis spektrum yang bertujuan untuk mengestimasi kedalaman anomali regional dan residual berdasarkan spektrum amplitude dan bilangan gelombang k dari data anomali Bouguer yang sebelumnya telah dilakukan proses transformasi Fourier. Proses transformasi Fourier sendiri

bertujuan untuk mengubah data anomali Bouguer yang merupakan data dalam domain spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang.

Metode yang digunakan untuk melakukan proses separasi bermacam-macam, yaitu *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Lowpass Frequency Filter* dan *Upward Continuation*. Metode *Polynomial Trend Surface Analysis* atau disebut juga Polinomial TSA merupakan salah satu metode separasi regional-residual dengan menggunakan pendekatan persamaan polinomial. Perhitungan dapat berupa polinomial orde 1 maupun polinomial orde 2 sampai dengan orde ke-n. Dari metode ini data anomali Bouguer yang didekati dengan persamaan polinomial kemudian direpresentasikan sebagai anomali regional. Dengan mengurangkan anomali regional tersebut terhadap anomali Bouguer maka akan di peroleh anomali residual yang ingin di cari.

Metode lain yang digunakan adalah filter panjang gelombang atau lebih akrab disebut filter frekuensi. Proses separasi regional-residual dengan filter frekuensi dapat dibagi menjadi beberapa metode misalnya *highpass frequency filter*, *lowpass frequency filter* dan *bandpass frequency filter*. Pada prinsipnya, proses filter frekuensi merupakan proses pemisahan frekuensi-frekuensi tertentu yang berasosiasi dengan kedalaman sumber anomali. Misalnya *Lowpass Frequency Filter*, dimana dengan filter ini, data anomali Bouguer yang mempunyai frekuensi-frekuensi rendah akan diloloskan atau membuang data dengan frekuensi tinggi yang berasosiasi benda sumber anomali dangkal. Dengan kata lain kita akan memperoleh data yang merepresentasikan anomali regional.

Metode selanjutnya yakni metode *Upward Continuation*, metode ini juga dapat digunakan dalam proses pemisahan anomali regional-residual dari data gravitasi. Metode *Upward Continuation* pada umumnya digunakan jika pengukuran gravitasi merupakan *land survey*, sedangkan pemakaian metode *Upward Continuation* dalam penelitian ini dikarenakan kebanyakan pengukuran gravitasi di Indonesia dilakukan di darat. Pada prinsipnya metoda kontinuitas keatas bekerja dengan membawa bidang pengukuran keatas dengan variasi jarak tertentu yang bertujuan untuk melihat tren anomali regional dari data anomali Bouguer. Namun begitu dalam metode ini, data anomali regional hanya didominankan dan meminimalkan data anomali residualnya untuk melihat tren

anomali regional tersebut. Dari ketiga metode yakni metode *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Frequency Filter* dan *Upward Continuation* didapatkan anomali regional. Kemudian dengan mengurangi anomali regional dengan anomali Bouguer maka akan diperoleh anomali residualnya.

Dari beberapa metode untuk melakukan proses separasi regional-residual tersebut, maka kemudian menjadi sangat penting untuk mengetahui efektivitas metode-metode separasi tersebut. Dengan demikian setelah mengaplikasikan metode-metode tersebut dengan menggunakan data anomali Bouguer sintetik diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik dari ketiga metode tersebut yang nantinya dapat diterapkan dalam data yang lebih real.

1.2 Batasan Masalah

Batasan masalah yang mendasari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- ④ Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah data anomali Bouguer sintetik yang merupakan data respon gravitasi yang disebabkan oleh benda-benda sumber anomali dangkal dan dalam. Model sintetik digunakan sebagai kontrol kebenaran dari proses pemisahan anomali.
- ④ Model dibuat tetap yakni tidak adanya variasi model atau kedalaman model, yang divariasikan hanya metode-metode pemisahan anomali regional-residual dan mencari metode yang paling optimum.
- ④ Metode pemisahan anomali yang digunakan diantaranya *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Upward Continuation* dan *Lowpass Filter*.
- ④ Proses estimasi kedalaman bidang batas anomali dan penentuan lebar jendela filter dilakukan dengan metode Analisis Spektrum.
- ④ Dalam penelitian ini salah satu metode yang digunakan adalah metode *Upward Continuation* dikarenakan sebagian besar pengukuran gravitasi di Indonesia dilakukan didarat (*Land Survey*).

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini didasari oleh beberapa tujuan diantaranya adalah sebagai berikut:

- ☛ Menguji dan mengaplikasikan metode filtering dalam separasi regional-residual dari data anomali Bouguer sintetis, diantaranya *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Lowpass Filtering* dan *Upward Continuation*.
- ☛ Mengetahui metode yang paling optimum diantara ketiga metode untuk model sintetis yang dibuat.
- ☛ Sebagai syarat untuk mendapatkan gelar sarjana S1 FMIPA Jurusan Fisika, Universitas Indonesia.

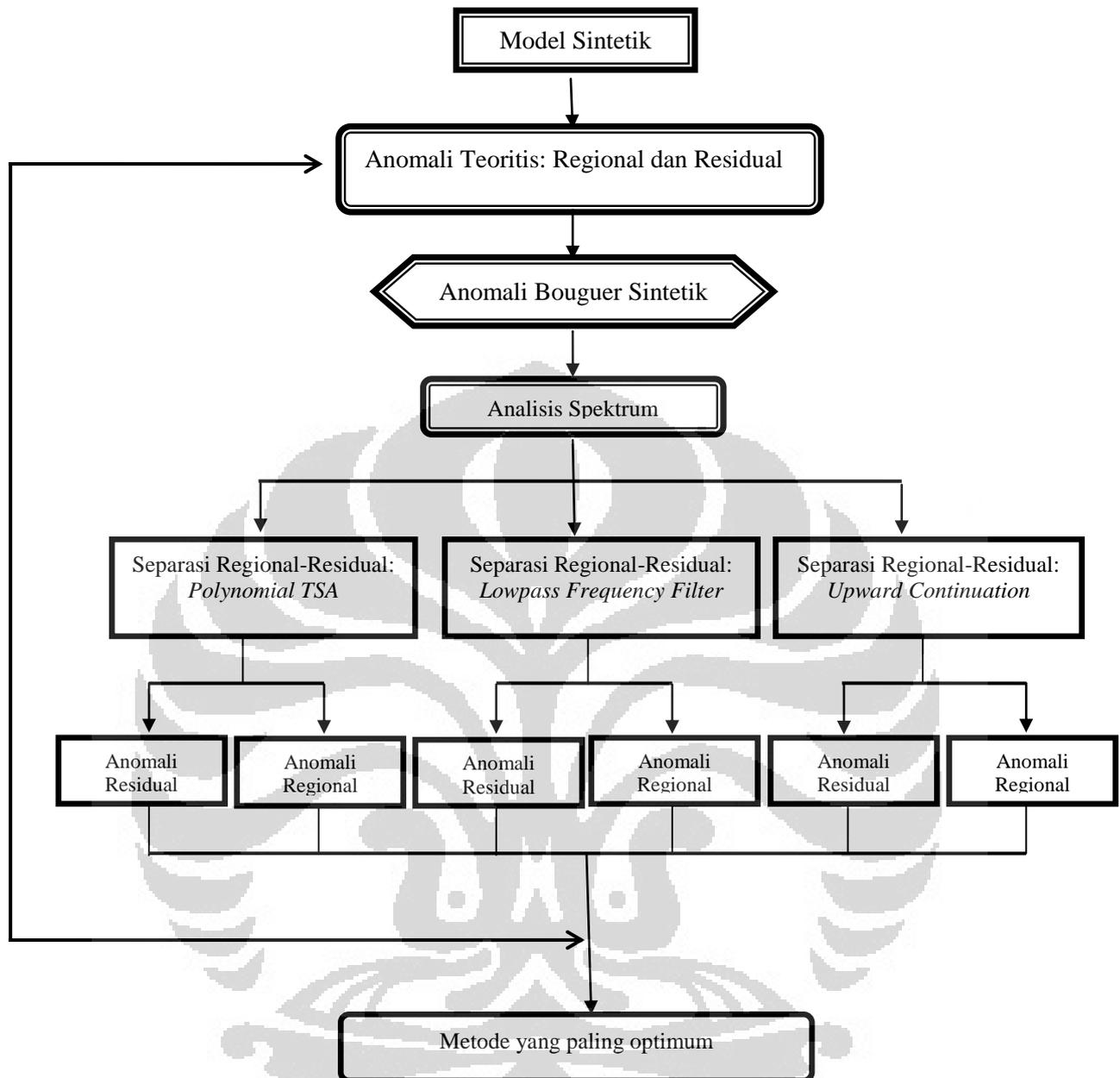
1.4 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dengan judul “**Studi Komparasi Metoda Filtering untuk Pemisahan Anomali Lokal dan Regional dari Data Anomali Bouguer**” telah dilaksanakan pada:

Waktu : Januari – Mei 2012
 Tempat : Universitas Indonesia
 Pembimbing : 1. Drs. M. Syamsu Rosid, Ph.D
 2. Dr. Ir. Eko Widiyanto, MT

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji metode *processing* yang dalam hal ini adalah separasi anomali gayaberat regional-residual dengan menggunakan data anomali bouguer sintetis atau model buatan. Metode yang digunakan terdiri dari tiga metode yaitu *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Upward Continuation* dan *Frequency Filter*. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan seperti dapat dilihat pada Gambar 1.1:



Gambar 1.1 Bagan alir penelitian

- ④ Membuat model sintetik dan mencari anomali regional teoritis dan anomali residual teoritis yang digunakan sebagai kontrol anomali regional dan residual hasil pemisahan anomali pada tahap berikutnya.
- ④ Proses *forward modelling* menghasilkan data anomali Bouguer sintetik yang akan dipakai dalam pengujian metode filtering.

- ④ Melakukan proses analisis spektrum untuk menentukan batas antara anomali regional dan residual dan mengetahui estimasi kedalaman anomali regional dan kedalaman anomali residual.
- ④ Melakukan proses separasi anomali Bouguer dengan menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis* atau *Polynomial TSA*, *Lowpass Filter* dan *Upward Continuation*.
- ④ Menganalisis kontur anomali residual dan regional yang dihasilkan dari ketiga metode dan membandingkan dengan anomali regional dan residual teoritis.
- ④ Mencari anomali regional dan residual optimum untuk masing-masing metode dan menentukan metode yang paling baik.

1.6 Jadwal Kegiatan Penelitian

Adapun alur waktu masa penelitian ini dijabarkan dalam Tabel 1.1:

Tabel 1.1 Jadwal kegiatan penelitian

No	Tahapan	2012				
		Februari	Maret	April	Mei	Juni
1	Studi Literatur					
2	Pembuatan Proposal					
3	Pembuatan model dan data anomali bouguer sintetik					
4	Pembuatan algoritma dengan Matlab					
5	Pengujian metode Filtering					
6	Analisis hasil separasi					
7	Hasil dan Pembahasan					
9	Pembuatan Laporan					
10	Sidang					

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam laporan tugas akhir ini diantaranya:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang dilaksanakan penelitian ini, tujuan daripada penelitian, waktu dan tempat penelitian, batasan masalah, metodologi yang digunakan dalam penelitian, tata waktu atau jadwal serta sistematika penulisan laporan penelitian.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan topik yang akan diteliti pada penelitian ini yakni studi komparasi metoda filtering dalam pemisahan anomali residual dan regional, maka pada bab ini akan dibahas mengenai dasar teori yang digunakan sebagai rujukan penggunaan metode-metode filtering, diantaranya prinsip dasar metode *Trend Surface Analysis*, *Lowpass Filter* dan *Upward Continuation*.

Selain itu akan dijabarkan juga mengenai dasar-dasar metode gravitasi, transformasi Fourier secara matematis dan penjelasan dan penjabaran matematis dari analisis spektrum.

BAB III: MODEL SINTETIK

Penelitian kali ini, penulis menggunakan data anomali Bouguer sintetik untuk menguji metode-metode pemisahan anomali regional-residual. Untuk itu pada bab ini akan dibahas mengenai pembuatan model sintetik dan proses *forward modelling* untuk memperoleh nilai anomali gravitasinya. Pada bab ini juga akan ditampilkan kontur hasil pemodelan sintetik, kontur respon gravitasi yang menyatakan anomali regional dan kontur anomali residual yang dicari sebagai estimasi dan kontrol hasil ketika anomali Bouguer tersebut diseparasi.

BAB IV: PEMISAHAN ANOMALI REGIONAL DAN RESIDUAL

Proses pemisahan anomali regional dan residual merupakan bahasan utama pada penelitian kali ini, untuk itu pada bab ini akan dibahas bagaimana data

anomali Bouguer diseparasi dengan metode-metode filtering diantaranya metode polinomial TSA, kontinuitas keatas dan tapis lolos rendah (*Lowpass Filter*). Selain itu juga dibahas proses dan ditampilkan hasil dari proses analisis spektrum, dimana kedalaman anomali regional dan residual dapat diestimasi.

Bab V: HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, anomali regional dan residual yang dihasilkan dari masing-masing metode akan dibahas dan dianalisis. Dengan melihat rms error dan karakteristik masing-masing metode, dalam bab ini juga akan ditentukan metode pemisahan anomali manakah yang sesuai dengan model sintetik yang dibuat.

BAB VI: KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang telah dirangkum dari pembahasan pada bab-bab sebelumnya akan dipaparkan di bab ini, serta saran-saran yang direkomendasikan penulis jika selanjutnya akan dilakukan penelitian lebih lanjut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Dasar Metoda Gravitasi

Metode gravitasi merupakan salah satu metode dalam geofisika eksplorasi yang digunakan untuk memetakan variasi nilai percepatan gravitasi yang dapat merepresentasikan distribusi rapat massa bawah permukaan. Dengan mengetahui distribusi rapat massa pada suatu daerah dan menganalisa anomali rapat massa tersebut, diharapkan kita dapat mengetahui struktur geologi bawah permukaan serta wilayah yang berpotensi mengandung sumber daya alam. Dasar teori yang digunakan dalam metode gayaberat adalah Hukum Newton yang membahas tentang gravitasi bumi.

2.1.1 Hukum Newton

Berdasarkan Hukum Gravitasi Newton yang merupakan dasar dari metoda gravitasi (Blakely, 1995), besar gaya gravitasi atau gaya tarik menarik (F) dua benda sebanding dengan massa kedua benda tersebut yakni m_1 dan m_2 dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak r keduanya. Semakin besar jarak antara kedua benda tersebut, maka gaya tarik-menarik antara keduanya semakin kecil. Pernyataan tersebut dapat dirumuskan dalam persamaan berikut ini:

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

dimana F merupakan gaya gravitasi /tarik menarik antara dua benda bermassa m_1 dan m_2 (Newton), $\gamma =$ konstanta Gravitasi yang nilainya $6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$, sedangkan:

$m_1 =$ massa benda 1

$m_2 =$ massa benda 2

$r =$ jarak dua buah benda bermassa m_1 dan m_2

2.1.2 Percepatan Gravitasi

Besaran yang diukur dalam metode gravitasi merupakan percepatan gravitasi antara dua buah massa. Sebagai contoh percepatan gravitasi yang dialami suatu massa benda m_1 misalnya massa pegas pada alat gravimeter akibat tarikan massa benda lain m_2 misalnya Bumi yang merupakan gaya per satuan massa yang dinyatakan sebagai berikut:

$$g = \frac{F}{m_2} \quad \dots(2.2)$$

dimana F adalah gaya tarik menarik antara dua buah massa, g adalah percepatan gravitasi dan m_2 adalah massa benda 2. Jika persamaan (2.2) di substitusi ke persamaan (2.1), sehingga dapat dimodifikasi menjadi:

$$g = \gamma \frac{m_1}{r^2} \quad \dots(2.3)$$

γ merupakan konstanta Gravitasi dan r adalah jarak kedua massa. Dan jika m_2 atau m merupakan massa bumi dan m_1 merupakan massa pegas, maka persamaan percepatan gravitasi dapat dimodifikasi menjadi persamaan berikut ini:

$$g = \gamma \frac{m_1}{r^2} = \gamma \frac{\rho v}{R^2} \quad \dots(2.4)$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa percepatan gravitasi bumi bervariasi tergantung dari jarak jari-jari bumi R . Nilai jari-jari bumi ini bervariasi dikarenakan salah satunya jejari di ekuator lebih besar 21 km dibandingkan jari-jari kutub dan adanya ketidakhomogenan massa (ρv) di kerak bumi serta topografi di permukaan bumi. Percepatan gravitasi diatas menyatakan ukuran medan gravitasi bumi yang bekerja pada suatu titik, dengan satuan $\frac{\text{cm}}{\text{dt}^2}$ (sistem cgs) atau mgal ($1 \text{ mgal} = 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{dt}^2}$) yang lebih populer digunakan dalam ilmu geofisika.

2.1.3 Potensial Gravitasi

Massa yang terdapat pada suatu ruang tertentu dapat menimbulkan suatu medan potensial skalar disekitarnya. Percepatan gravitasi merupakan medan konservatif dimana nilainya tidak bergantung pada lintasan yang ditempuhnya melainkan bergantung posisi awal dan posisi akhir.

Percepatan gravitasi ini dapat di rumuskan sebagai gradien dari medan potensial skalar gravitasi (Blakely,1995). Dari persamaan tersebut kita dapat mengetahui medan potensial gravitasi.

$$\vec{\nabla} \times \vec{g} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla}U(r) = 0$$

Jadi , $\vec{\nabla}U(r) = \vec{g}(r)$

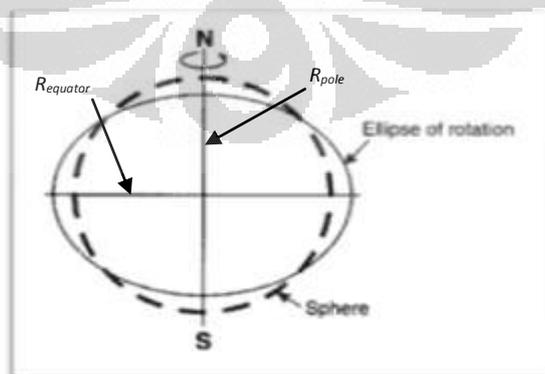
$$\vec{\nabla}U(r) = \frac{\vec{F}_r}{m_2} = \gamma \frac{m}{r} \quad \dots(2.5)$$

dimana fungsi U merupakan potensial gravitasi atau potensial Newtonian sedangkan percepatan gravitasi \vec{g} merupakan medan potensial.

2.2 Faktor Koreksi dalam Pengukuran Gravitasi

Bumi dalam kenyataannya tidak berbentuk bola sempurna melainkan ia mengalami pemipihan/*flattened* akibat adanya rotasi bumi. Gaya *centrifugal* yang muncul akibat rotasi ini menyebabkan resultan gaya gravitasi tidak mengarah ke pusat bumi. Selain itu, terjadinya rotasi juga menyebabkan jari-jari di ekuator $R_{equator}$ lebih besar 21 km daripada jari-jari di kutub R_{pole} karena gaya *centrifugal* yang menarik massa ke luar (Rosid, 2005).

$$R_{equator} = R_{pole} + 21 \text{ km} = 6378 \text{ km}$$



Gambar 2.1 Bumi berbentuk ellipskarena terjadinya pemipihan efek dari rotasi bumi (Rosid, 2005)

Dengan demikian, bentuk bumi secara matematik dapat ditampilkan sebagai sebuah *ellips* yang berotasi atau *oblate spheroid* dimana topografi permukaan bumi juga merupakan hal penting yang dapat mempengaruhi pengukuran gravitasi. Sehingga dalam pengukuran gravitasi bumi, nilai gravitasi khususnya di kerak bumi dapat dipengaruhi beberapa hal, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Latitude* atau lintang
2. *Tidal* atau pasang surut
3. Variasi densitas
4. Topografi

Oleh karena itu, setelah dilakukan pengukuran, ada beberapa koreksi yang harus diperhatikan dalam mencari nilai gravitasi, diantaranya:

- a) Koreksi Apungan Alat (*Drift Correction*)
- b) Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)
- c) Koreksi Pasang Surut (*Tidal Correction*)
- d) Koreksi dan Ketinggian (*Free Air Correction*)
- e) Koreksi Massa Batuan (*Rock Density/Bouguer Correction*)
- f) Koreksi Medan Pengukuran (*Terrain Correction*)

a. Koreksi Apungan Alat (*Drift Correction*)

Hasil pengukuran gravitasi suatu tempat akan berubah pada suatu waktu. Hal ini dikarenakan akibat penyimpangan alat selama transportasi (karena mengalami guncangan serta mengalami kelelahan mekanis dan sebagainya) maupun karena faktor suhu. Koreksi drift dimaksudkan untuk mengurangi pengaruh penyimpangan alat tersebut, dilakukan dengan mengukur kembali ke stasiun basis (*base-station*) pada waktu yang berbeda (Reynolds, 1997). Koreksi drift ini dilakukan pada base-camp masing-masing tergantung looping yang dilakukan.

b. Koreksi Pasang Surut

Pasang surut bumi terjadi akibat adanya tarikan benda-benda angkasa khususnya matahari dan bulan terhadap bumi. Perubahan tersebut bersifat

periodik sesuai dengan posisi relatif bumi - bulan - matahari. Perubahan nilai gravitasi di suatu tempat terhadap waktu juga dapat disebabkan oleh adanya pasang surut bumi ini (Reynolds, 1997). Koreksi dilakukan dengan membuat kurva-kurva koreksi pada interval waktu pengamatan setiap hari dan harga koreksi diinterpolasi dari kurva-kurva tersebut. Di daerah di Indonesia, efek pasang surut ini bernilai sampai dengan 0.3 mgal. Koreksi ini dikurangkan dengan nilai gravitasi yang terukur.

c. Koreksi Lintang

Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa nilai gravitasi bervariasi terhadap lintang. Mengingat bahwa bumi tidak bulat sempurna melainkan sferoid yaitu cembung di bagian ekuator dan pepat di bagian kutub (Rosid, 2005). Pemipihan ini dikarenakan karena bumi berotasi. Berdasarkan *International Union Geodesy and Geophysics (IUGG)*, perumusan yang digunakan untuk menentukan nilai gravitasi terhadap lintang yaitu *Geodetic Referensi System 67* (Rosid, 2005) dapat dinyatakan :

$$g_{\phi} = 978,031846 (1 + 0,005278895 \sin^2 \phi + 0,000023462 \sin^4 2\phi) \dots (2.6)$$

$$\phi = \text{lintang geografis}$$

Karena nilai gravitasi sangat dipengaruhi inti dan mantel bumi, sedangkan pengaruh kerak bumi yang cukup kecil, nilai gravitasi yang dipengaruhi oleh kerak bumi inilah yang akan dianalisis. Pengukuran gravitasi ini sangat diharapkan dapat mendeteksi perubahan gravitasi yang sangat kecil sekalipun. Koreksi lintang yang dilakukan kemudian dikurangkan dengan nilai g yang terukur $g_{\text{obs}} - g_n$.

d. Koreksi Free-Air (*Free-Air Anomaly*)

Pengukuran nilai gravitasi dilakukan dengan melihat bidang geoid atau muka laut rata-rata sebagai bidang referensi. Koreksi free-air ini merupakan perbedaan nilai gravitasi antara bidang referensi dengan bidang geoid atau elevasi h (Reynolds, 1997). Koreksi free-air dapat dinyatakan dengan: $\delta g_{FA} = 0.3086 \text{ mgal/m} = 0.3086 h \text{ mgal}$. Koreksi free-air bernilai positif jika titik

pengukuran berada diatas muka air laut rata-rata sedangkan jika berada dibawah bidang geoid maka akan bernilai negatif.

e. Koreksi Bouger (*Bouguer Anomaly*)

Koreksi Bouguer merupakan koreksi yang dilakukan untuk menghilangkan adanya perbedaan ketinggian dengan tidak mengabaikan massa di bawahnya (Reynolds, 1997). Perbedaan ketinggian tersebut akan mengakibatkan adanya pengaruh massa di bawah permukaan yang mempengaruhi besarnya percepatan gayaberat di titik pengukuran. Persamaan untuk mencari nilai koreksi Bouguer yakni $\delta g_B = 2\pi G \rho h = 0.04192 \rho h$ mgal untuk pengukuran didarat dan $\delta g_B = 2\pi G (\rho_{rock} - \rho_{water}) h$ mgal untuk pengukuran di laut dengan ρ adalah densitas rata-rata batuan di suatu area dan h kedalaman benda anomali.

f. Koreksi Terrain

Koreksi Terrain atau koreksi medan dilakukan untuk mengkoreksi adanya pengaruh penyebaran massa yang tidak teratur di sekitar titik pengukuran (Reynolds, 1997). Pada koreksi bouguer diasumsikan bahwa titik pengukuran di lapangan berada pada suatu bidang datar yang sangat luas. Sedangkan kenyataan di lapangan memiliki topografi yang unik berupa kumpulan lembah dan gunung, maka koreksi Bouguer di atas masih harus dikoreksi.

Jika dalam pengukuran terdapat bukit, maka pegas akan tertarik massa bukit, sehingga panjang pegas dalam gravimeter memendek, dengan demikian perpendekan panjang pegas ini dapat mengurangi nilai gravitasi yang diukur, oleh karena itu koreksi terrain harus ditambahkan. Sedangkan pengaruh lembah atau jurang juga memberikan efek yang sama, karena tidak ada massa yang menarik pegas maka pegas juga memendek. Hal ini dapat mengurangi nilai gravitasi yang terukur sehingga perlu dikoreksi yakni dengan ditambahkan dalam koreksinya.

2.3 Anomali Bouguer

Anomali Bouguer merupakan respon gravitasi yang diperoleh setelah dilakukan berbagai koreksi seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya. Anomali Bouguer merupakan data yang akan digunakan dalam proses selanjutnya misalnya proses pemisahan anomali regional-residual maupun proses analisis spektrum. Perlu diingat bahwa anomali Bouguer yang diperoleh telah dikoreksi sehingga anomali bouguer yang diperoleh merupakan respon anomali yang berasal dari benda anomali bawah permukaan. Perhitungan nilai anomali Bouguer untuk setiap titik stasiun dengan menerapkan koreksi-koreksi yang disebutkan sebelumnya, dapat dicari menggunakan persamaan berikut ini (Reynolds, 1997):

$$\text{Anomali Bouguer} = g_{obs} - (g_{normal} \pm g_{freeair} \mp g_{bouguer} + TC) \quad \dots(2.7)$$

Dari persamaan tersebut kita dapat mengetahui nilai anomali dengan mengurangi nilai gravitasi terukur di titik amat g_{obs} dengan koreksi-koreksi seperti koreksi normal yakni perubahan nilai gravitasi terhadap posisi lintang bumi, faktor koreksi $g_{freeair}$ dinyatakan dengan 0.3045/m (mgal), sedangkan koreksi Bouguer dapat dicari dengan persamaan $2\pi G\rho h$ (mgal) dimana G merupakan konstanta gravitasi bumi, dan koreksi terrain atau koreksi medan.

Namun begitu anomali Bouguer yang diperoleh masih terdiri dari anomali regional yakni pengaruh benda anomali dalam dan anomali residual akibat benda-benda anomali dangkal. Proses pemisahan anomali diperlukan untuk mengetahui anomali yang disebabkan oleh benda-benda anomali dangkal dikerak bumi, dikarenakan sebagian besar eksplorasi khususnya, wilayah *interest* berada dikerak bumi dengan kedalaman yang dangkal (residual).

2.4 Transformasi Fourier

Proses pemisahan anomali regional-residual pada umumnya dilakukan dalam domain frekuensi, mengingat benda-benda anomali residual berasosiasi dengan frekuensi tinggi sedangkan anomali regional berasosiasi dengan frekuensi rendah. Untuk itu data gravitasi yang merupakan data dalam domain spasial

harus terlebih dahulu ditransformasi menjadi domain frekuensi. Transformasi Fourier berdasarkan *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics* (Sheriff, 2001) merupakan formula yang digunakan untuk mengkonversi data dalam domain waktu atau spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang.

Transformasi Fourier yang diturunkan Blakely (1995) untuk kasus 2D atau terdiri dari dua variabel dapat dirumuskan secara sederhana seperti persamaan 2.8 berikut ini:

$$G(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad \dots(2.8)$$

dimana (k_x, k_y) merupakan bilangan gelombang (frekuensi) yang berasosiasi dengan koordinat (x, y) , berturut-turut $k_x = 2\pi/\lambda_x$ dan $k_y = 2\pi/\lambda_y$.

Dikarenakan data anomali gravitasi yang dalam hal ini $f(x, y)$ diketahui pada diskrit point dan juga keterbatasan komputer, maka digunakan transformasi Fourier Diskrit atau *Discrete Fourier Transform* yang dapat dituliskan dengan rumus:

$$G(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) e^{-2\pi i \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right)} \quad \dots(2.9)$$

dimana, (m, n) = bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan grid point dalam domain spasial

(k, l) = bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan grid point dalam domain frekuensi

(M, N) = bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan jumlah kolom dan baris data.

Perlu diingat bahwa data pada awalnya ditampilkan dalam kontur anomali merupakan data dalam domain spasial atau waktu, dan proses filtering dilakukan dalam domain frekuensi, dan untuk menampilkan data tersebut kembali perlu dilakukan *inverse fourier transform* yakni mengembalikan data dalam domain frekuensi menjadi data dalam domain spasial. Proses inversi transformasi Fourier dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$g(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad \dots(2.10)$$

Sedangkan transformasi inverse dalam kasus diskrit, dapat dijabarkan dalam persamaan 2.11:

$$g(m, n) = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(k, l) e^{2\pi i \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right)} \quad \dots(2.11)$$

2.4 Analisa Spektrum

Data anomali Bouguer yang diperoleh merupakan hasil superposisi dari komponen anomali regional dan komponen anomali residual. Kedalaman anomali baik regional maupun residual menjadi suatu persoalan yang sangat penting pada tahap interpretasi lebih lanjut untuk mengetahui posisi dan kedalaman target. Analisis spektrum merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk membantu mengetahui estimasi kedalaman anomali regional dan residual dari data anomali Bouguer. Selain itu proses analisis spektrum juga digunakan untuk menentukan lebar jendela filter (*window filter*) yang akan dipakai dalam proses separasi anomali regional-residual.

Proses analisis spektrum biasanya dilakukan dalam satu dimensi, dimana anomali Bouguer yang terdistribusi pada penampang *cross section* **1D** diekspansi dengan deret Fourier. Proses Transformasi Fourier dilakukan dengan tujuan mengubah data dari domain waktu atau spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang. Dengan menganalisis bilangan gelombang (k) dan amplitudo (A), kita dapat memperkirakan besar kedalaman estimasi anomali regional dan residual serta dapat menentukan lebar jendela filter dari perhitungan frekuensi cutoff dari analisis spektrum.

Transformasi Fourier untuk penampang lintang 1D data anomali Bouguer yang diturunkan oleh Blakely (1995) yakni:

$$G(k) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{-ikx} dx \quad \dots(2.12)$$

dimana k dalam persamaan diatas merupakan bilangan gelombang terhadap panjang gelombang λ atau frekuensi f , dimana nilainya:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Transformasi Fourier $G(k)$ merupakan fungsi kompleks yang terdiri dari bagian real dan bagian imajiner yakni $G(k) = \text{real } G(k) + \text{imajiner } G(k)$, atau dapat ditulis kembali menjadi:

$$G(k) = A(k) e^{i\theta(k)} \quad \dots(2.13)$$

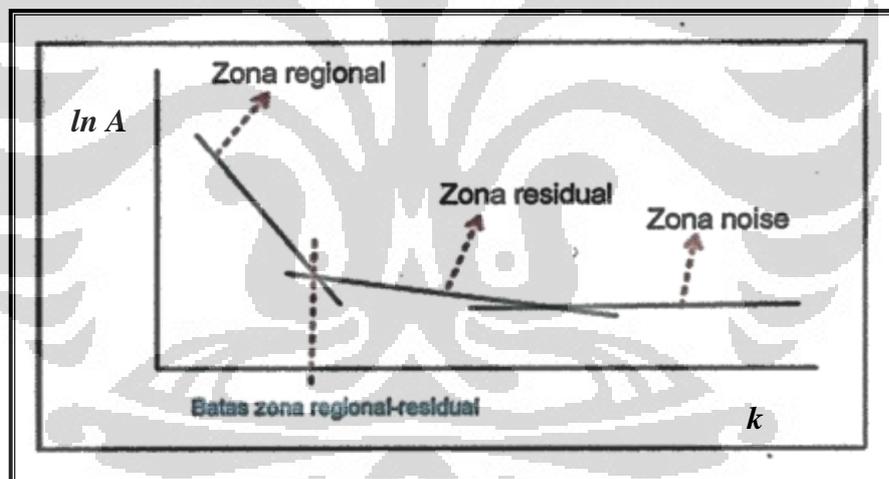
dimana

$$A(k) = [(\text{Re } G(k))^2 + (\text{Im } G(k))^2]^{1/2}$$

$$\theta(k) = \arctan \frac{\text{Im } G(k)}{\text{Real } G(k)}$$

Fungsi $A(k)$ merupakan spektrum amplitude, sedangkan $\theta(k)$ adalah spektrum fase. Persamaan $A(k) = [(\text{Re } G(k))^2 + (\text{Im } G(k))^2]^{1/2}$ dikenal juga persamaan power spectrum.

Proses penentuan estimasi kedalaman anomali regional dan residual dilakukan dengan menganalisis spektrum amplitudo terhadap bilangan gelombang k , dimana slope atau kemiringan grafik menunjukkan kedalaman sumber anomali.



Gambar 2.2 Grafik hubungan antara amplitudo dan bilangan gelombang dalam menentukan estimasi kedalaman sumber anomali (Fitriana, 2011).

Sama halnya dengan persamaan power spectrum yang diturunkan oleh Blakely (1995) pada suatu bidang horizontal dengan ketinggian z_0 dan benda bawah permukaan misalnya pada kedalaman z' , dimana $z' > z_0$. Persamaan power spectrum diturunkan dari medan potensial gayaberat yang bergantung dari variasi $\frac{1}{r}$. Transformasi Fourier dalam hal ini dapat di tuliskan sebagai berikut:

$$F\left[\frac{1}{r}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2+(z_0-z')^2}} e^{-i(k_x x+k_y y)} dx dy \quad \dots(2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{dimana} \quad x &= a \cos \theta & a &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ y &= a \sin \theta \\ k_x &= k \cos \theta & k &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \\ k_y &= k \sin \theta \\ w &= z_0 - z' \end{aligned}$$

dari hasil perhitungan matematis diperoleh persamaan seperti berikut ini:

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{k(z_0-z')}}{|k|} \quad \dots(2.15)$$

potensial gravitasi di point mass μ diberikan $U = \gamma\mu/r$, dimana γ merupakan konstanta Gravitasi sehingga Transformasi Fourier dapat ditulis kembali menjadi:

$$F(U) = \gamma\mu F\left(\frac{1}{r}\right) \quad \dots(2.16)$$

$$F(U) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{k(z_0-z')}}{|k|} \quad \dots(2.17)$$

dikarenakan percepatan vertikal gravitasi g_z merupakan turunan dari $\gamma\mu/r$ atau $g_z = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}$, maka persamaan 2.14 dapat dimodifikasi menjadi:

$$\begin{aligned} F[g_z] &= \gamma\mu F\left[\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right] \\ &= \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F\left[\frac{1}{r}\right] \\ &= 2\pi\gamma\mu e^{k(z_0-z')} \end{aligned} \quad \dots(2.18)$$

dimana:

- g_z = anomali gayaberat
- k = bilangan gelombang
- z_0 = ketinggian titik amat terhadap bidang geoid
- z' = kedalaman benda anomali terhadap bidang geoid

jika $2\pi\gamma\mu$ merupakan konstanta C, sehingga transformasi Fourier anomali gayaberat dapat dimodifikasi menjadi (Blakely,1995):

$$A = C e^{k(z_0-z')} \quad \dots(2.19)$$

dimana, A = amplitudo
C = konstanta

Nilai amplitudo dalam hal ini dapat di cari menggunakan persamaan spektrum amplitudo seperti pada persamaan $A(k) = [(Re G(k))^2 + (Im G(k))^2]^{1/2}$. Selanjutnya dengan cara melogaritmakan hasil transformasi Fourier tersebut diatas, maka akan diperoleh hubungan antara amplitude spektrum (A) dengan bilangan gelombang (k) dan kedalaman anomali yang nilainya ($z_0 - z'$):

$$\ln A = (z_0 - z')|k| \quad \dots(2.20)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.21), kita dapat menentukan kedalaman bidang batas diskontinuitas suatu sumber anomali ($z_0 - z'$) dengan memplot nilai logaritma amplitudo $\ln A$ terhadap bilangan gelombang k . Dengan demikian kedalaman bidang batas sumber anomali ($z_0 - z'$) dapat langsung diketahui dari slope atau kemiringan grafik $\ln A$ terhadap k .

2.4 Proses Separasi Regional-Residual

Data yang diperoleh setelah melakukan koreksi-koreksi yang dijabarkan diatas adalah data anomali Bouguer. Anomali Bouguer merupakan total dari anomali residual dan regional, dimana secara matematis dapat dituliskan seperti berikut:

$$g_{bouguer} = g_{reg} + g_{res} \quad \dots(2.21)$$

dimana,

- $g_{bouguer}$: anomali bouguer
- g_{reg} : anomali regional
- g_{res} : anomali residual

Sehingga untuk memperoleh anomali residual yang merepresentasikan benda-benda anomali di kedalaman dangkal maka perlu dilakukannya pemisahan antara anomali regional dan residualnya dengan cara mengurangi anomali bouguer dengan anomali regionalnya.

$$g_{res} = g_{bouguer} - g_{reg} \quad \dots(2.22)$$

Pada umumnya terdapat beberapa metoda dalam proses separasi regional-residual yang digunakan untuk memperoleh nilai anomali regional, diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. *Trend Surface Analysis* atau *Polynomial Fitting*
- b. *Lowpass Filter*
- c. *Upward Continuation*

Pada dasarnya metode separasi dilakukan untuk memisahkan anomali-anomali berdasarkan frekuensi yang berasosiasi dengan kedalaman sumber anomali tersebut. Anomali residual berasosiasi dengan frekuensi tinggi, sedangkan anomali regional berasosiasi dengan frekuensi rendah. Tujuan dilakukannya proses separasi ini adalah untuk memperoleh nilai anomali residual dan regional yang representatif keadaan bawah permukaan yang sebenarnya.

a. Metode TSA atau Trend Surface Analysis

Proses pemisahan anomali regional dan residual dapat dilakukan dengan metode pendekatan persamaan polinomial terhadap data-data anomali Bouguer yang akan diproses. Metode ini dikenal dengan sebutan *Trend Surface Analysis (TSA)* atau disebut juga *Polynomial Fitting*. Persamaan polinomial yang digunakan bervariasi di antaranya polinomial ber-orde n , misalnya untuk pendekatan polinomial orde-2 atau fungsi kuadrat dan fungsi kubik atau polinomial orde-3. Hubungan data yang dalam hal ini percepatan gravitasi dengan parameter model dapat dinyatakan pada persamaan berikut ini:

$$g_i = c_1 x_i^0 + c_2 x_i^1 + c_3 x_i^2 + \dots + a_{n+1} x_i^n \quad \dots(2.23)$$

$$g_i = \sum_{j=1}^M x_i^{j-1} c_j$$

dimana $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Karena umumnya data gravitasi diperoleh dalam anomali 2D atau memiliki 2 variabel bebas yakni x dan y , maka persamaan dapat dimodifikasi menjadi:

$$g(x, y) = c_1 x_i^0 y_i^0 + c_2 x_i^1 y_i^0 + c_3 x_i^0 y_i^1 + \dots + c_{n+1} x_i^n y_i^n \quad \dots(2.24)$$

$$g(x, y) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M x_i^{j-1} y_i^k c_j$$

Pada umumnya persamaan polinomial yang sering digunakan dalam *Polynomial Trend Surface* dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Polinomial orde 1 dalam x dan y

Persamaan polinomial orde 1 dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut ini:

$$g_i = c_1 + c_2 x_i + c_3 y_i$$

2. Polinomial orde 2

Persamaan polinomial orde 2 atau fungsi kuadratik, dimana pangkat polinomial tertinggi yakni mempunyai orde 2 dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$g_i = c_1 + c_2 x_i + c_3 y_i + c_4 x_i y_i + c_5 x_i^2 + c_6 y_i^2$$

3. Polinomial orde 3

Pada persamaan polinomial orde 3 atau fungsi kubik, jumlah pangkat tertinggi yakni pangkat 3 dan jumlah konstanta c berjumlah 10. Persamaan tersebut dapat dituliskan seperti berikut ini:

$$g_i = c_1 + c_2 x_i + c_3 y_i + c_4 x_i^2 + c_5 x_i y_i + c_6 y_i^2 + c_7 x_i^3 + c_8 x_i^2 y_i + c_9 x_i y_i^2 + c_{10} y_i^3$$

dimana,

$i = 1, 2, 3, \dots, n$	= jumlah titik pengukuran
g_i	= anomali gravitasi ke-i
x_i, y_i	= koordinat titik pengukuran
$c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$	= konstanta polinomial yang dicari

Pada prinsipnya, dalam metode separasi menggunakan *Polynomial Trend Surface Analysis* ini yakni mencari konstanta-konstanta $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$. Dengan mengetahui nilai konstanta-konstanta tersebut maka akan diperoleh persamaan polinomial yang mendekati nilai anomali bouguer yang telah diketahui.

Untuk memperoleh besar konstanta $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$, kita dapat menulis persamaan polinomial tersebut dalam bentuk matriks. Berikut ini contoh bentuk matriks untuk persamaan polinomial orde 2:

$$\begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \dots & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & \dots & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_i & y_i & \dots & y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad \dots(2.25)$$

Atau dapat disederhanakan menjadi:

$$\mathbf{g} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} \quad \dots(2.26)$$

Dimana g merupakan data anomali gravitasi yang telah diketahui sebagai data masukan, D adalah matriks koordinat titik pengukuran (x dan y), sedangkan C merupakan konstanta polinomial yang akan dicari. Pada prinsipnya hubungan antara data masukan dan parameter model masih dapat dikatakan bersifat linear berapapun jumlah variabel bebas dan orde polinomialnya.

Titik pengukuran gravitasi pada umumnya cukup banyak atau jika dikaitkan dengan matriks polinomial tersebut, jumlah data g jauh lebih banyak daripada jumlah parameter model C yang terdiri dari $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ atau disebut juga *unknown parameter*. Kondisi tersebut dikenal sebagai “*overdetermined*”, Untuk menyelesaikan persamaan polinomial pada kondisi *over determined* yakni dengan menggunakan metode *least square*. Persamaan polinomial dalam bentuk matriks seperti pada persamaan 2.26 yakni

$$\mathbf{g} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C}$$

Jika tidak terdapat error pada data (data ideal) maka matriks C dapat diketahui dengan persamaan:

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}^{-1} \cdot \mathbf{g} \quad \dots(2.27)$$

Namun begitu, terdapatnya error E pada data pasti terjadi maka faktor error dapat dimasukkan ke dalam persamaan menjadi:

$$\mathbf{g} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{C} + \mathbf{e} \quad \dots(2.28)$$

Dalam metode *least square* atau kuadrat terkecil yakni dengan meminimalkan error, secara matematis dapat diekspresikan pada persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} Q &= \mathbf{e}^T \mathbf{e} = [\mathbf{g} - \mathbf{D} \mathbf{C}]^T [\mathbf{g} - \mathbf{D} \mathbf{C}] \\ Q &= \mathbf{g}^T \mathbf{g} - \mathbf{g}^T \mathbf{D} \mathbf{C} - [\mathbf{D} \mathbf{C}]^T \mathbf{g} + [\mathbf{D} \mathbf{C}]^T \mathbf{D} \mathbf{C} \quad \dots(2.29) \end{aligned}$$

Untuk memperoleh solusi linear, kita dapat menurunkan fungsi Q terhadap parameter model C dalam bentuk notasi matriks dengan $\frac{\partial Q}{\partial C} = \mathbf{0}$ untuk meminimalkan error. Berikut ini uraian penurunannya:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial C} &= -\mathbf{g}^T \mathbf{D} - \mathbf{D}^T \mathbf{g} + \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{C} + [\mathbf{D} \mathbf{C}]^T \mathbf{D} \\ \mathbf{0} &= 2(-\mathbf{D}^T \mathbf{C} + \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{C}) \quad \dots(2.30) \end{aligned}$$

Persamaan diatas merupakan persamaan matriks dengan parameter model C sebagai parameter yang ingin dicari atau disebut juga *unknown parameter*. Untuk itu, konstanta C atau parameter model dapat diketahui dengan menggunakan persamaan:

$$C = [D^T D]^{-1} D^T g \quad \dots(2.31)$$

Setelah konstanta $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ diketahui, dengan demikian kita dapat menentukan anomali regionalnya dengan menggunakan persamaan:

$$G' = D C$$

$$G' = \begin{bmatrix} g'_1 \\ g'_2 \\ g'_3 \\ \vdots \\ g'_i \end{bmatrix}$$

Seperti yang telah diuraikan pada subab sebelumnya bahwa setelah memperoleh harga anomali regional dari proses polinomial Trend Surface Analisis ini maka kita dapat mengetahui harga anomali residualnya dengan mengurangkan anomali regional G' dengan data anomali Bouguernya seperti pada persamaanberikut ini:

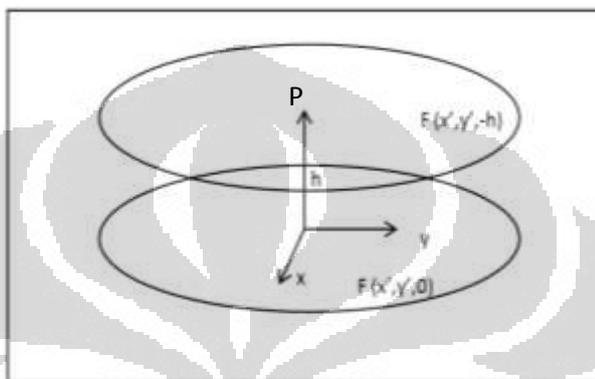
$$R = G - G' \quad \dots(2.32)$$

Dimana R merupakan vektor anomali residual yang mempunyai harga $R_1, R_2, R_3, \dots, R_i$.

b. Metoda Filter Kontinuasi Keatas

Metode *Upward Continuation* pada umumnya digunakan jika pengukuran gravitasi merupakan *land survey*, sedangkan pemakaian metode *Upward Continuation* dalam penelitian ini dikarenakan kebanyakan pengukuran gravitasi di Indonesia dilakukan di darat. Dasar dari metoda ini adalah teorema yang dikembangkan oleh matematikawan G. G. Stokes (1819-1903). Teorema ini menyatakan bahwa nilai gravitasi bumi dapat diketahui dimanapun dipermukaan bumi, begitu juga pada bidang pengukuran *upward continuation* dimana bidang pengukuran dibawa keatas dengan jarak tertentu juga dapat diketahui (Robinson, 1998).

Metode *Upward Continuation* pada prinsipnya membawa bidang pengukuran keatas dengan variasi jarak atau ketinggian h tertentu yang bertujuan untuk mendominankan anomali regional dan meminimalkan pengaruh *noise* dan efek anomali residual. Dengan memperoleh anomali regionalnya dan dengan mengurangkannya dengan anomali Bouguer maka akan diperoleh anomali residualnya.



Gambar 2.3 Ilustrasi proses kontinuitas keatas

Prinsip inilah yang mendasari konsep kontinuitas seperti persamaan (2.33) yang dirumuskan oleh Blakely (1995) berikut ini:

$$F(x', y', -h) = \iint \frac{h/2\pi}{\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2\}^{3/2}} F(x, y, 0) dx dy \quad \dots (2.33)$$

Persamaan (2.33) merupakan persamaan untuk kontinuitas *upward* pada medan gravitasi dimana $F(x', y', -h)$ merupakan total medan di titik $P(x', y', -h)$ yang berada pada bidang kontinuitas dengan ketinggian sebesar h terhadap bidang permukaan (bidang pengukuran sebenarnya) yang besar medannya ($F(x, y, 0)$) dan telah diketahui sebelumnya.

Persamaan (2.33) merupakan integral konvolusi dari $F(x, y)$ dan fungsi filter $\frac{h/2\pi}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}}$ atau dapat kita simbolkan sebagai $W_{up}(x, y)$. Dengan

demikian, konvolusi dalam domain ruang sama dengan perkalian dalam domain frekuensi Fourier. Dalam bentuk frekuensi, persamaan kontinuitas keatas berupa:

$$K(u, v) = G(u, v)Y_{up}(u, v) \quad \dots(2.34)$$

dimana $K(u, v)$, $G(u, v)$, dan $Y_{up}(u, v)$ merupakan transformasi Fourier dari $H(x, y)$, $F(x, y)$, dan fungsi filter $W_{up}(x, y)$.

$$Y_{up}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h/2\pi}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}} e^{-i(ux+vy)} dx dy \quad \dots(2.35)$$

$$= e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}}$$

Dengan demikian, persamaan kontinuitas *upward* dalam domain frekuensi untuk kasus 2D berbentuk $K(u, v) = G(u, v)e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}}$ dan disederhanakan menjadi :

$$K(u, v) = G(u, v)e^{-h|u|} \quad \dots(2.36)$$

Setelah proses kontinuitas keatas dilakukan dengan ketinggian h tertentu, maka diperoleh anomali gravitasi dimana anomali regionalnya di dominankan. Untuk itu untuk memperoleh nilai anomali residual perlu dilakukan pengurangan antara anomali bouguer dengan anomali regional hasil proses kontinuitas keatas.

$$\text{Residual} = \text{Bouguer Anomaly} - \text{Hasil Kontinuitas}$$

c. Metoda Filter Frekuensi

Proses filter dapat dilakukan dengan mentransformasi data spasial ke data frekuensi dengan menggunakan Transformasi Fourier, membuang komponen-komponen frekuensi tertentu dan melakukan transformasi invers kembali kedalam data spasial (Telford et al., 1976) untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk kontur-kontur anomali.

Pada prinsipnya metode filter frekuensi atau panjang gelombang merupakan filter yang digunakan dalam proses pemisahan anomali regional-residual berdasarkan kelompok frekuensi atau panjang gelombang tertentu. Jenis-jenis filter frekuensi / panjang gelombang diantaranya adalah sebagai berikut:

- ☺ *Lowpass filter* merupakan filter frekuensi yang membuang frekuensi atau bilangan gelombang tinggi dan menampilkan anomali dengan frekuensi atau bilangan gelombang rendah yang berasosiasi dengan anomali regional.

Dalam kasus 1D: $H(u) = 0$, jika $u > u_1$

$H(u) = 1$, jika $u < u_1$

Dalam kasus 2D: $H(u,v) = 0$, jika $(u+v)^{1/2} > w_1$

$H(u,v) = 1$, jika $(u+v)^{1/2} < w_1$

- Highpass filter merupakan filter frekuensi yang membuang frekuensi atau bilangan gelombang rendah dan menampilkan anomali dengan frekuensi atau bilangan gelombang tinggi yang berasosiasi dengan anomali residual.

Dalam kasus 1D: $H(u) = 0$, jika $u < u_1$

$H(u) = 1$, jika $u > u_1$

Dalam kasus 2D: $H(u,v) = 0$, jika $(u+v)^{1/2} < w_1$

$H(u,v) = 1$, jika $(u+v)^{1/2} > w_1$

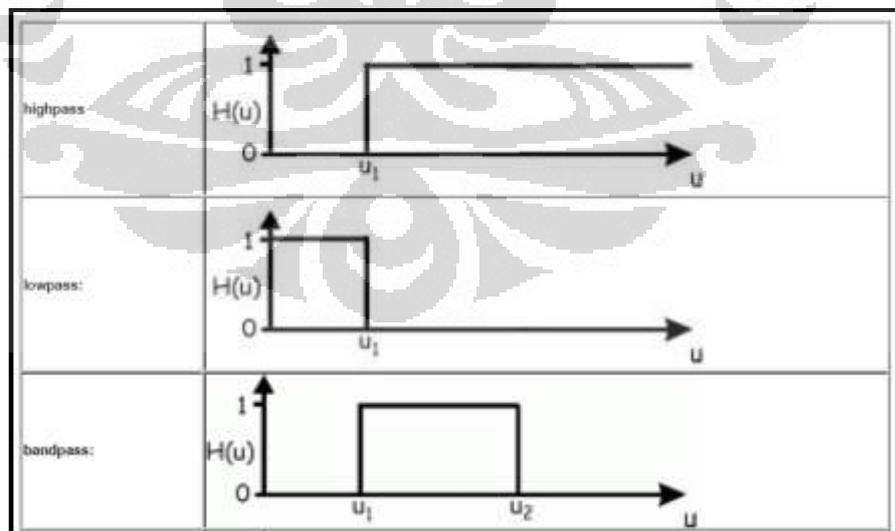
- Bandpass filter merupakan filter frekuensi yang digunakan untuk membuang frekuensi-frekuensi atau bilangan gelombang pada range tertentu sesuai dengan kebutuhan saat pengolahan data.

Dalam kasus 1D: $H(u) = 0$, jika $u < u_1$ atau $u > u_2$

$H(u) = 1$, jika $u_2 < u < u_1$

Dalam kasus 2D: $H(u,v) = 0$, jika $(u+v)^{1/2} < w_1$ atau $(u+v)^{1/2} > w_2$

$H(u,v) = 1$, jika $w_2 < (u+v)^{1/2} < w_1$



Gambar 2.4 Frekuensi filter diantaranya lowpass, high pass dan bandpass filter (Geosoft Incorporated, 2002)

BAB III

MODEL SINTETIK

3.1 Rapat Massa Batuan

Rapat-massa atau *density* suatu batuan merupakan parameter yang sangat penting untuk diketahui, hal ini dikarenakan penyebab utama bervariasinya anomali gravitasi di permukaan bumi yakni adanya inhomogenitas kerapatan dilapisan bumi yang lebih atas atau dikerak bumi. Harga rapat-massa batuan dapat juga dikatakan berbanding lurus dengan anomali gayaberat, artinya semakin besar rapat massa atau densitas suatu batuan di bawah permukaan maka nilai gravitasi yang terukur juga semakin besar.

Rapat massa batuan secara umum dapat didefinisikan sebagai perbandingan massa m dari benda yang dalam hal ini batuan terhadap volume benda tersebut. Jika dirumuskan, densitas dapat dihitung dengan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots(3.1)$$

Besar harga rapat massa batuan atau mineral bervariasi dari 880 kg/m^3 untuk es (dan hampir 0 kg/m^3 untuk udara) sampai lebih dari 8000 kg/m^3 untuk beberapa mineral berat, sedangkan batuan pada umumnya memiliki densitas antara 1600 kg/m^3 (sedimen) dan 3500 kg/m^3 (gabbro) (UBC., 2005). Bervariasinya nilai densitas batuan bawah permukaan dapat disebabkan berbagai faktor. Faktor-faktor utama yang mempengaruhi besar densitas diantaranya:

- a. Komposisi mineralogi batuan
- b. Struktur dan tekstur batuan
- c. Tingkat diagenesis dan metamorfosa batuan
- d. Usia dan posisi geologis terbentuknya batuan

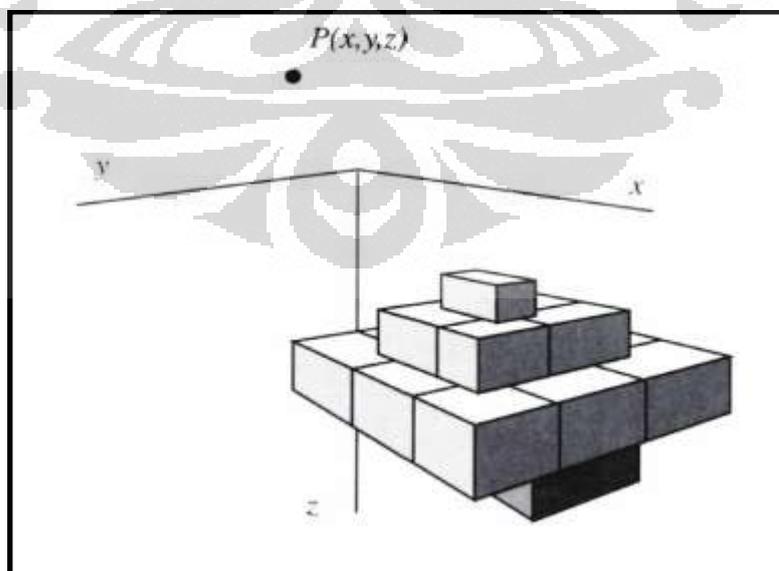
Tabel daftar densitas merupakan salah satu acuan yang dapat dijadikan pertimbangan dalam pembuatan model sebagai penyebab anomali gayaberat suatu daerah. Tabel rapat massa untuk beberapa material telah banyak terdapat di berbagai buku, contohnya tabel densitas yang jabarkan oleh Telford (1976) dapat dilihat di halaman lampiran.

3.2 Pemodelan Kedepan (*Forward Modelling*)

Pemodelan dalam geofisika merupakan proses estimasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati dipermukaan bumi. Model dan parameter model ini digunakan untuk mengkarakterisasi suatu kondisi geologi bawah permukaan suatu wilayah pengukuran (Grandis, 2009). Pemodelan hendaknya bukan hanya digunakan untuk mengkarakterisasi kondisi geologi bawah permukaan melainkan juga mencakup hubungan teoritik dan matematik antara parameter model dengan respon model tersebut.

Salah satu metode dalam proses pemodelan yakni pemodelan kedepan atau *forward modelling*. Pemodelan kedepan dibuat berdasarkan pengetahuan geologi dan geofisika, dimana anomali dihitung dan di bandingkan dengan anomali observasi (Blakely, 1995). Agar diperoleh kesesuaian antara data dari model sintetik atau data teoritis dengan data observasi maka pemodelan dapat dilakukan dengan proses *trial and error* atau proses coba-coba yang salah satunya dengan cara mengubah-ubah harga parameter model tersebut.

Model sintetik yang di buat merupakan model prisma *rectangular* dengan geometri dan nilai rapat massa yang dapat ditentukan sembarang sesuai dengan kebutuhan. Dari model-model yang dibuat, kemudian dihitung respon gravitasinya pada bidang pengukuran yang telah ditentukan besar luasannya.



Gambar 3.1 Model tiga dimensi dengan pendekatan prisma rectangular (Blakely, 1995).

Pada umumnya model prisma rectangular merupakan salah satu cara pendekatan yang sederhana dari sebuah volume massa. Jika masing-masing sel atau prisma cukup kecil, maka dapat diasumsikan sel-sel tersebut mempunyai densitas yang konstan. Kemudian dengan menggunakan prinsip superposisi, maka anomali gravitasi bodi tersebut dapat didekati dengan menjumlahkan pengaruh semua prisma. Medan gravitasi yang diperoleh tersebut secara matematis dapat diuraikan seperti berikut ini (Blakely, 1995):

Potensial gravitasi U di titik P

$$U(P) = \gamma \int_R \frac{\rho}{r} dv \quad \dots(3.2)$$

Percepatan gravitasi g

$$\begin{aligned} g(P) &= \nabla U \\ &= -\gamma \int_R \rho \frac{\hat{r}}{r^2} dv \end{aligned} \quad \dots(3.3)$$

dimana r merupakan jarak antara titik P dengan elemen bodi dv, γ merupakan konstanta Gravitasi dan ρ merupakan densitas bodi yang telah ditentukan nilainya. Dengan demikian, percepatan gravitasi vertikal g untuk *single prism* dapat dicari dengan menurunkan potensial gravitasi terhadap bidang vertikal z, maka:

$$\begin{aligned} g(x, y, z) &= \frac{\partial U}{\partial z} \\ g(x, y, z) &= -\gamma \int_{z'} \int_{y'} \int_{x'} \rho(x', y', z') \frac{(z-z')}{r^3} dx' dy' dz' \end{aligned} \quad \dots(3.4)$$

dimana

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

Atau secara umum dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$g(x, y, z) = \int_{z'} \int_{y'} \int_{x'} \rho(x', y', z') \varphi(x-x', y-y', z-z') dx' dy' \quad \dots(3.5)$$

dimana,
$$\varphi(x, y, z) = -\gamma \frac{z}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2}}$$

Persamaan diatas dapat digunakan untuk menghitung percepatan gravitasi sebuah prisma rectangular atau sel berbentuk persegi seperti Gambar 3.1,

persamaan tersebut berdasarkan perhitungan Blakely (1995) dapat diuraikan sebagai berikut:

$$g = \gamma \rho \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z'}{(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{3/2}} dx' dy' dz' \quad \dots(3.6)$$

dimana $g(x,y,z)$ merupakan medan gravitasi di permukaan bumi, dan γ merupakan konstanta Gravitasi bumi sebesar $6,67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$. Pada persamaan tersebut diatas menunjukkan bahwa percepatan gravitasi g di permukaan bumi bervariasi berdasarkan distribusi massa di bawah permukaan yang ditunjukkan oleh fungsi densitas ρ .

3.3 Grav3D

Proses pembuatan model sintetik dengan metode *forward modelling* dilakukan dengan bantuan software GRAV3D dari *UBC-Geophysical Inversion Facility, University of British Columbia*. Program Grav3d UBC merupakan program yang dapat digunakan dalam pemodelan kedepan (*forward modelling*) dan inversi dalam tiga dimensi.

Untuk langsung membuat model sintetik, terlebih dahulu kita sebaiknya memahami file apa saja yang diperlukan sebagai input dan file yang dihasilkan atau output dari program tersebut. Input dari program Grav3d untuk membuat model sintetik diantaranya:

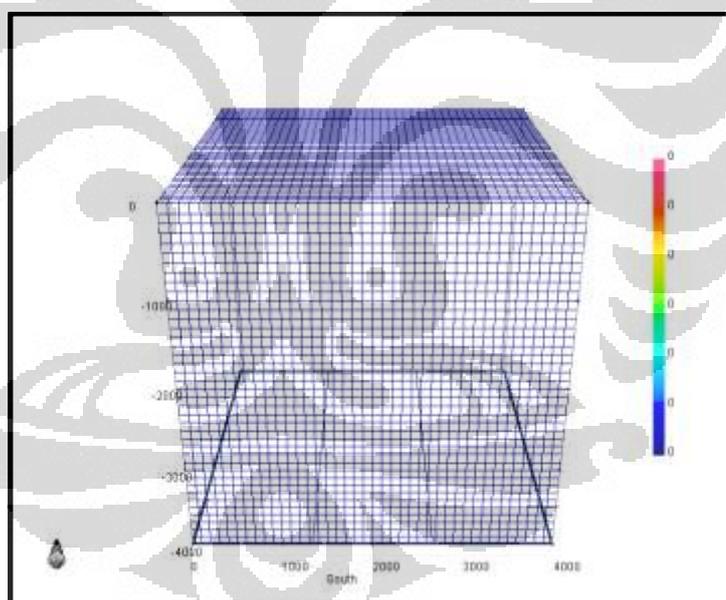
- a. mesh: file yang berisi informasi besaran luas dari bidang 3D yang akan digunakan dalam pemodelan dan jumlah sel yang digunakan untuk arah x, y dan z.
- b. model.den: file yang berisi informasi nilai densitas ρ untuk masing-masing bodi yang dibuat.
- c. obs.loc: file yang berisi informasi lokasi titik observasi dan lokasi benda anomali.

Sedangkan output yang dihasilkan dari program Grav3D *forward modelling* yakni file *gzfor3d.grv* merupakan file yang berisi data anomali gravitasi yang telah dihitung dalam satuan mgal.

Model sintetik yang digunakan dalam penelitian ini adalah model dengan beberapa bodi yang dianggap benda-benda penyebab anomali regional pada kedalaman 0 sampai dengan -2000 m, sedangkan untuk penyebab anomali regional di buat 1 bodi pada kedalaman -2000 m sampai dengan -4000 m.

Model yang dibuat berada pada suatu volume mesh dengan besar wilayah sekitar 4000 m x 4000 m x 4000 m, dimana 4000 m ke arah x, 4000 m ke arah y, dan 4000 m ke arah z (vertikal). Setiap sel berukuran 100 m dan ukuran sel ini dapat divariasikan sesuai dengan keinginan pembuat model. Selain itu penulis mencoba juga membuat model intrusi sebagai salah satu contoh model dengan pendekatan real sederhana dalam pengaplikasian metode-metode filter yang akan digunakan selanjutnya.

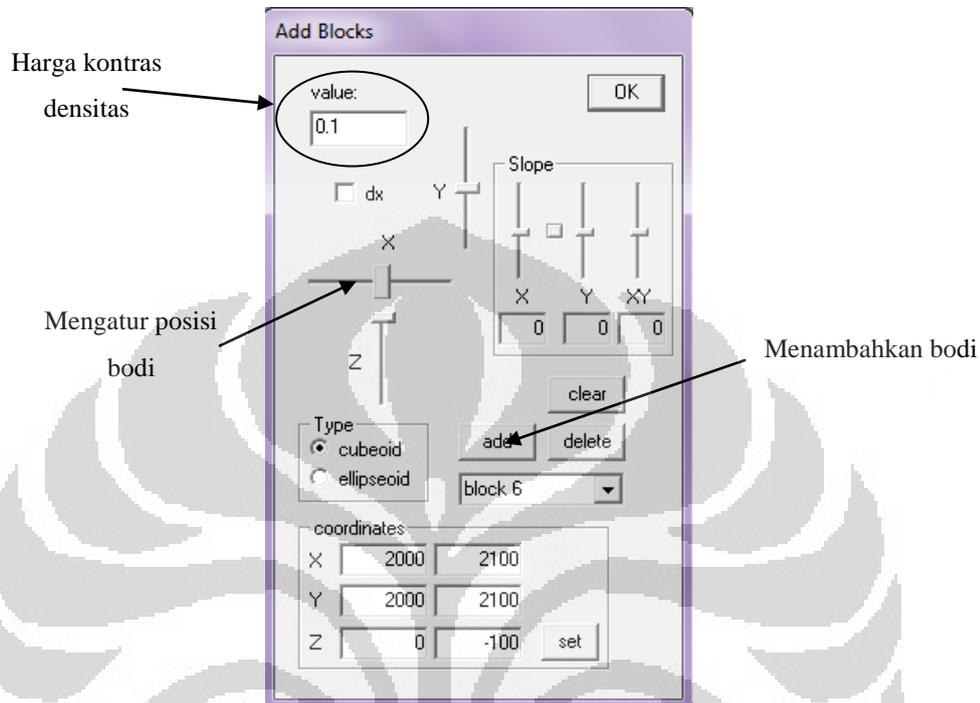
Pada Gambar 3.2 terlihat mesh yang yang digunakan dalam pembuatan model sintetik, dimana volume keseluruhan sebesar 4000 m x 4000 m x 4000 m.



Gambar 3.2 Volume mesh yang digunakan dalam pemodelan sintetik

Model sintetik dibuat dengan membuat bodi-bodi dari kumpulan beberapa sel yang kemudian diberikan harga densitas yang digunakan. Besar densitas yang digunakan dalam satuan gr/cm^3 . Pemodelan kali ini membuat model tidak dengan memberikan nilai densitas ρ melainkan memberi nilai perubahan atau kontras densitasnya $\Delta\rho$ dengan alasan efektifitas dalam pembuatan model. Namun begitu

hal ini tidak menjadi permasalahan dikarenakan *pattern* atau bentuk kontur yang dihasilkan akan sama, sedangkan nilai gravitasinya tetap analog dengan nilai gravitasi jika densitas yang diberikan sebesar ρ .



Gambar 3.3 Kolom untuk menambahkan blok dan memberi nilai densitasnya

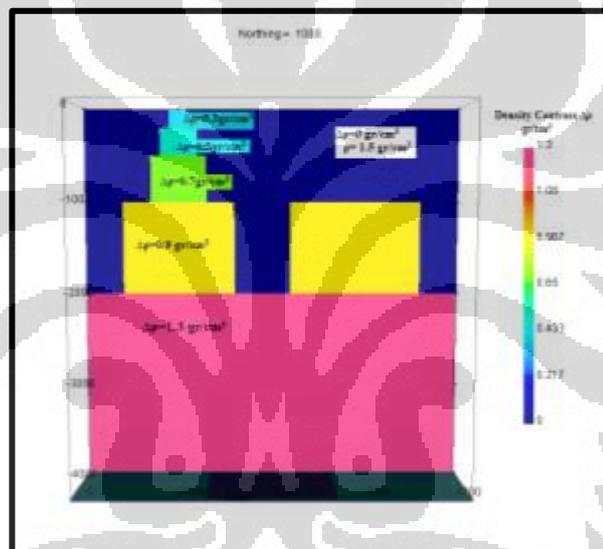
3.4 Model Sintetik dan Anomali Bouguer Sintetik

Setelah proses pembuatan model, yakni memberikan beberapa bodi dalam volume mesh tertentu dan memberikan kontras densitas $\Delta\rho$ sesuai yang diinginkan serta mengatur posisi dan kedalaman bodi, maka kita dapat segera melakukan proses *forward modelling*. Seperti yang dibahas pada subbab sebelumnya bahwa *forward modelling* dalam gravitasi dilakukan untuk mengetahui respon gravitasi secara teoritis sebagai output setelah menentukan parameter model tertentu yang telah diketahui misalnya densitas ρ , posisi (x,y) dan kedalaman z yang berhubungan juga dengan volume massa tersebut.

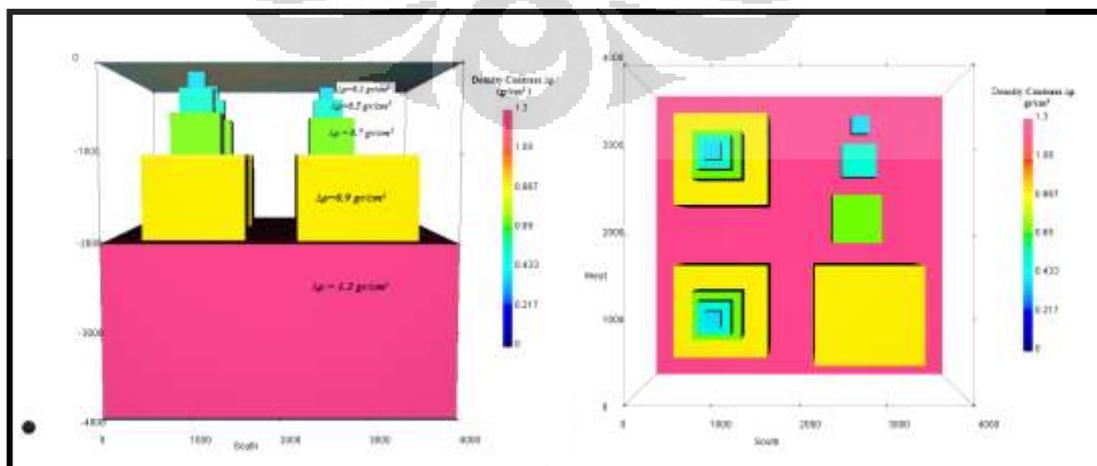
📌 Model Syn

Model pertama yang dibuat merupakan model ideal dengan beberapa bodi yang dianggap benda-benda residual pada kedalaman 0 m sampai dengan 2000 m dan satu

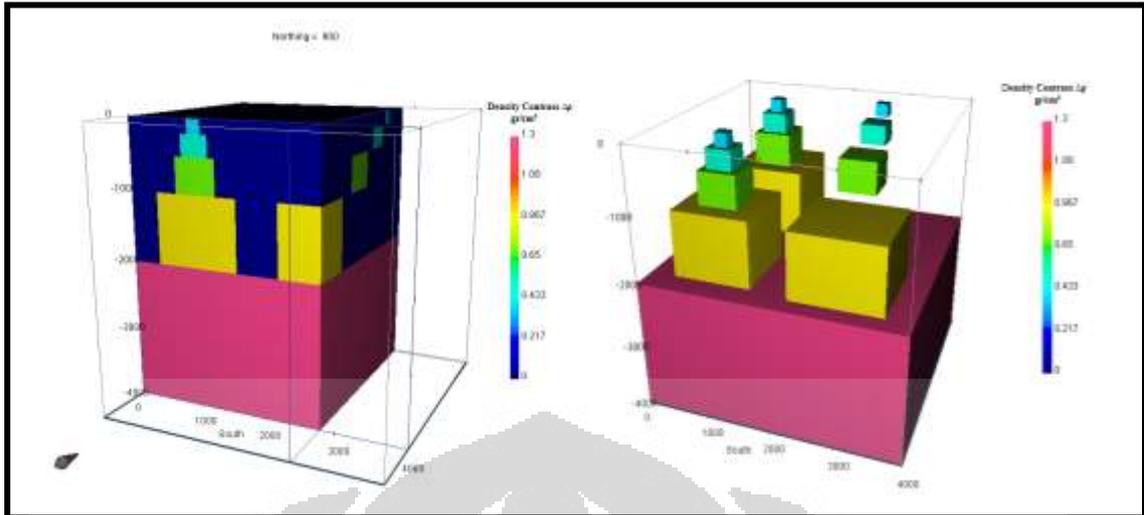
buah bumi yang dianggap benda regional pada kedalaman 2000 m sampai dengan 4000 m. Benda-benda residual tersebut terdiri dari 12 bodi dengan kontras densitas berbeda yang dihitung terhadap lapisan sediment (biru) yang mempunyai densitas $1,5 \text{ gr/cm}^3$. Tiga bodi pertama berada pada kedalaman 0 - 200 m sebanyak 3 bodi dengan kontras densitas $\Delta\rho=0,3 \text{ gr/cm}^3$ terhadap lapisan sediment (biru) atau $\rho= 1,8 \text{ gr/cm}^3$ pada posisi yang berbeda-beda, 3 bodi kedua pada kedalaman 300 m - 500 m dengan kontras densitas $\Delta\rho=0,5 \text{ gr/cm}^3$ pada posisi yang berbeda beda, 3 bodi selanjutnya dengan kontras densitas $\Delta\rho=0,7 \text{ gr/cm}^3$ pada kedalaman 500 m – 1000 m, dan 3 bodi berada pada kedalaman 1000 - 2000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho = 0,9 \text{ gr/cm}^3$ pada posisi yang berbeda-beda. Sedangkan benda penyebab anomali regional berada pada kedalaman 2000 m - 4000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho = 1,3 \text{ gr/cm}^3$.



Gambar 3.4 Model Syn 1 sebagai model sintetik untuk memperoleh data anomali Bouguer yang digunakan dalam proses pemisahan anomali selanjutnya.

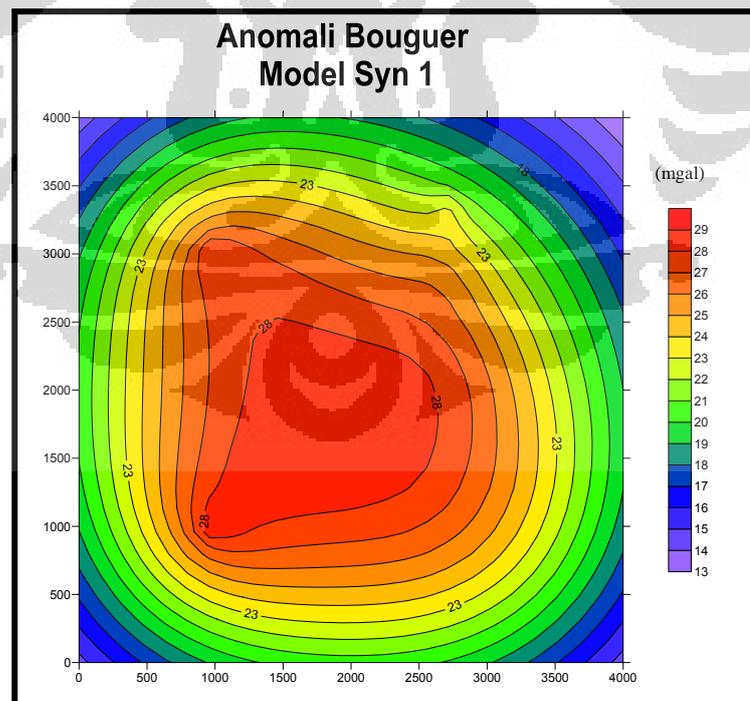


Gambar 3.5 Model Syn 1 tampak atas



Gambar 3.6 Model Syn 1 dilihat dari beberapa sisi

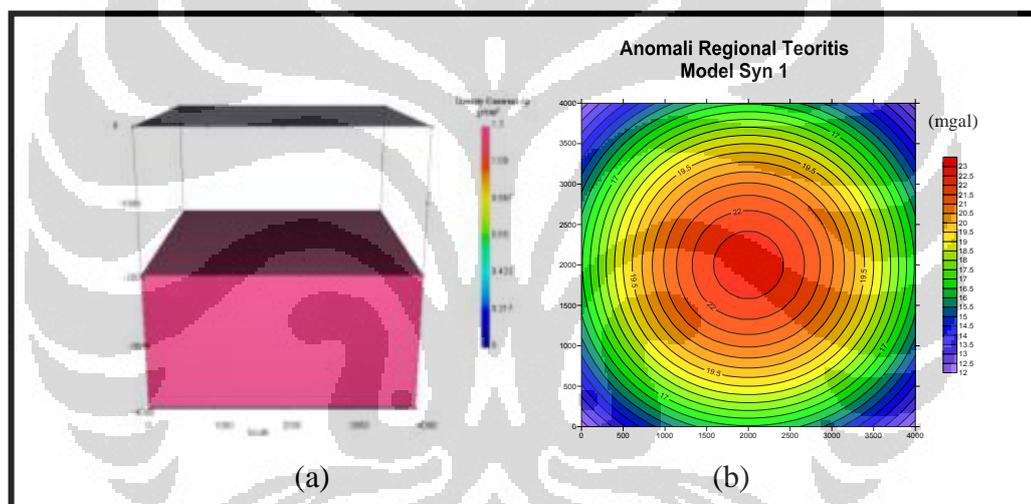
Dari model tersebut terdapat beberapa bodi dengan kontras densitas yang berbeda seperti dilihat pada gambar 3.4. Telah dikatakan sebelumnya bahwa peneliti mengasusikan bahwa benda-benda penyebab anomali residual berada pada kedalaman 0m–2000 m, sedangkan benda penyebab anomali regional berada pada kedalaman 2000 m–4000 m. Sedangkan respon gravitasi yang dihasilkan dengan metode *forward modelling* dari model diatas dapat dilihat pada pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Respon Anomali Bouguer Sintetik dari model Syn 1

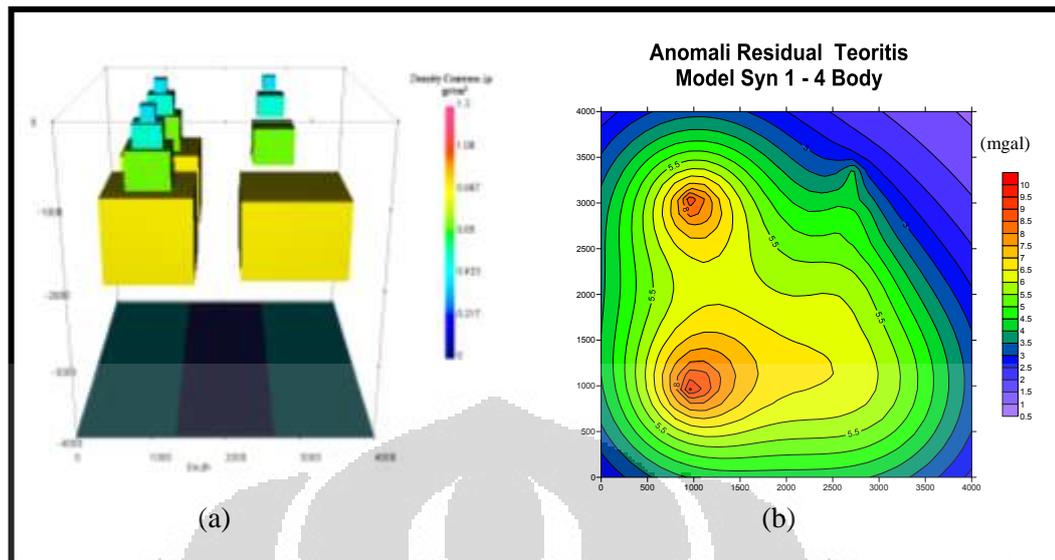
Anomali Bouguer diatas mempunyai luas daerah diatas sebesar 4000m x 4000m dengan spasi grid 160 m, maka jumlah data diperoleh yakni sebanyak 676 data. Jika respon anomali Bouguer diatas merupakan respon anomali gravitasi yang di akibatkan benda-benda sumber anomali dangkal dan dalam, maka perlu diketahui juga respon anomali yang hanya disebabkan oleh benda-benda sumber anomali dangkal saja dan yang disebabkan oleh benda-benda sumber anomali dalam saja. Hal ini dapat membantu kita untuk mengestimasi anomali regional dan residual setelah proses filtering dilakukan.

Benda anomali yang diasumsikan sebagai penyebab anomali regional berada pada kedalaman 2000m-4000m dan respon gravitasi yang dihasilkan benda anomali tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini:



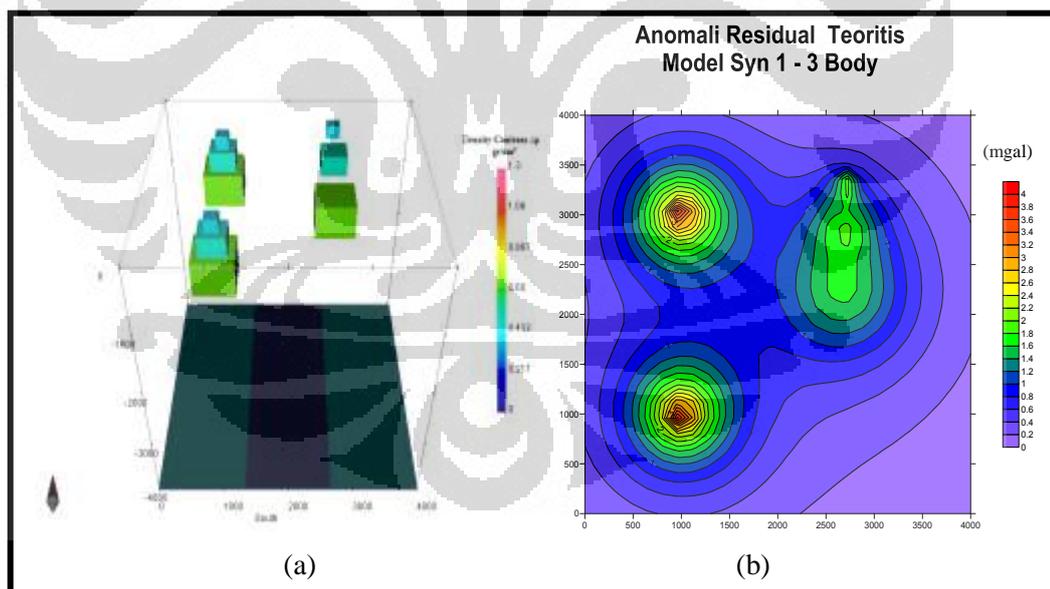
Gambar 3.8 Model benda sumber anomali dalam (regional) dan kontur anomali regional teoritis

Selain kita dapat mengetahui anomali regional teoritis, kita juga dapat mengetahui anomali residual teoritis yang disebabkan oleh benda-benda anomali dangkal. Oleh karena benda anomali dangkal terdiri dari beberapa bodi dengan densitas dan kedalaman berbeda, maka penulis mencoba mencari nilai respon anomali residual yang disebabkan oleh benda anomali untuk bodi-bodi pada kedalaman tertentu. Model dan respon anomali gravitasi untuk keempat jenis densitas dan kedalaman dengan total bodi 12 benda anomali pada kedalaman 0 – 2000 m.



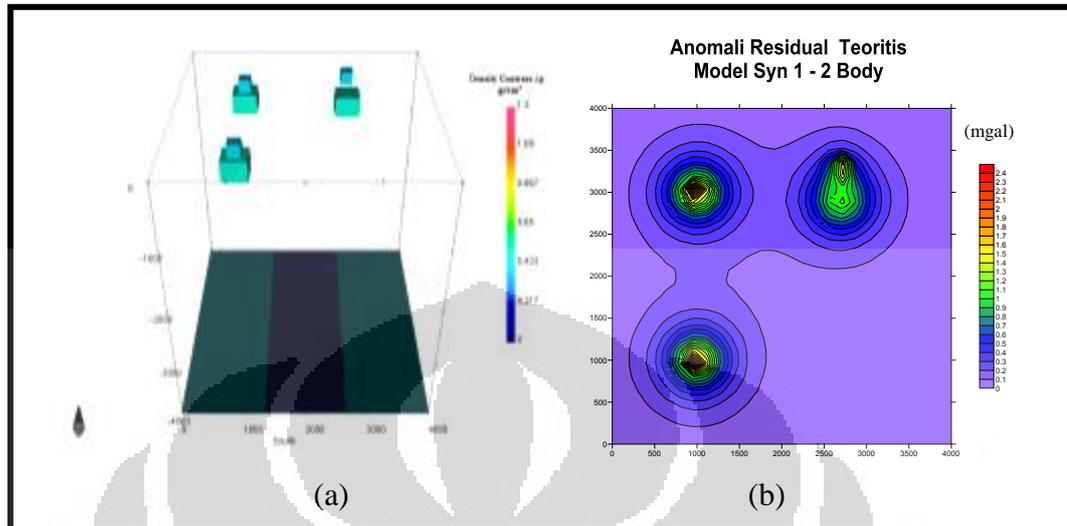
Gambar 3.9 (a) Model Syn 1 dengan 4 jenis benda penyebab anomali residual (b) Respon gravitasi benda sumber anomali dangkal (anomali regional teoritis – 4 bodi)

Model dan respon anomali gravitasi untuk ke 3 jenis densitas dan kedalaman dengan total bodi 9 benda anomali pada kedalaman 0 - 1000 m.



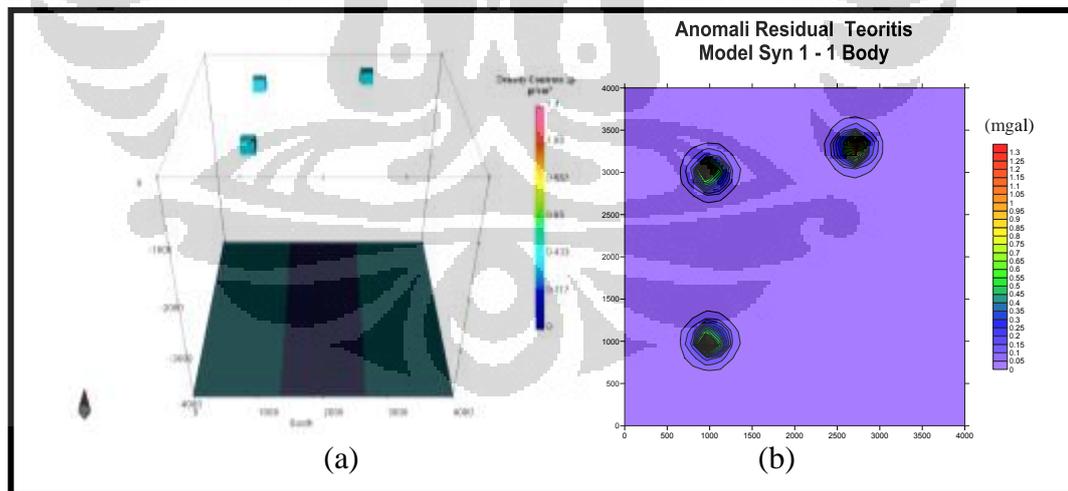
Gambar 3.10 (a) Model Syn 1 dengan 3 jenis benda penyebab anomali residual. (b) Anomali regional teoritis – 3 bodi

Model dan respon anomali gravitasi untuk ke 2 jenis densitas dan kedalaman dengan total bodi 6 benda anomali pada kedalaman 0 - 500m.



Gambar 3.11(a) Model Syn 1 dengan 2 jenis benda penyebab anomali residual dan (b) Respon gravitasi- anomali regional teoritis - 2 bodi

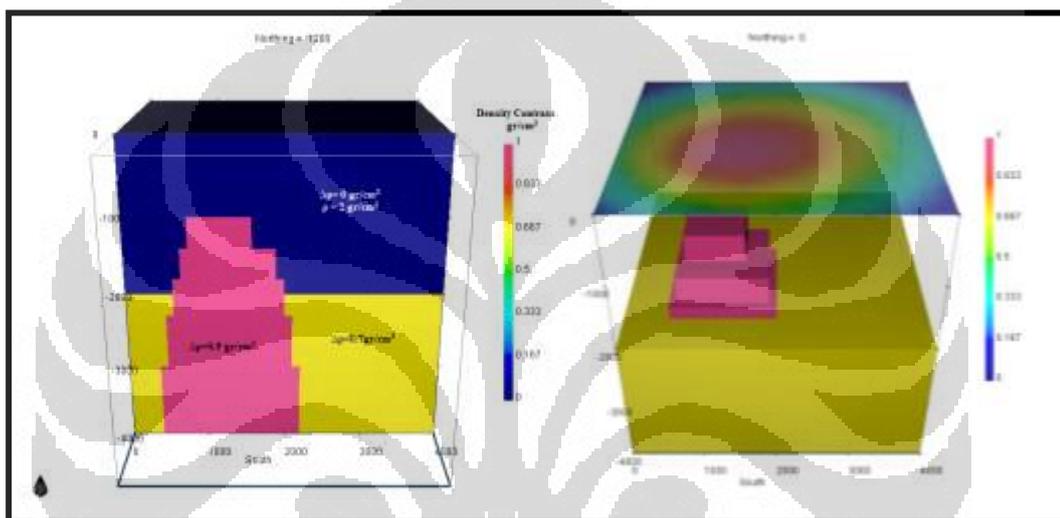
Model dan respon anomali gravitasi untuk ke 1 jenis densitas dan kedalaman dengan total bodi 3 benda anomali pada kedalaman 0-200 m.



Gambar 3.12 (a) Model Syn dengan 1 jenis benda penyebab anomali residual. (b) Anomali regional teoritis – 1 bodi

📍 Model Intrusi

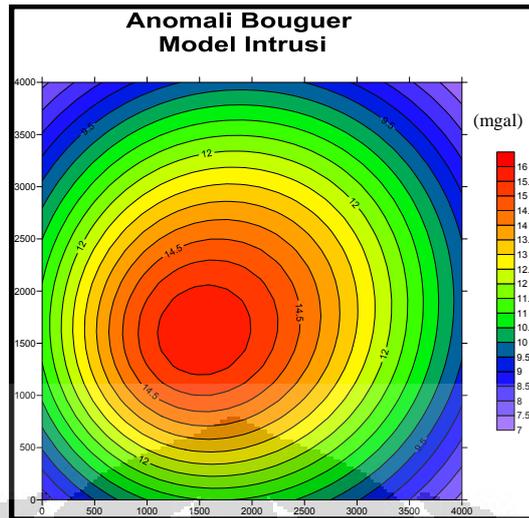
Model Syn merupakan model ideal yang dapat digunakan untuk menguji metode-metode pemisahan anomali. Penulis juga mencoba membuat model dengan pendekatan kondisi real atau kondisi geologi, dengan harapan pengujian metode filtering tidak hanya digunakan untuk model ideal saja melainkan dengan pendekatan kondisi real. Model dengan pendekatan kondisi real ini merupakan model pendekatan intrusi, namun pembuatan model tetap sederhana seperti pada Gambar 3.18.



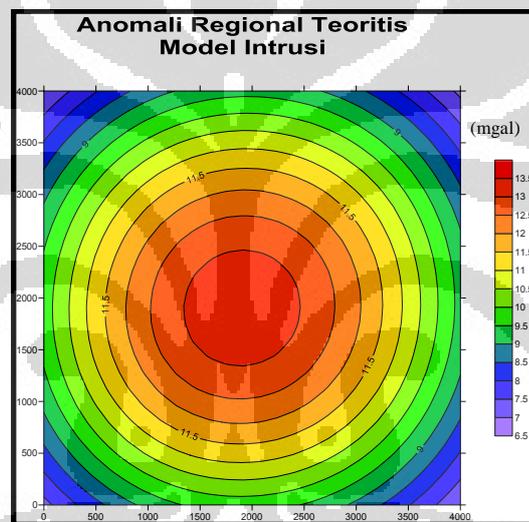
Gambar 3.13 Model Intrusi sebagai model pendekatan kondisi real untuk pengujian metode pemisahan anomali regional – residual

Model pendekatan real yang dibuat merupakan model intrusi sederhana dimana terdapat lapisan sedimen berwarna biru pada kedalaman 0 m - 2000 m dengan densitas $\rho = 2 \text{ gr/cm}^3$ atau $\Delta\rho = 0 \text{ gr/cm}^3$ dan basement berwarna kuning pada kedalaman 2000 m - 4000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho = 0,7 \text{ gr/cm}^3$. Lapisan basement ini di intrusi oleh batuan beku yang mempunyai kontras densitas $\Delta\rho = 1 \text{ gr/cm}^3$ berwarna merah muda dari kedalaman 4000 m ke atas yakni sampai kedalaman 1000 m.

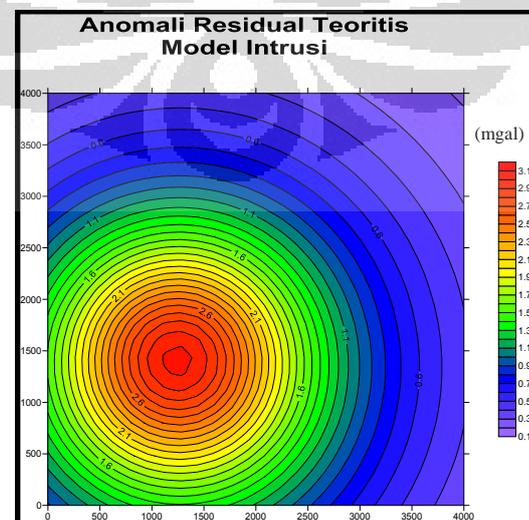
Berikut ini kontur anomali Bouguer model intrusi dengan spasi grid sebesar 160 m. Selain itu juga akan ditampilkan kontur anomali regional teoritis dan residual teoritis model Intrusi.



Gambar 3.14 Kontur anomali Bouguer sintetik untuk model intrusi



Gambar 3.15 Kontur anomali regional teoritis untuk model intrusi

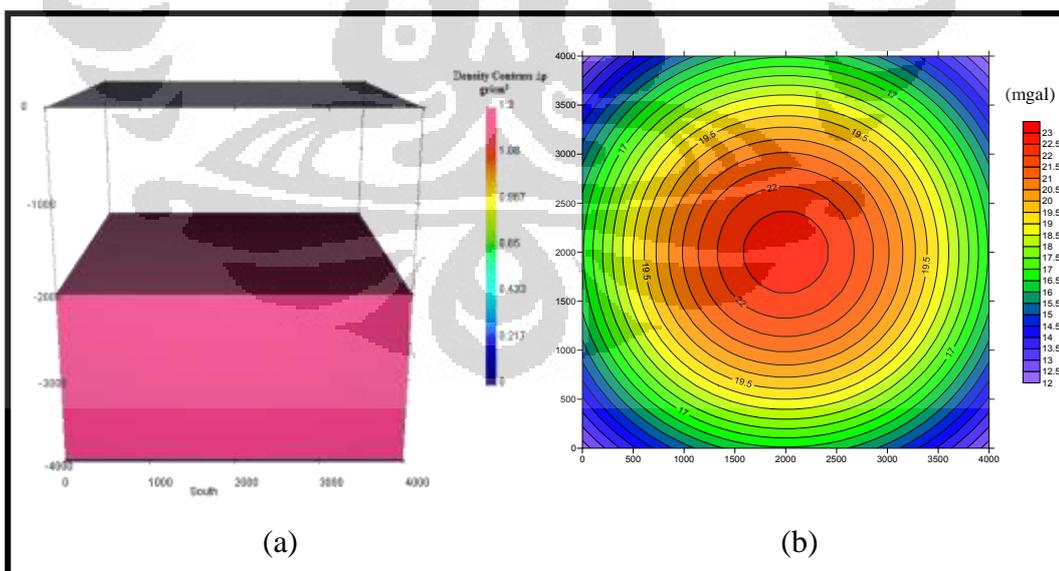


Gambar 3.16 Kontur anomali residual teoritis untuk model intrusi

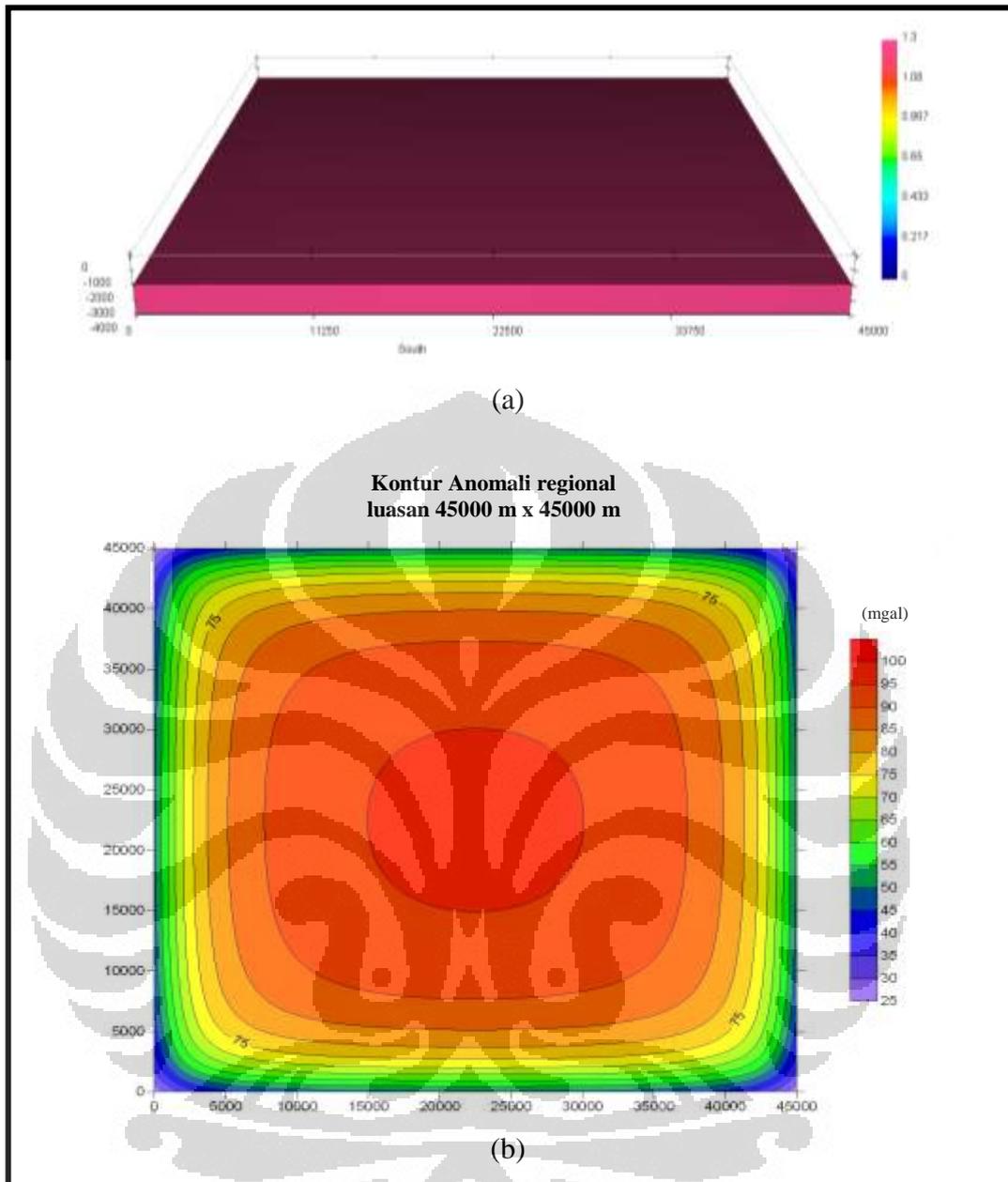
3.5 Keterbatasan Program Grav3d

Anomali regional pada kenyataannya diharapkan mempunyai kontur yang flat dikarenakan sifatnya yang homogen dan luas, namun dari kedua model yang dibuat yaitu model Syn dan model Intrusi, dapat dilihat bahwa kontur anomali regional dengan luas 4000 m x 4000 m yang diperoleh berupa *closure* dengan bulatan yang terpusat ditengah kontur. Hal ini dapat disebabkan karena adanya keterbatasan Program Grav3d yang menganggap daerah diluar model 3D mempunyai densitas 0 gr/cc, sehingga ketika dilakukan *forward modelling* untuk mendapatkan respon anomali gravitasinya akan tetap berupa bulatan karena nilai anomali gravitasi tersebut dihitung relatif terhadap luar wilayah pengukuran.

Hal inilah kemudian menyebabkan berapapun besar atau luas model regional yang dibuat, bahkan dengan luas mencapai 10 kali lipat model yang digunakan yakni 45000 m x 45000 m, maka kontur bulatan yang terpusat ditengah kontur akan tetap terbentuk, sehingga sulit untuk memperoleh regional yang flat seperti kondisi real yang sebenarnya. Pada Gambar 3.17 dan 3.18 akan ditampilkan kontur anomali regional untuk luasan 4000 m x 4000 m dan luas 40000 m x 40000 m yang kontur keduanya berupa bulatan atau *closure*.



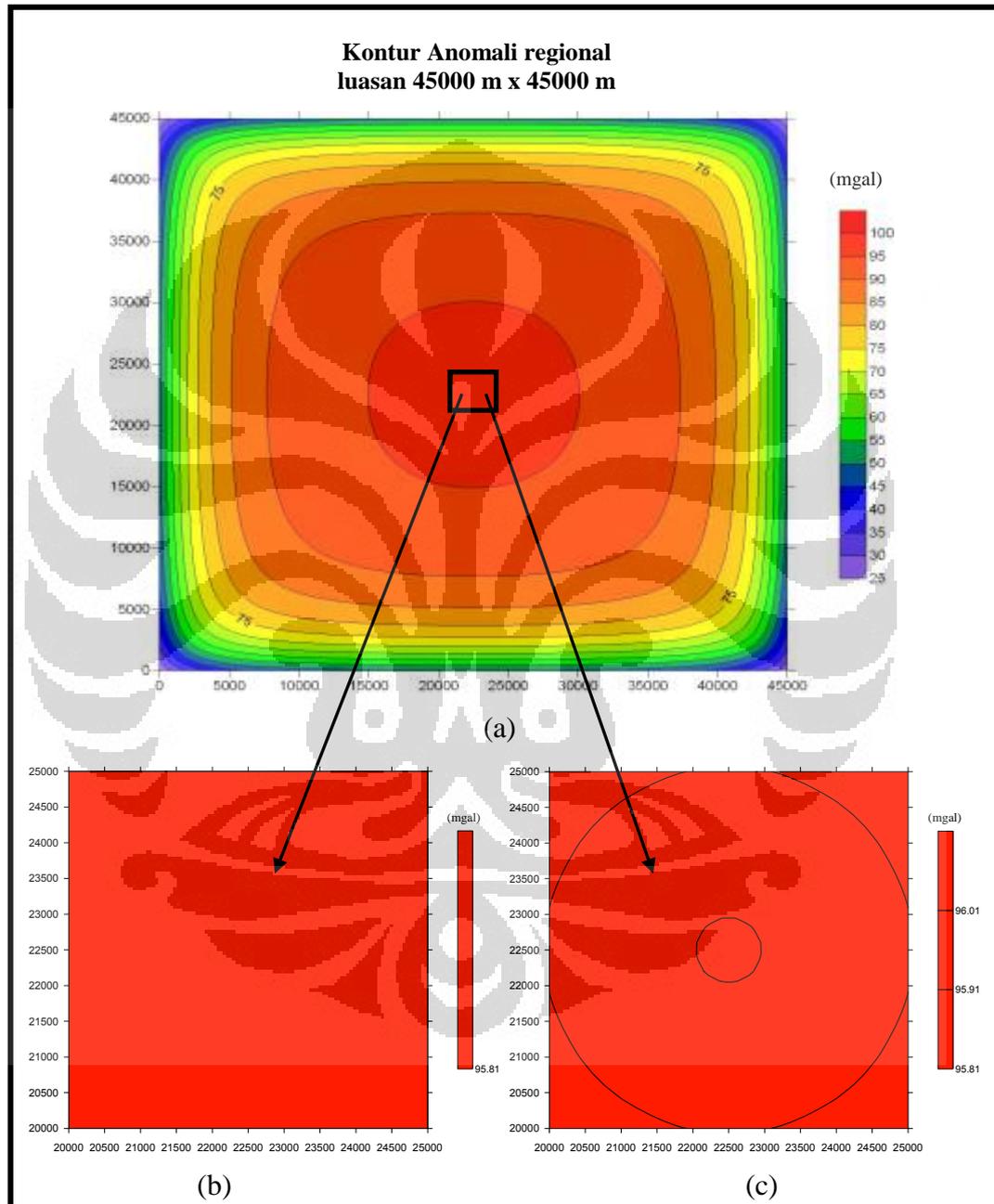
Gambar 3.17 (a) Model regional dengan luas 4000 m x 4000 m (b) Kontur anomali regional yang dihasilkan berupa closure



Gambar 3.18 (a) Model regional dengan luas 45000 m x 45000 m (b) Kontur anomali regional yang dihasilkan berupa *closure*

Dari Gambar 3.18 dapat dilihat untuk luasan 45000 m x 45000 m, respon anomali gravitasi yang diperoleh berupa suatu *closure*. Jika kita mengambil luasan 5000 m x 5000 m dari luasan 45000 m x 45000 m pada Gambar 3.18 ditengah kontur seperti pada Gambar 3.19 (a), dapat dilihat bahwa pada kontur tersebut seperti pada Gambar 3.19 (b) berwarna merah yang masih dalam range nilai anomali yang sama (96 mgal). Jika kita ingin melihat kontur dengan teliti,

maka kita dapat mengurangi interval kontur dari 5 mgal pada Gambar 3.19 (b) menjadi 0,1 mgal seperti pada Gambar 3.19 (c), maka terlihat bahwa kontur tersebut merupakan sebuah *closure* yang terpusat ditengah kontur, namun demikian karena nilai tersebut kecil variasinya dapat dikatakan cukup flat.



Gambar 3.19 (a) Kontur anomali regional dengan luas 45000 m x 45000 akan tetap menghasilkan kontur berupa bulatan atau *closure* dengan interval 5 mgal (b) respon anomali untuk luasan 5000m x 5000 m dengan interval 5 mgal (c) respon anomali untuk luasan 5000 m x 5000 m dengan interval 0.1 mgal

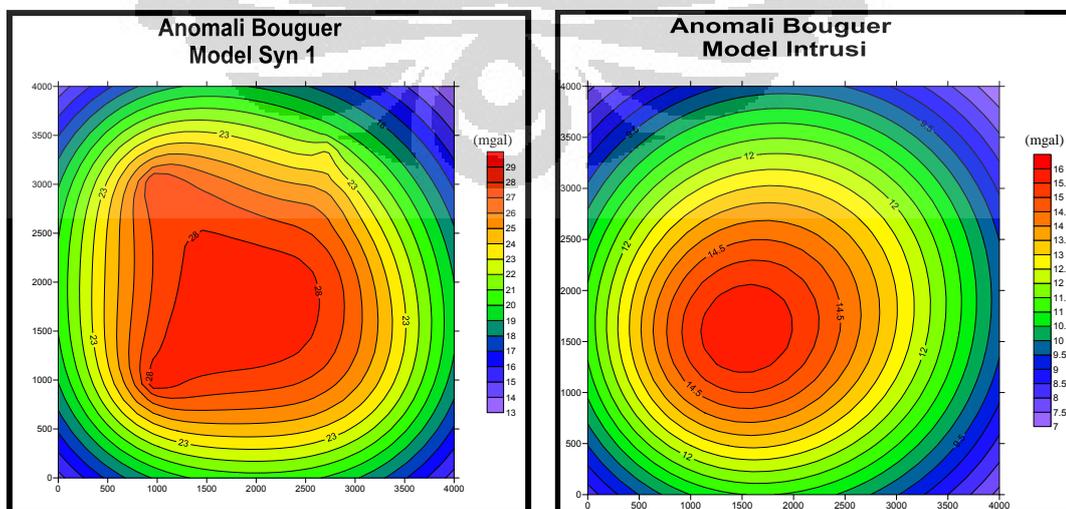
BAB IV

PEMISAHAN ANOMALI REGIONAL DAN RESIDUAL

4.1 Anomali Bouguer Sintetik

Setelah dilakukan proses pembuatan model sintetik dengan menggunakan bantuan program Grav3d-UBC, maka dapat diperoleh respon anomali gravitasi dengan metode *forward modelling*. Data anomali gravitasi yang diperoleh dengan menggunakan program tersebut dapat kita sebut selanjutnya sebagai anomali Bouguer. Data respon anomali yang diperoleh tidak melalui proses koreksi seperti koreksi drift atau apungan alat, koreksi *free air*, koreksi terrain, koreksi bouguer dan semacamnya dikarenakan pengambilan data dilakukan menggunakan software dan bersifat teoritis dan tidak dipengaruhi koreksi-koreksi lapangan tersebut.

Penelitian ini menggunakan data anomali Bouguer sintetik dengan harapan pemodelan sintetik ini menjadi salah satu kontrol kesalahan dalam proses pemisahan anomali regional dan residual yang menjadi topik utama penelitian ini. Anomali Bouguer yang dihasilkan juga merupakan jumlah dari anomali gravitasi regional akibat pengaruh benda-benda sumber anomali dalam dan anomali residual akibat pengaruh benda-benda sumber anomali dangkal. Berikut ini ditampilkan kembali kontur anomali Bouguer hasil *forward modelling* dari model Syn dan model Intrusi:



Gambar 4.1 Anomali Bouguer Sintetik dari model Syn (kiri) dan model Intrusi (kanan)

4.2 Analisis Spektrum

Sebelum dilakukan proses separasi anomali regional dan residual dari data anomali Bouguer yang diperoleh, perlu untuk mengetahui estimasi kedalaman rata-rata bidang diskontinuitas rapat massa yang merepresentasikan anomali regional dan residual. Proses estimasi kedalaman anomali ini dapat dilakukan metode analisis spektrum yang selain dapat diketahui kedalaman sumber anomali juga dapat diketahui lebar jendela yang akan digunakan dalam proses pemisahan anomali regional-residual.

Proses analisis spektrum biasanya dilakukan dalam satu dimensi, dimana anomali Bouguer yang terdistribusi pada penampang *cross section* 1D diekspansi dengan deret Fourier. Selanjutnya proses analisis spektrum dapat dilakukan dengan menganalisis logaritma spektrum amplitudo terhadap bilangan gelombang k . Nilai logaritma spektrum amplitudo diplot terhadap bilangan gelombang k dan kemiringan grafik yang diperoleh merupakan kedalaman bidang batas anomali tersebut.

Berikut ini persamaan yang digunakan dalam proses analisis spektrum:

$$A = Ce^{k(z_0 - z')} \quad \dots(4.1)$$

$$\ln A = (z_0 - z')|k|$$

dimana, A : spektrum amplitude $A(k) = [(\operatorname{Re} G(k))^2 + (\operatorname{Im} G(k))^2]^{1/2}$

k : bilangan gelombang ($k = 2\pi/\lambda$)

$(z_0 - z')$: kedalaman bidang batas diskontinuitas atau kedalaman sumber anomali

Untuk melakukan analisis spektrum, perlu diketahui terlebih dahulu spektrum amplitude A dan bilangan gelombang k . Hal ini dikarenakan data gravitasi diambil dalam domain spasial sedangkan untuk memperoleh spektrum amplitude A dan bilangan gelombang k yang merupakan komponen dalam domain frekuensi atau panjang gelombang. Dengan demikian langkah awal yang harus dilakukan yakni proses Transformasi Fourier. Transformasi Fourier merupakan

metode untuk mentransformasi data dari domain waktu atau spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang.

Hasil transformasi Fourier ini merupakan bilangan kompleks dimana terdapat komponen real dan komponen imajiner. Dari kedua komponen tersebut akan dapat diperoleh spektrum amplitude A dengan menggunakan rumus $A(k)=[(Re G(k))^2+(Im G(k))^2]^{1/2}$, sedangkan bilangan gelombang k dapat ditentukan dengan rumus $k= 2\pi/\lambda$.

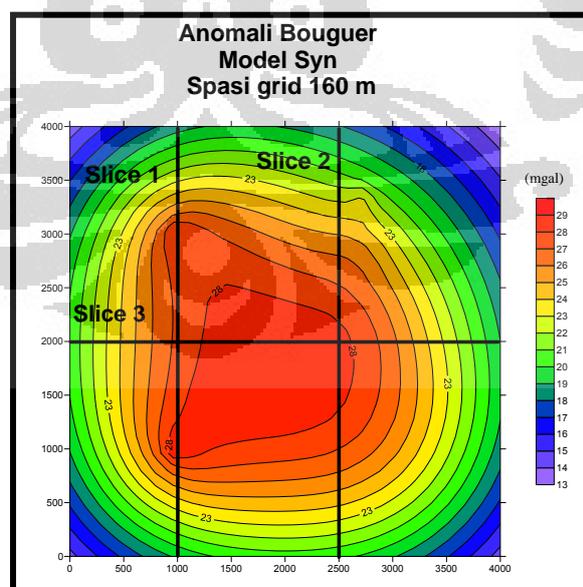
Langkah-langkah yang ditempuh untuk melakukan proses analisis spektrum dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. *Digitizing* dan *Slicing*

Karena proses analisis spektrum dilakukan dalam satu dimensi, sedangkan data anomali Bouguer hasil pemodelan kedepan merupakan data dalam 2 dimensi, maka untuk memperoleh data 1 Dimensi kita dapat melakukan proses *digitizing* dan *sciling* dari kontur anomali Bouguer. Proses ini dilakukan dengan bantuan program *Surfer 9.0*.

a. *slicing* model Syn

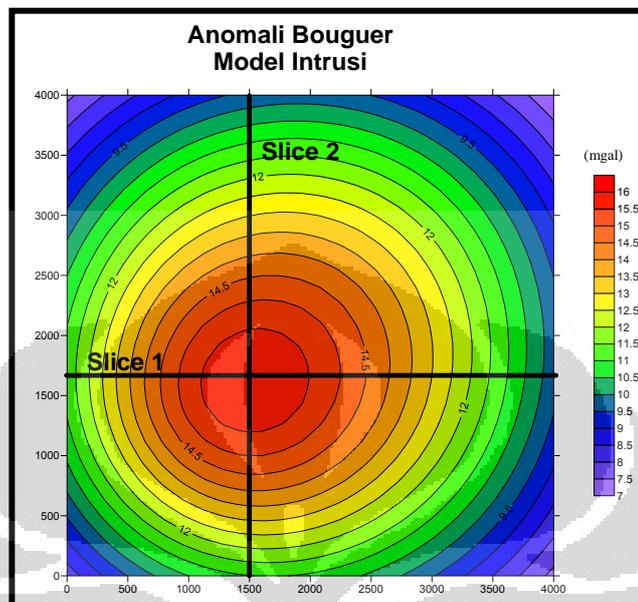
Peneliti mencoba melakukan 3 buah slice, sehingga diperoleh tiga penampang *cross section* yang saling memotong seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Anomali Bouguer sintetik dari model Syn yang menunjukkan lokasi 3 lintasan yang akan digunakan dalam proses analisis spektrum

b. *slicing* model Intrusi

Untuk model Intrusi, dibuat dua lintasan yang saling memotong, lintasan tersebut dapat digambarkan seperti pada gambar berikut ini:

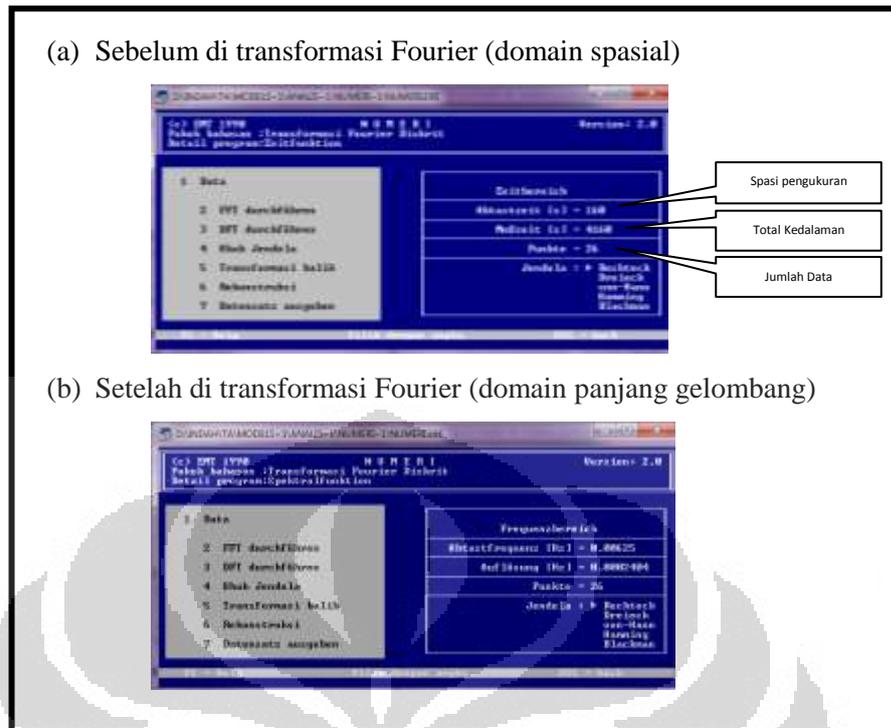


Gambar 4.3 Anomali Bouguer Sintetik dari model Intrusi yang menunjukkan lokasi 2 lintasan (slice) yang akan digunakan dalam proses analisis spektrum

2. Transformasi Fourier

Setelah dilakukan proses *slicing* dan diperoleh tiga penampang *cross section* untuk model Syn dan 2 penampang *cross section* untuk model Intrusi, maka kita dapat langsung memperoleh data anomali Bouguer 1D. Data inilah yang kemudian akan siap di transformasi Fourier.

Proses transformasi Fourier dilakukan dengan bantuan program NUMERI, program ini melakukan *Discrete Fourier Transform* dari informasi anomali gravitasi dan grid gravitasi disesuaikan dengan grid lapangan atau grid pada saat pengambilan data. Hasil dari proses ini yakni berupa panjang gelombang dan nilai anomali dalam domain panjang gelombang atau frekuensi yang nilainya berupa bilangan kompleks yakni komponen real dan imajiner.



Gambar 4.4 Program Numeri yang digunakan dalam proses transformasi Fourier. (a)sebelum di transformasi Fourier dalam domain spasial, (b)setelah ditransformasi Fourier dalam domain panjang gelombang

3. Mencari nilai Spektrum Amplitudo A dan Bilangan gelombang k

Dari hasil transformasi Fourier diperoleh data dalam domain panjang gelombang terdiri dari panjang gelombang λ untuk mencari nilai bilangan gelombang k dan amplitudo yang terdiri dari komponen real dan imajiner yang nantinya digunakan untuk mencari nilai spektrum amplitudo A . Spektrum amplitudo dapat dicari dengan menggunakan rumus $A(k) = \sqrt{(\text{Re } G(k))^2 + (\text{Im } G(k))^2}^{1/2}$, sedangkan bilangan gelombang k dapat ditentukan dengan rumus $k = 2\pi/\lambda$.

4. Plot $\ln A$ terhadap k

Setelah diperoleh spektrum amplitudo A dan bilangan gelombang k , maka kita dapat melakukan analisis spektrum yang memenuhi persamaan power spektrum $A = Ce^{k(z_0 - z')}$, dan dengan melogaritmakan persamaan tersebut menjadi $\ln A = (z_0 - z')|k|$, kemudian di plot dengan bantuan *Microsoft Excel* dalam suatu grafik dimana kemiringan atau gradien dari grafik tersebut merupakan kedalaman sumber anomali yang di cari $(z_0 - z')$.

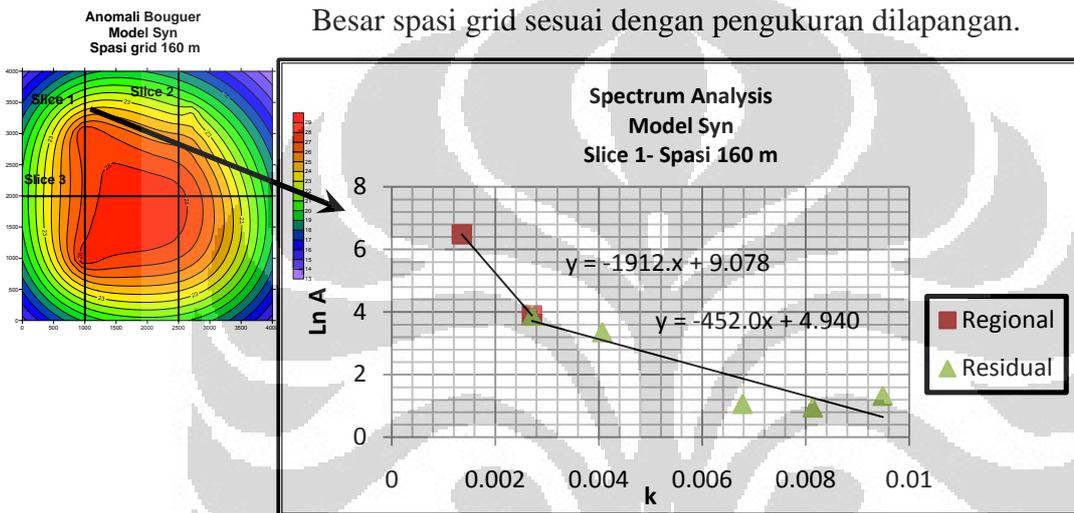
Langkah-langkah tersebut dilakukan satu-persatu sesuai dengan slice yang dipilih, dan untuk membuktikan bahwa grid berpengaruh pada kedalaman estimasi sumber anomali, maka peneliti juga melakukan variasi besar spasi grid tetapi hanya pada lintasan 1 untuk model Syn saja.

4.2.1 Analisis spektrum dari model Syn

a. Analisis spektrum model Syn untuk slice 1

- ❖ Slice 1 dengan spasi grid = 160 m

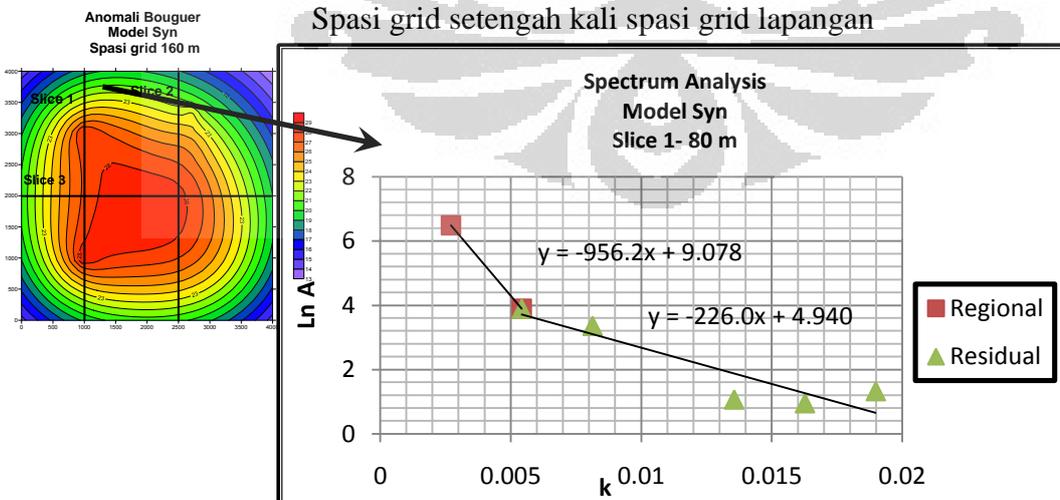
Besar spasi grid sesuai dengan pengukuran dilapangan.



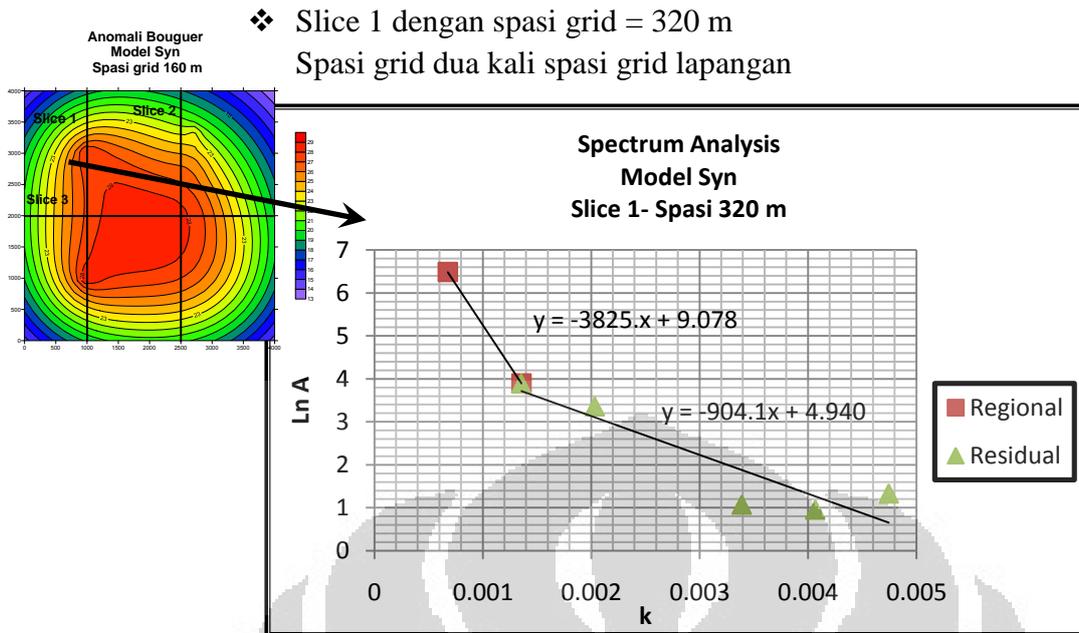
Gambar 4.5 Trend anomali regional dan residual lintasan 1 hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.

- ❖ Slice 1 dengan spasi grid = 80 m

Spasi grid setengah kali spasi grid lapangan



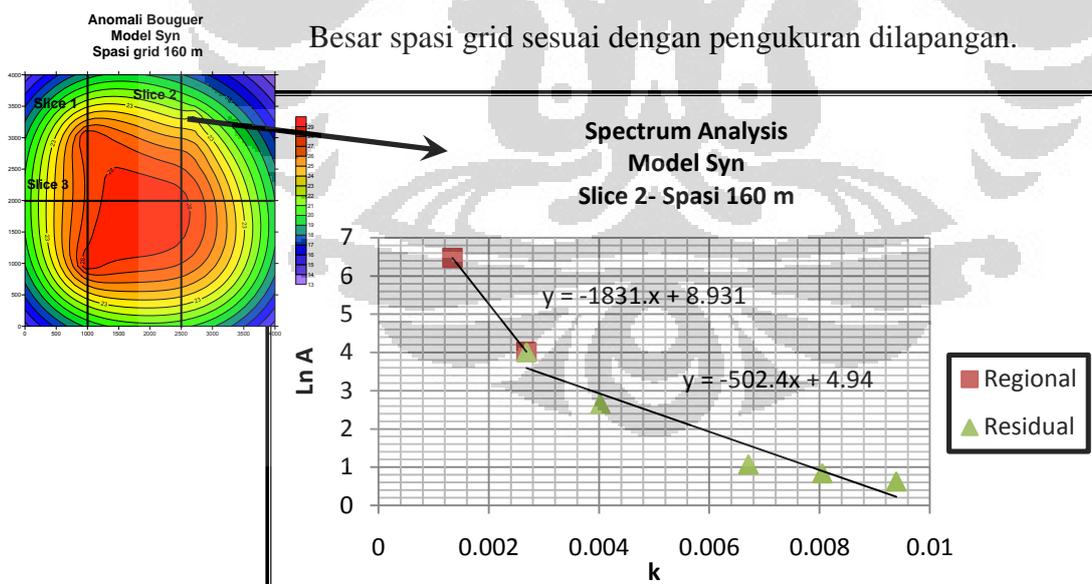
Gambar 4.6 Trend anomali regional dan residual pada lintasan 2 hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 80 m.



Gambar 4.7 Trend anomali regional dan residual lintasan 1 hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 320 m.

b. Analisis spektrum untuk slice 2

- ❖ Slice 2 dengan spasi grid = 160 m
Besarnya spasi grid sesuai dengan pengukuran di lapangan.

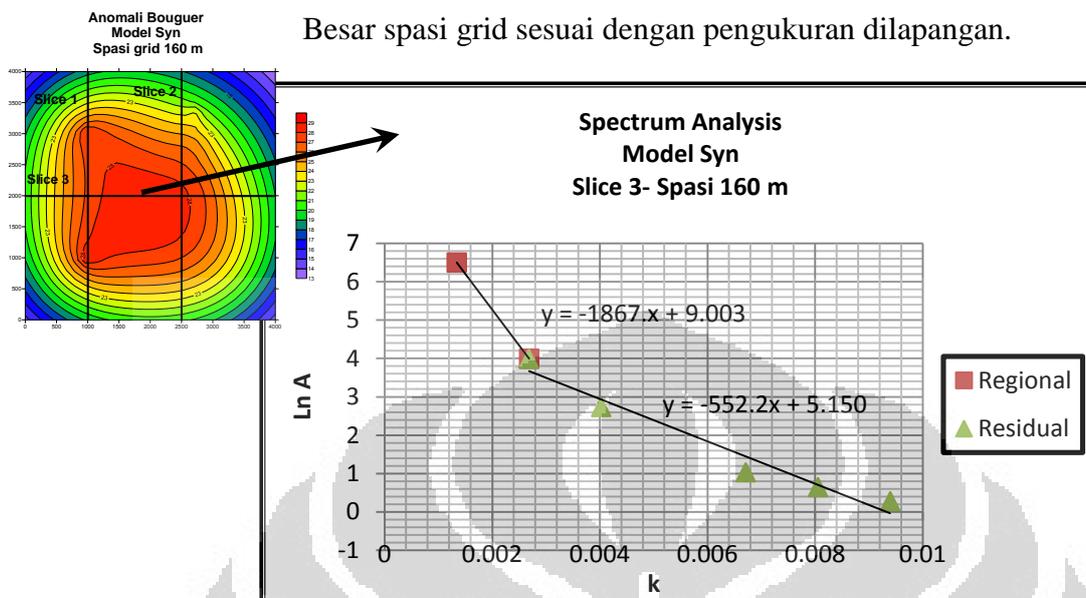


Gambar 4.8 Trend anomali regional dan residual lintasan 2 hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.

c. Analisis spektrum untuk slice 3

❖ Slice 2 dengan spasi grid = 160 m

Besar spasi grid sesuai dengan pengukuran dilapangan.



Gambar 4.9 Trend anomali regional dan residual lintasan 3 hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.

Dari proses analisis spektrum pada lintasan 1 (slice 1) untuk besar spasi grid 160 m, diperoleh estimasi kedalaman bidang batas anomali regional pada kedalaman -1912 m dan -452,0 m untuk kedalaman estimasi anomali residual. Untuk lintasan ke 2 dan ke 3 berturut-turut, diperoleh estimasi kedalaman anomali regional pada kedalaman -1831 m dan -1867 m, sedangkan anomali residualnya pada kedalaman -502,4 m dan -552,2 m.

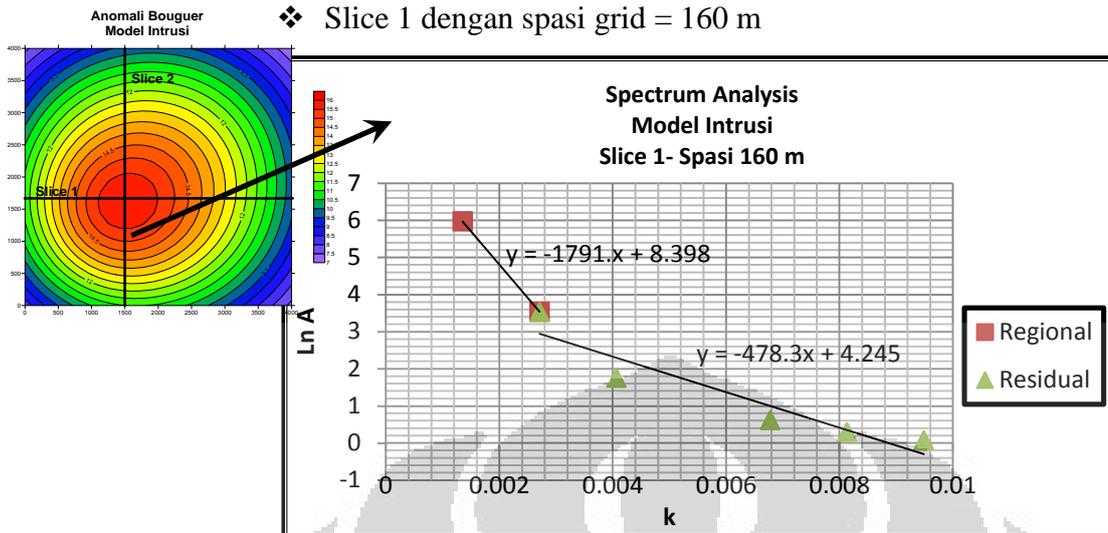
Pada lintasan pertama dilakukan proses analisis spektrum dengan memvariasikan spasi grid yakni 160 m, 80 m, dan 320 m. Estimasi kedalaman anomali regional dan residual pada lintasan 1 dengan spasi grid 80 m yakni pada kedalaman -956.2 m dan -226 m, sedangkan untuk lintasan 1 dengan spasi grid 160 m yakni pada kedalaman -3825 m dan -904,1 m.

4.2.2 Analisis spektrum dari model Intrusi

Model intrusi yang telah dilakukan *sciling* dianalisis spektrum untuk dua lintasan yang saling memotong seperti pada Gambar 4.3.

a. Analisis spektrum model intrusi untuk slice 1

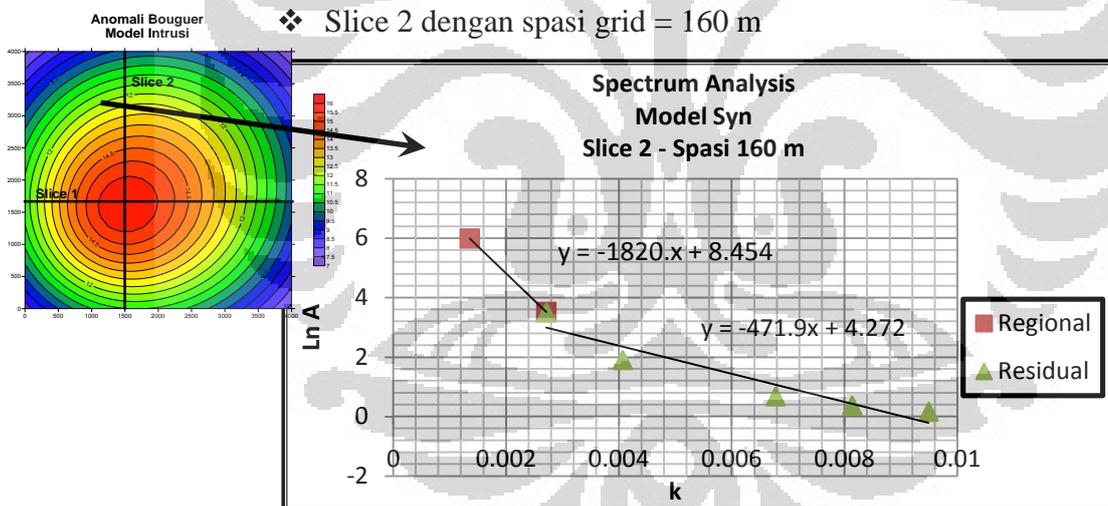
❖ Slice 1 dengan spasi grid = 160 m



Gambar 4.10 Trend anomali regional dan residual lintasan 1 model intrusi hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.

b. Analisis Spectrum model intrusi untuk slice 2

❖ Slice 2 dengan spasi grid = 160 m



Gambar 4.11 Trend anomali regional dan residual lintasan 2 model intrusi hasil dari proses analisis spektrum. Spasi grid yang digunakan 160 m.

Dari hasil analisis spektrum dari model intrusi menunjukkan bahwa anomali regional yang diperoleh untuk setiap lintasan masing-masing adalah - 1791m dan - 1820 m, walaupun terdapat selisih sebesar $\pm 10\%$ relatif terhadap asumsi anomali regionalnya. Sedangkan anomali residual yang diperoleh dari analisis spektrum berada pada kedalaman - 478,3 m dan - 471,9 m.

4.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Telah disebutkan sebelumnya bahwa anomali Bouguer terdiri dari komponen anomali residual akibat pengaruh benda-benda sumber anomali dangkal dan anomali regional akibat keberadaan benda-benda sumber anomali dalam. Secara matematis dapat dituliskan seperti pada persamaan

$$g_{\text{Bouguer}} = g_{\text{reg}} + g_{\text{res}} \quad \dots(4.2)$$

dimana, g_{Bouguer} : anomali Bouguer
 g_{reg} : anomali regional
 g_{res} : anomali residual

Pada umumnya terdapat beberapa metoda dalam proses separasi regional-residual yang digunakan untuk memperoleh nilai anomali regional, diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. *Trend Surface Analysis* atau *Polynomial Fitting*
- b. *Upward Continuation*
- c. *Lowpass Filter*

Setelah diperoleh anomali regional dari ketiga jenis metode tersebut, maka untuk mengetahui anomali residualnya yakni dengan cara mengurangi anomali bouguer dengan anomali regionalnya seperti pada persamaan 4.3.

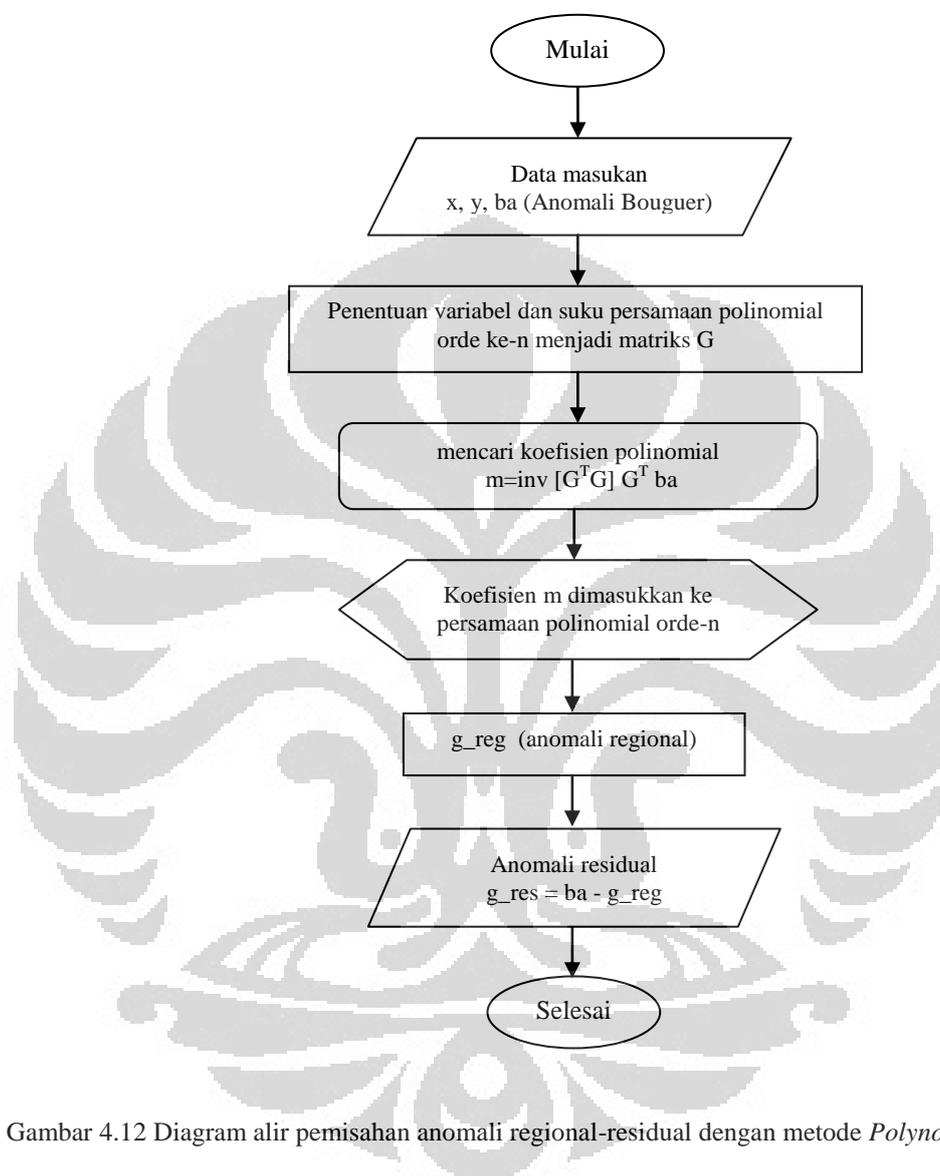
$$g_{\text{res}} = g_{\text{Bouguer}} - g_{\text{reg}} \quad \dots(4.3)$$

4.4 Metode Polynomial Trend Surface Analysis

Proses pemisahan anomali regional dan residual dengan menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis* dilakukan dengan menggunakan pendekatan persamaan polinomial berorde-n. Pada prinsipnya, dalam metode separasi menggunakan *Polynomial Trend Surface Analysis* ini yakni mencari konstanta-konstanta $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$. Dengan mengetahui nilai konstanta-konstanta tersebut maka akan diperoleh persamaan polinomial yang mendekati nilai anomali bouguer yang telah diketahui.

Pada penelitian kali ini, penulis melakukan variasi orde, yakni dari orde 1 sampai dengan orde ke 5 dan melihat perbedaan antara kelima variasi orde

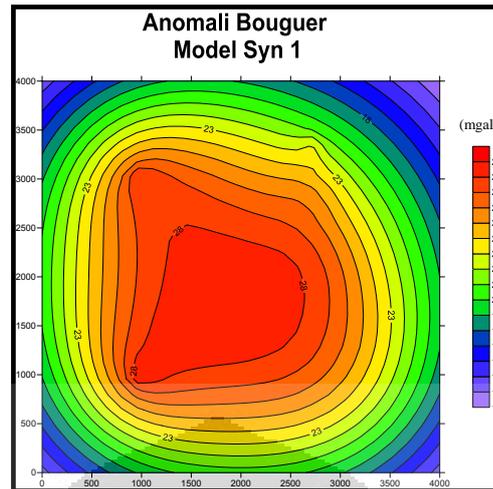
tersebut dan menganalisisnya. Proses pemisahan dilakukan dengan bantuan program **Matlab.R2009a**, dimana penulis mencoba membuat program *polynomial TSA* menggunakan persamaan polinomial sesuai dengan ordenya.



Gambar 4.12 Diagram alir pemisahan anomali regional-residual dengan metode *Polynomial TSA*

4.4.1 Pengujian Metode Polynomial TSA untuk Model Syn

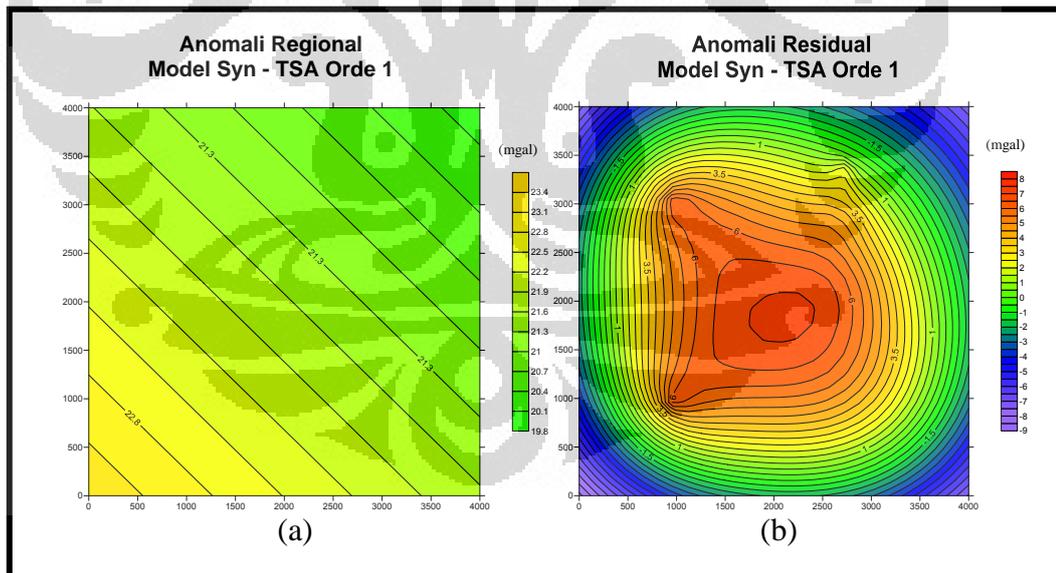
Proses pemisahan anomali regional dan residual dengan menggunakan metode Polinomial diuji dan diaplikasikan menggunakan data anomali Bouguer sintetik model Syn dan model Intrusi. Selain itu dilakukan juga variasi orde polinomial yakni dari orde 1 sampai dengan orde ke-5. Berikut ini anomali Bouguer sintetik model Syn sebelum dilakukan *Polynomial TSA*:



Gambar 4.13 Anomali Bouguer sintetik dari model Syn

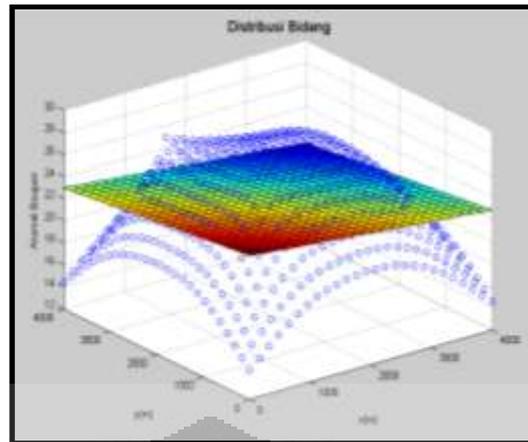
1. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 1

Proses pemisahan anomali regional-residual dengan *Polynomial Trend Surface Analysis* Orde-1 menggunakan pendekatan persamaan polinomial orde-1 yakni $g_i = c_1 + c_2x_i + c_3y_i$. Anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses TSA dengan menggunakan persamaan polinomial Orde-1



Gambar 4.14 Hasil proses *Polynomial TSA* dengan persamaan polinomial orde 1. (a) Anomali regional hasil *Polynomial TSA*. (b) Anomali residual hasil *Polynomial TSA*

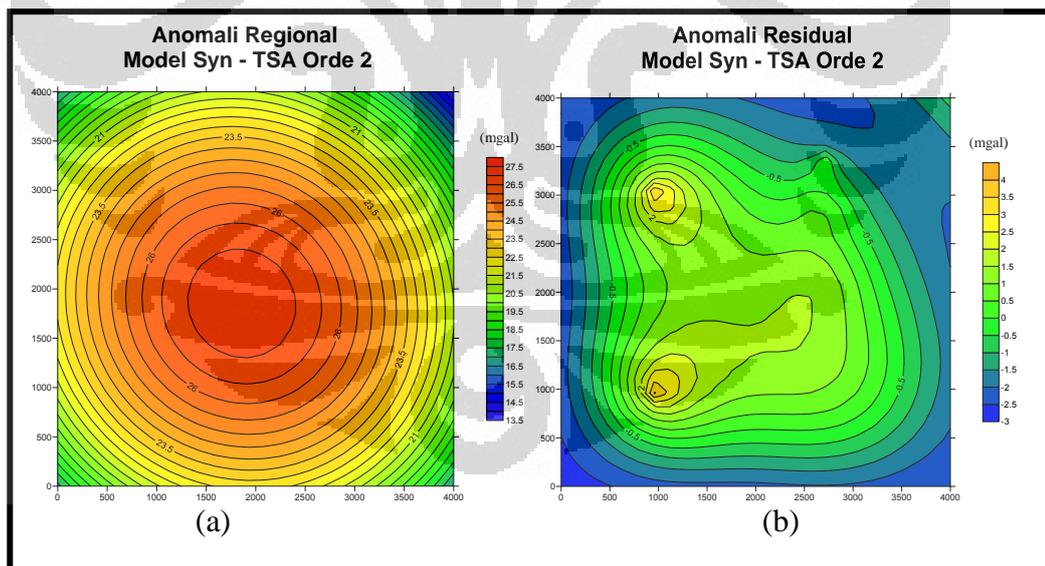
Selain itu kita juga dapat meninjau distribusi data dalam 3D dan distribusi bidang pemotong (nilai dan posisi) anomali dari pendekatan polinomial orde 1 seperti pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 1

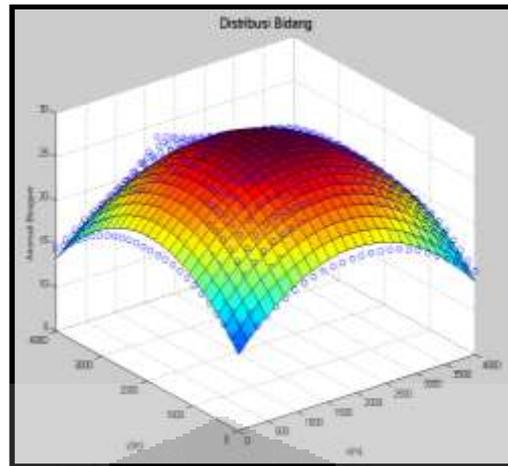
2. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 2

Polynomial Trend Surface Analysis dalam proses pemisahan anomali regional dan residual juga dilakukan dengan menggunakan pendekatan persamaan polinomial orde-2. Persamaan polinomial orde 2 tersebut adalah $g_i = c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy + c_5x^2 + c_6y^2$.



Gambar 4.16 Hasil proses *Polynomial TSA* dengan persamaan polinomial orde 2. (a) Anomali regional hasil *Polynomial TSA*. (b) Anomali residual hasil *Polynomial TSA*

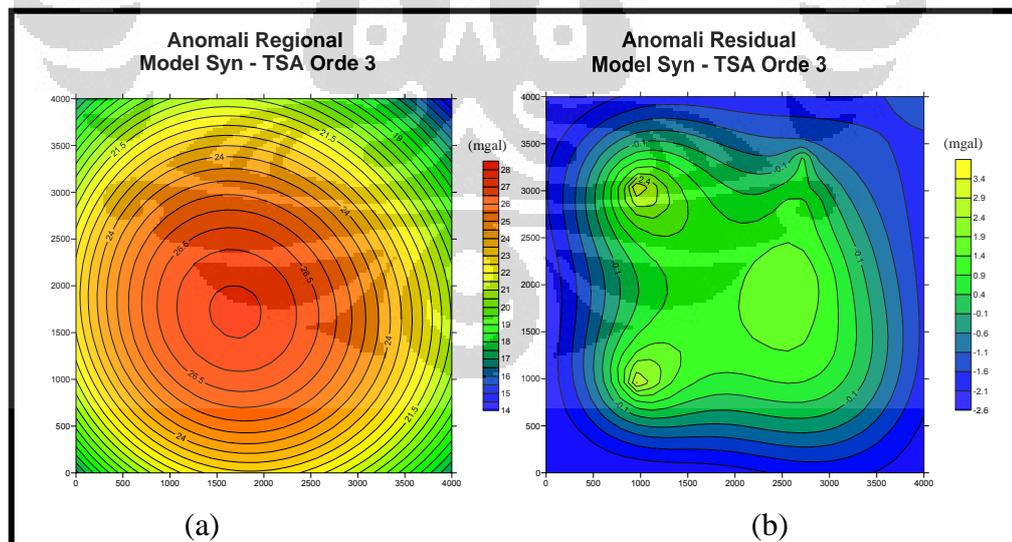
Distribusi bidang (nilai dan posisi) dari pendekatan polinomial orde 2 adalah sebagai berikut:



Gambar 4.17 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 2

3. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 3

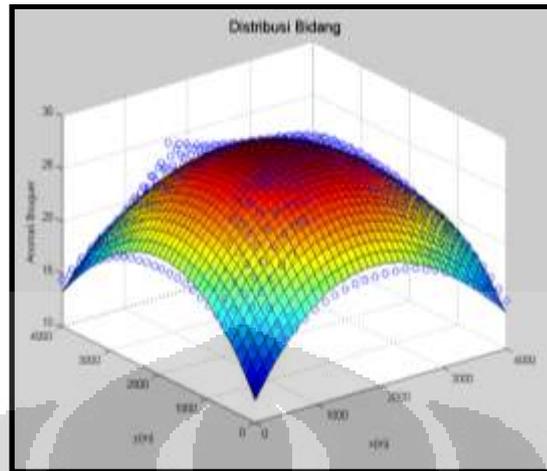
Persamaan polinomial orde 3 yang digunakan dalam proses pemisahan anomali dengan *Trend Surface Analysis* ini yakni $g_i = c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy + c_5x^2 + c_6y^2 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9x^3 + c_{10}y^3$. Anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses *Trend Surface Analysis* dengan menggunakan persamaan polinomial Orde-3:



Gambar 4.18 Hasil proses Polinomial TSA dengan persamaan polinomial orde 3.

(a) Anomali regional hasil Polinomial TSA. (b) Anomali residual hasil Polinomial TSA

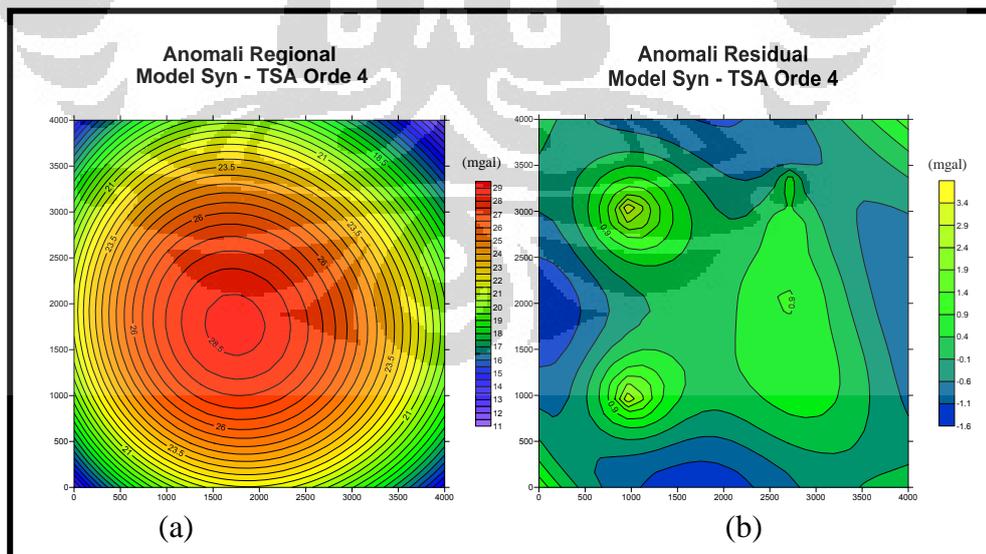
dan distribusi bidang untuk pendekatan persamaan polinomial orde 3:



Gambar 4.19 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 3

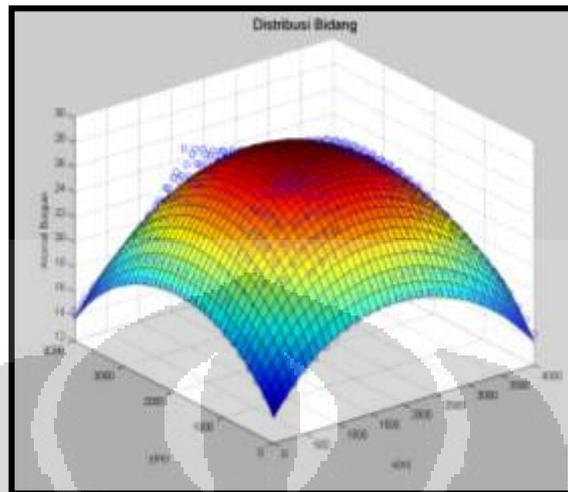
4. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 4

Persamaan *polinomial Trend Surface Analysis* untuk orde 4 yaitu $g_i = c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy + c_5x^2 + c_6y^2 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9x^3 + c_{10}y^3 + c_{11}xy^3 + c_{12}x^3y + c_{13}x^2y^2 + c_{14}x^4 + c_{15}y^4$. Anomali regional dan residual yang dihasilkan dari pendekatan persamaan polinomial orde 4 adalah seperti berikut ini:



Gambar 4.20 Hasil proses Polinomial TSA dengan persamaan polinomial orde 4. (a) Anomali regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali residual hasil polinomial TSA

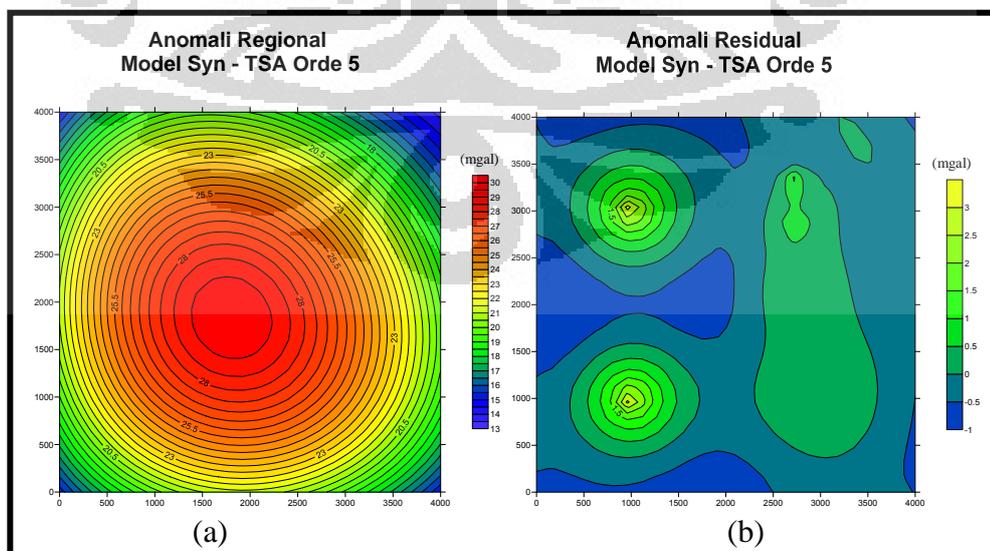
Adapun distribusi bidang dari pendekatan polinomial orde ke 4 ditunjukkan pada Gambar 4.21 berikut ini:



Gambar 4.21 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 4

5. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 5

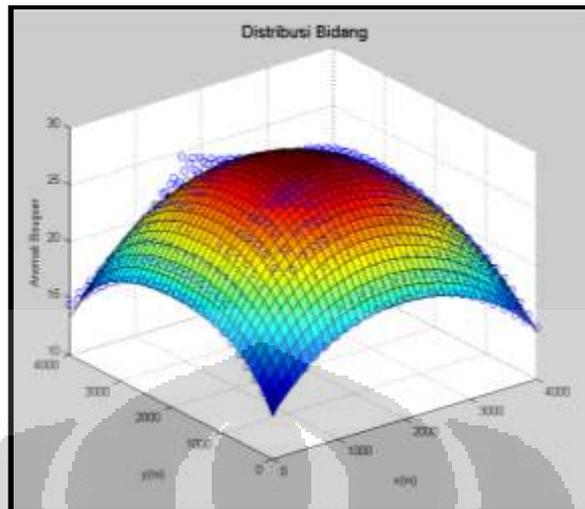
Persamaan polinomial Trend Surface Analysis orde 5 yaitu $g_i = c_1 + c_2x + c_3y + c_4xy + c_5x^2 + c_6y^2 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9x^3 + c_{10}y^3 + c_{11}xy^3 + c_{12}x^3y + c_{13}x^2y^2 + c_{14}x^4 + c_{15}y^4 + c_{16}x^5 + c_{17}x^4y + c_{18}x^3y^2 + c_{19}x^2y^3 + c_{20}xy^4 + c_{21}y^5$, sedangkan anomali regional dan residual dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Hasil proses Polinomial TSA dengan persamaan polinomial orde 5.

(a) Anomali Regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali Residual hasil polinomial TSA

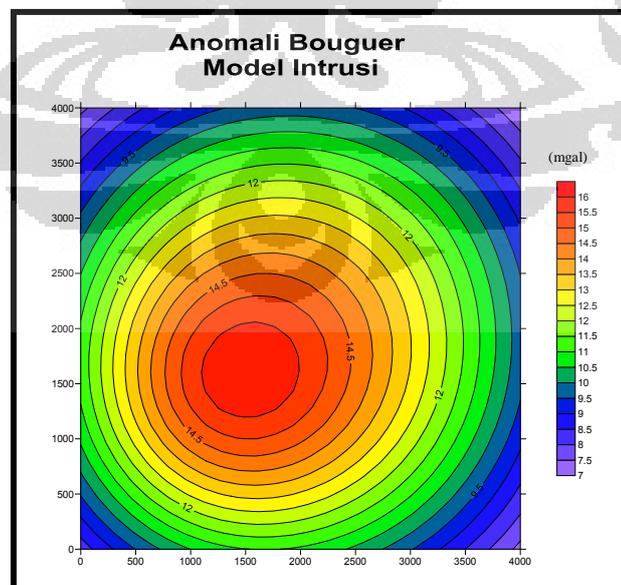
Distribusi bidangnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4.23 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 5

4.4.2 Pengujian Metode Polynomial TSA untuk Model Intrusi

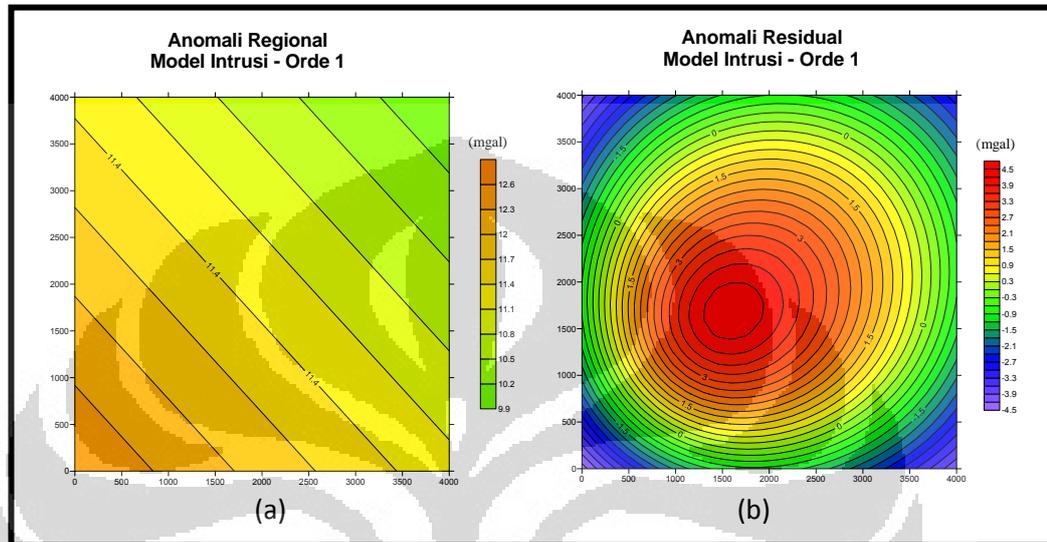
Pemisahan anomali regional dan residual menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis* tidak hanya dilakukan pada model Syn saja, melainkan diuji dengan data anomali Bouguer dari model Intrusi. Anomali Bouguer yang dihasilkan dari model sintetik Intrusi adalah sebagai berikut:



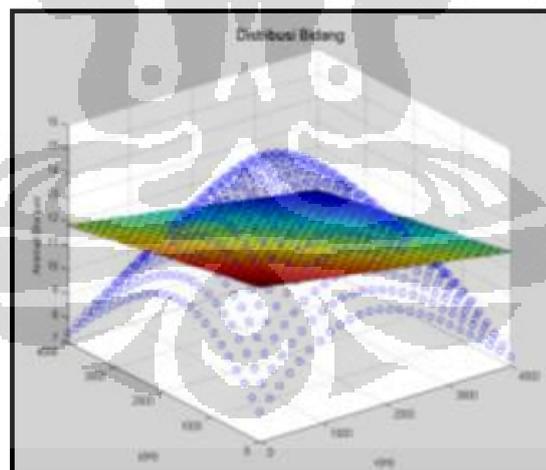
Gambar 4.24 Anomali Bouguer model intrusi

1. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 1

Anomali regional dan residual yang didapat setelah dilakukan proses pemisahan anomali menggunakan metode *Polynomial TSA* orde 1 untuk model Intrusi, dapat dilihat pada Gambar 4.25.



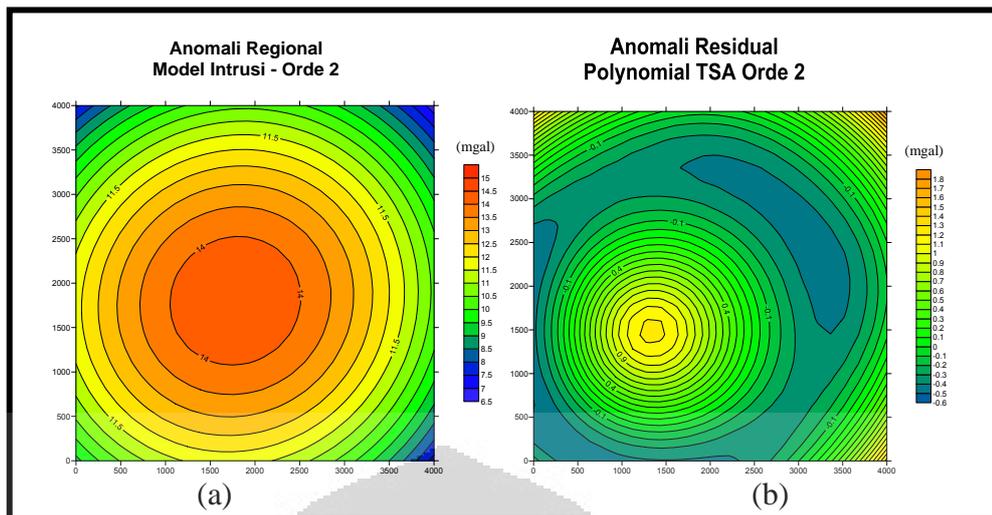
Gambar 4.25 Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 1 untuk model intrusi (a) Anomali Regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali Residual hasil polinomial TSA



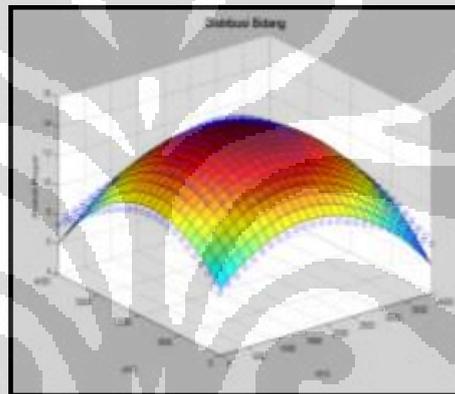
Gambar 4.26 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 1

2. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 2

Berikut ini hasil pemisahan anomali dengan persamaan polinomial TSA orde 2:



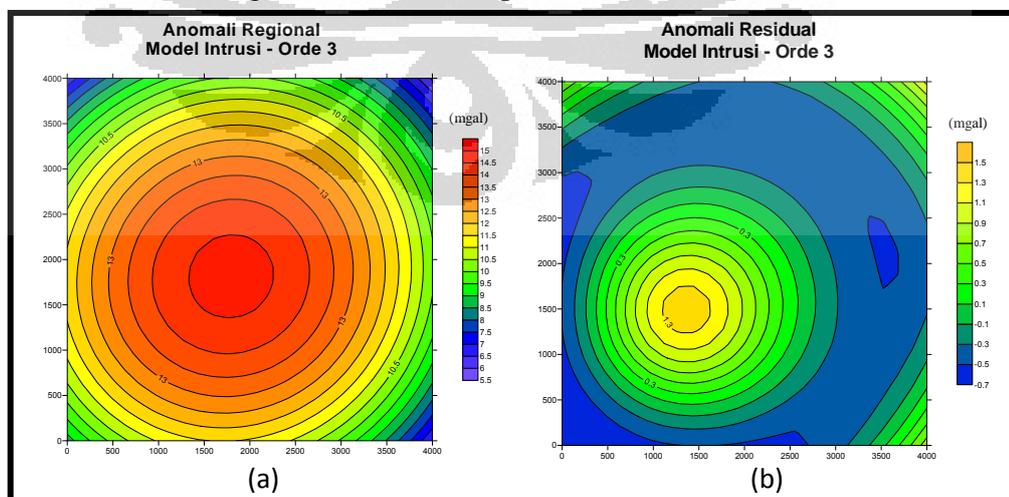
Gambar 4.27 Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 2 untuk model intrusi (a) Anomali Regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali Residual hasil Polinomial TSA



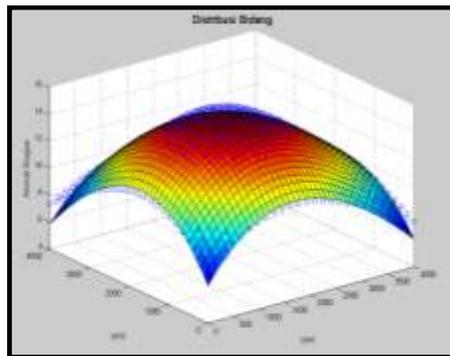
Gambar 4.28 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 2

3. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 3

Anomali regional dan residual polinomial TSA orde3:



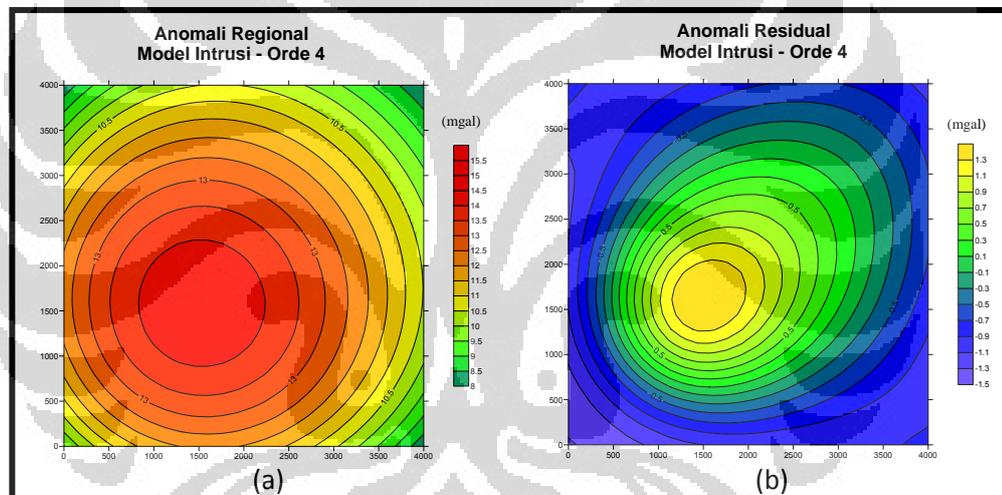
Gambar 4.29 Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 3 untuk model intrusi (a) Anomali Regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali Residual hasil polinomial TSA



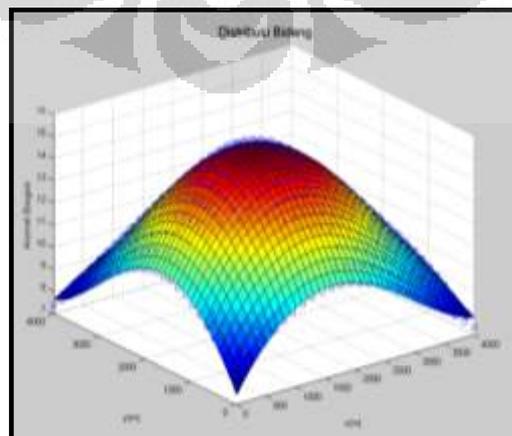
Gambar 4.30 Distribusi bidang untuk pendekatan polinomial orde 3

4. Polynomial Trend Surface Analysis Orde 4

Konstanta yang diperoleh dari hasil pemisahan anomali dengan persamaan polinomial orde 4:



Gambar 4.31 Anomali regional dan residual hasil polinomial orde 4 untuk model intrusi (a) Anomali regional hasil polinomial TSA. (b) Anomali residual hasil polinomial TSA



Gambar 4.32 Distribusi Bidang untuk pendekatan polinomial orde 4

4.5 Metode *Upward Continuation*

Pemisahan anomali regional dan residual menggunakan metode *Upward Continuation*. Pada prinsipnya, metode ini bekerja dengan membawa bidang pengukuran keatas dengan variasi jarak tertentu yang bertujuan untuk melihat tren anomali regional dengan mendominankan anomali regional dan meminimalkan pengaruh noise dan efek anomali residual. Dengan memperoleh anomali regional dan dengan mengurangkannya terhadap anomali Bouguer maka akan diperoleh anomali residualnya.

Proses metode kontinuitas keatas dilakukan dengan bantuan program Matlab R2009a. Penulis mencoba membuat algoritma sederhana yang diturunkan dari persamaan kontinuitas keatas. Terlebih dahulu dilakukan proses Transformasi Fourier sehingga data menjadi domain frekuensi, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Y_{up}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h/2\pi}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2}} e^{-i(ux+vy)} dx dy$$

$$= e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}} \dots(4.4)$$

dimana, $Y_{up}(u, v)$ = Fungsi kontinuitas keatas dalam domain frekuensi

(u, v) = bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan grid point dalam domain frekuensi, berasosiasi dengan koordinat (x, y)

h = ketinggian bidang kontinuitas.

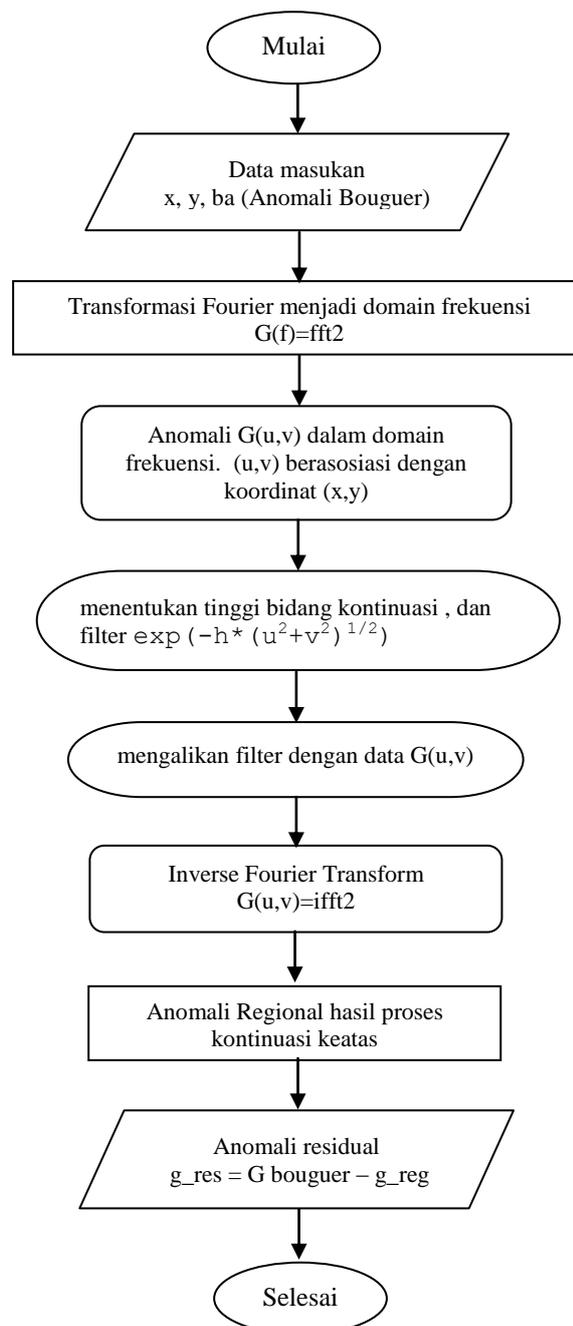
Persamaan tersebut dapat di sederhanakan menjadi:

$$K(u, v) = G(u, v)Y_{up}(u, v)$$

$$K(u, v) = G(u, v)e^{-h|u|} \dots(4.5)$$

setelah diperoleh fungsi kontinuitas keatas dari persamaan (4.4), fungsi tersebut kemudian dikalikan dengan data anomali gravitasi $G(u, v)$ dalam domain frekuensi sehingga menghasilkan data $K(u, v)$. Data $K(u, v)$ merupakan data anomali regional yang telah dilakukan kontinuitas keatas sejauh h tertentu. Hasil kontinuitas yang masih dalam domain frekuensi ini kemudian siap untuk di transformasi fourier invers agar dapat ditampilkan dalam bentuk kontur (*mapping*) ke dalam domain spasial.

Pada penelitian kali ini, penulis mencoba melakukan pengujian proses kontinuitas keatas menggunakan data anomali Bouguer sintetis dari model Syn dan model Intrusi. Proses kontinuitas keatas ini juga dilakukan dengan ketinggian bidang kontinuitas h yang bervariasi, mulai dari 1 m, 5 m, 10 m, 50 m, 100 m, 150 m dan seterusnya sampai dengan 1000 m dengan interval ketinggian 50 m. Bagan alir proses pengujian metode *Upward Continuation* dapat dilihat seperti pada gambar berikut ini:



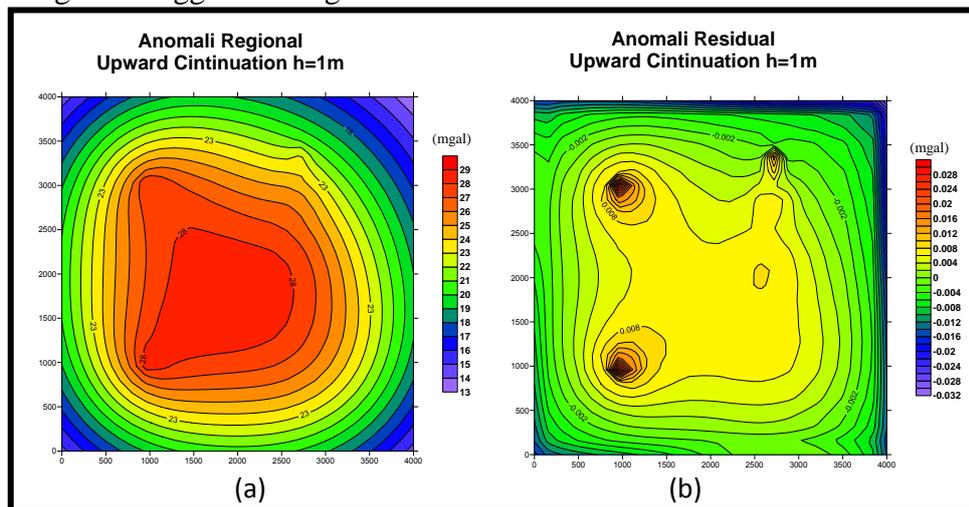
Gambar 4.33 Diagram alir pemisahan anomali regional-residual dengan *upward continuation*

Selanjutnya, beberapa hasil kontinuitas keatas berupa kontur anomali regional dan residual untuk ketinggian bidang kontinuitas h tertentu saja untuk model Syn dan model intrusi.

4.5.1 Pengujian metode *Upward Continuation* untuk model Syn

1. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 1$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuitas keatas dengan ketinggian bidang kontinuitas h sebesar 1 m:

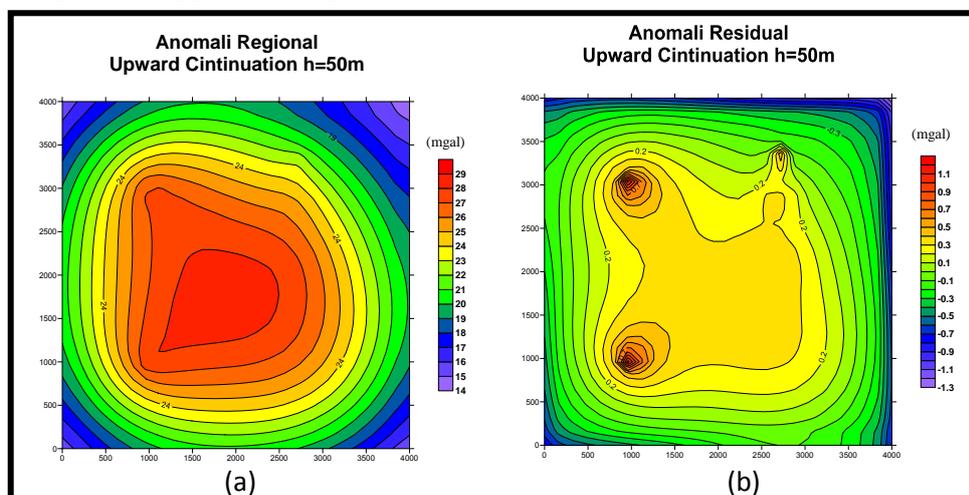


Gambar 4.34 Hasil proses kontinuitas keatas dengan ketinggian $h = 1$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

2. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 50$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuitas keatas dengan ketinggian bidang kontinuitas h sebesar 50 m:

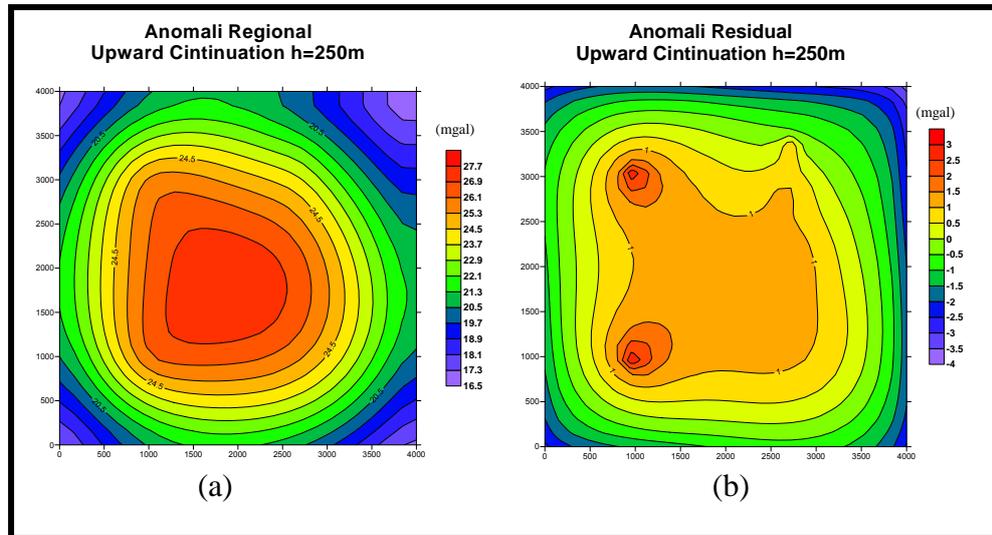


Gambar 4.35 Hasil proses kontinuitas keatas dengan ketinggian $h = 50$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

3. *Upward Continuation* dengan $h = 250$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 250 m:

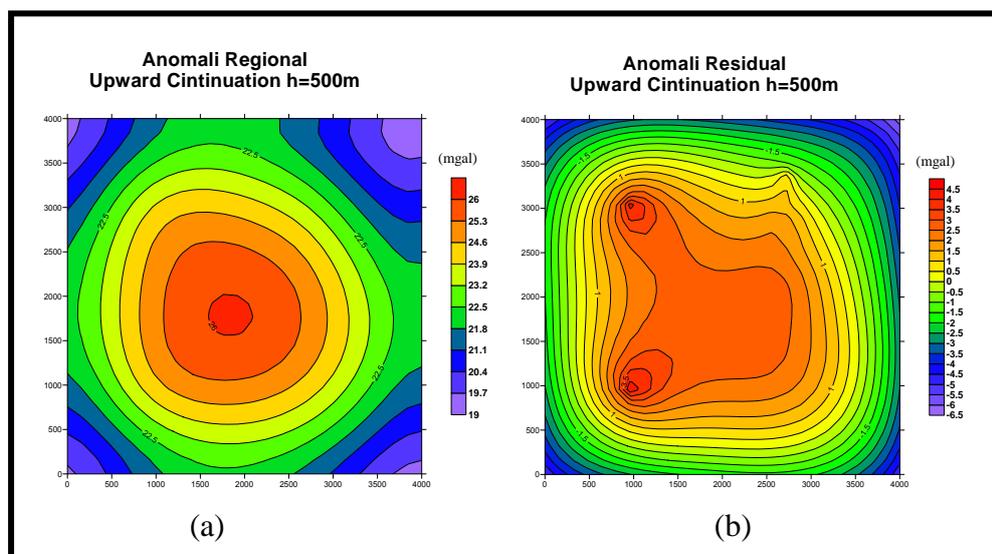


Gambar 4.36 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 250$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

4. *Upward Continuation* dengan $h = 500$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 500 m:

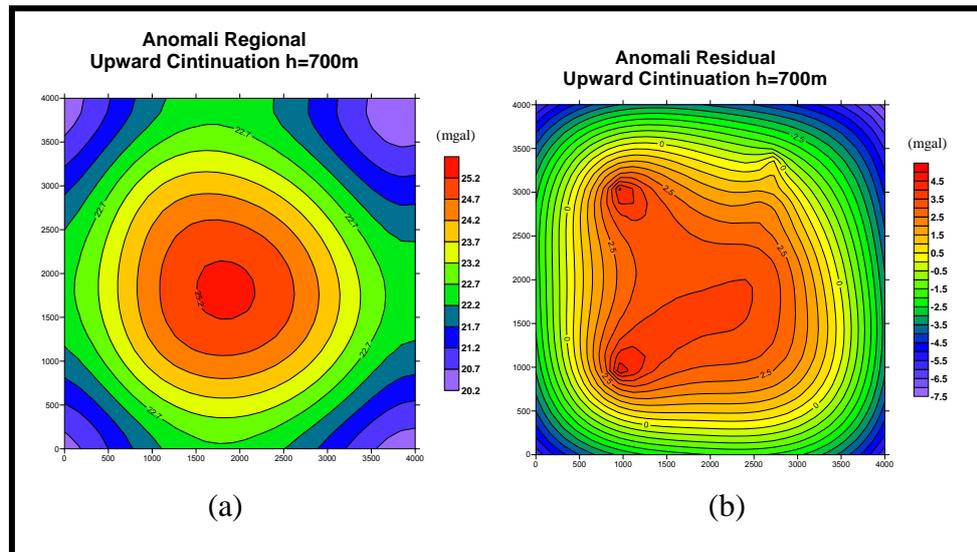


Gambar 4.37 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 500$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

5. *Upward Continuation* dengan $h = 700$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 700 m:

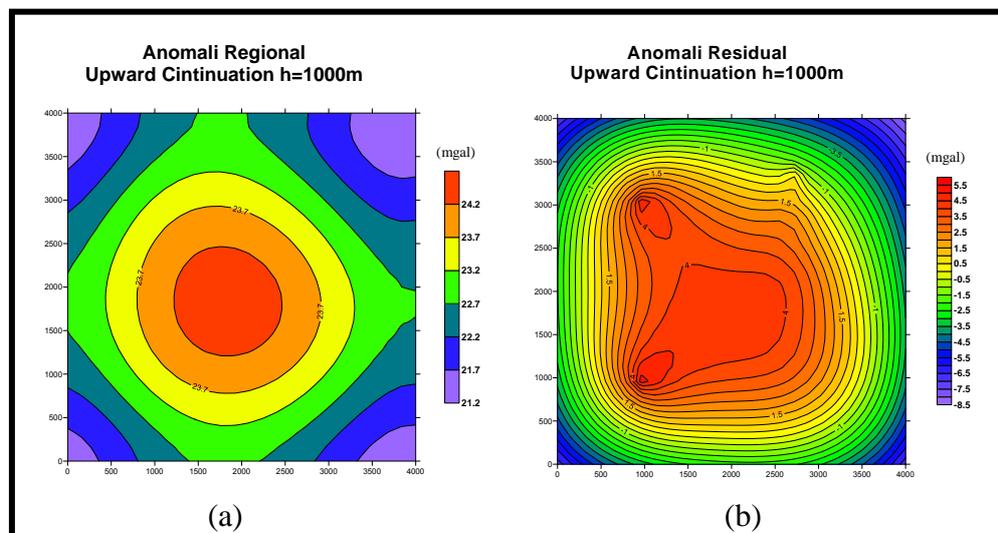


Gambar 4.38 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 700$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

6. *Upward Continuation* dengan $h = 1000$ m

Kontur anomali regional dan residual model Syn hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 1000 m:



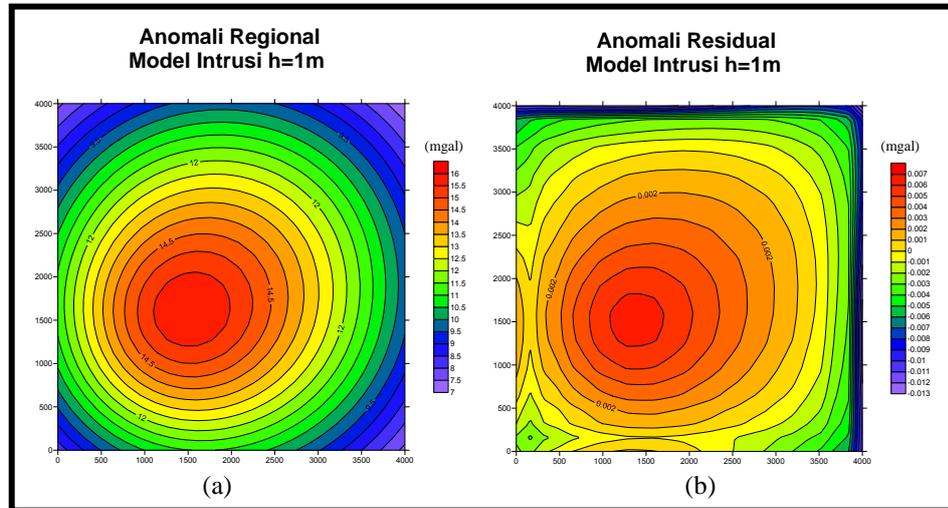
Gambar 4.39 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 1000$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

4.5.2 Pengujian metode *Upward Continuation* untuk model Intrusi

1. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 1$ m

Kontur anomali regional dan residual hasil kontinuitas keatas dengan ketinggian bidang kontinuitas h sebesar 1 m

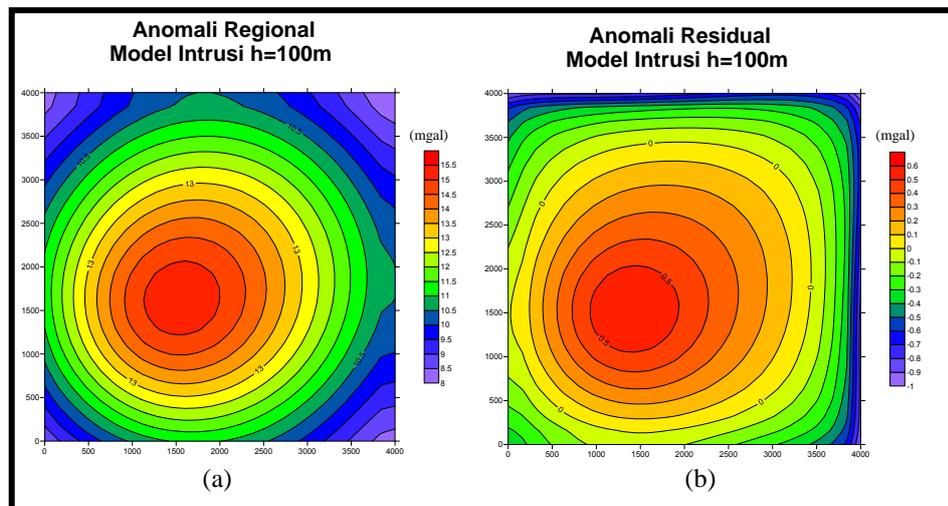


Gambar 4.40 Hasil proses kontinuitas keatas dengan ketinggian $h = 1$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

2. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 100$ m

Kontur anomali regional dan residual hasil kontinuitas keatas dengan ketinggian bidang kontinuitas h sebesar 100 m

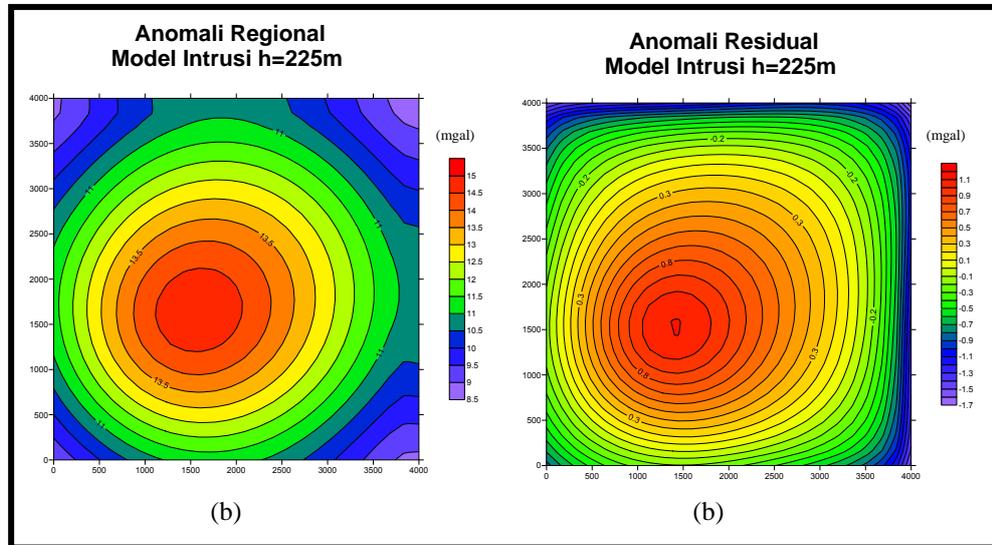


Gambar 4.41 Hasil proses kontinuitas keatas dengan ketinggian $h = 100$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

3. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 225$ m

Kontur anomali regional dan residual hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 225 m

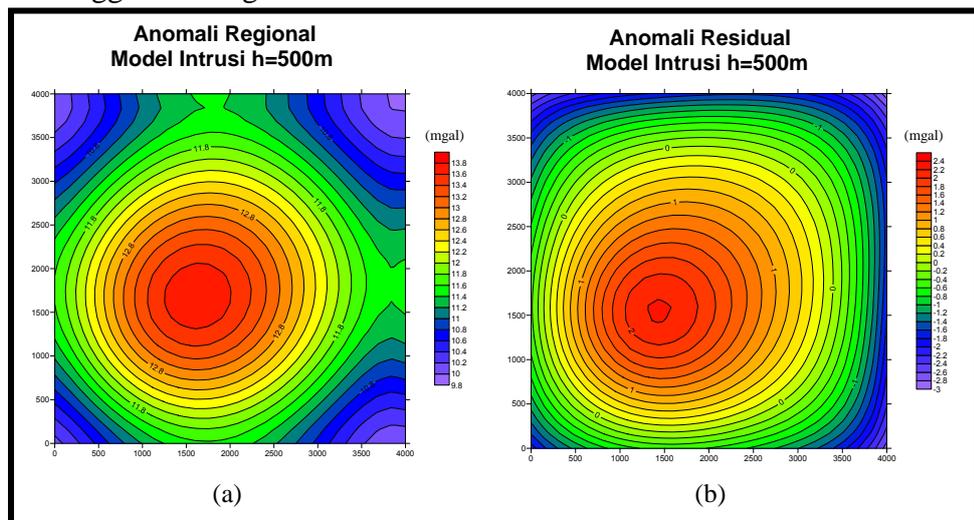


Gambar 4.42 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 225$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

4. *Upward Continuation* dengan ketinggian $h = 500$ m

Kontur anomali regional dan residual hasil kontinuasi keatas dengan ketinggian bidang kontinuasi h sebesar 500 m



Gambar 4.43 Hasil proses kontinuasi keatas dengan ketinggian $h = 500$ m

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

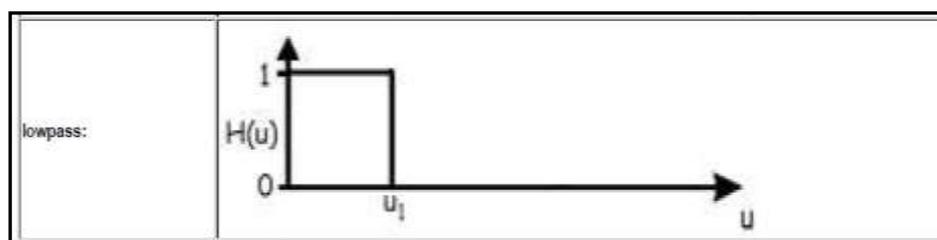
4.6 Metode Lowpass Filter

Metode *wavelength filter* atau *frequency filter* merupakan metode yang cukup umum digunakan dalam proses pemisahan anomali regional dan residual. Metode ini telah dijabarkan pada bab sebelumnya bahwa terdiri dari beberapa jenis. Namun untuk dapat dikomparasi dengan metode *Polynomial TSA* dan *Upward Continuation*, penulis memilih metode *Lowpass Filter*, dimana dari ketiga metode ini akan diperoleh anomali regional dan dengan mengurangi anomali regional tersebut terhadap anomali Bouguer maka akan diperoleh anomali residualnya.

Metode *lowpass Fiter* ini pada prinsipnya meloloskan bilangan gelombang rendah (panjang gelombang tinggi) yang berasosiasi dengan anomali regional dan membuang bilangan gelombang tinggi (panjang gelombang rendah) yang merepresentasikan anomali residual dan noise. Seperti terlihat pada Gambar 4.44, bilangan gelombang yang lebih besar dari pada bilangan gelombang (panjang gelombang) cutoff u_1 akan dibuang, sedangkan bilangan gelombang yang lebih kecil dari bilangan gelombang cutoff u_1 akan diloloskan sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$H(u) = 0, \text{ jika } u > u_1$$

$$H(u) = 1, \text{ jika } u < u_1$$



Gambar 4.44 Lowpass filter, meloloskan frekuensi rendah untuk memperoleh anomali regional (*Geosoft Incorporated, 2001*)

Dalam proses *lowpass filter*, telah disebutkan bahwa kita membutuhkan sebuah bilangan gelombang cutoff sebagai bilangan gelombang pemisah antara kelompok frekuensi (bilangan gelombang) tinggi dan (bilangan gelombang) frekuensi rendah. Nilai *cutoff wavenumber* ini dapat dicari menggunakan proses analisis spektrum yang telah dilakukan sebelumnya. Karena penulis menggunakan

program Surfer 9.0 untuk membantu mengerjakan proses lowpass filtering, program ini membutuhkan besar lebar jendela sebagai pengganti bilangan gelombang cutoff. Untuk mencari lebar jendela kita dapat menggunakan rumus (widiyanto, 2008):

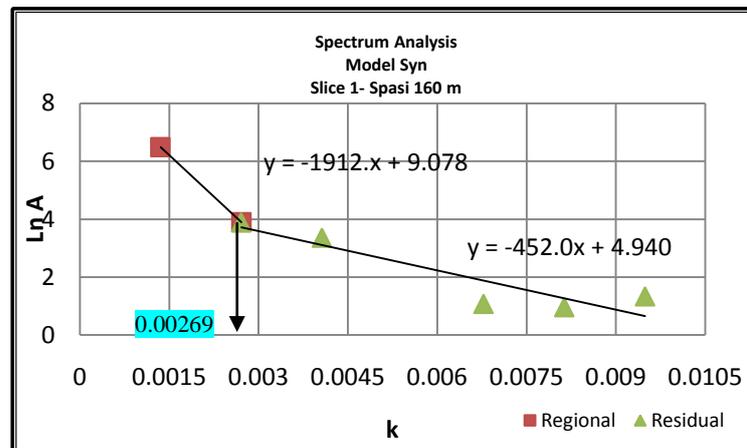
$$\lambda = \frac{2\pi}{k_{cutoff}} \rightarrow N = \frac{\lambda}{\Delta x} \quad \dots(4.6)$$

dimana N = lebar jendela

Δx = interval cuplik (besar spasi grid)

k_{cutoff} = bilangan gelombang potong

Untuk mengetahui nilai bilangan gelombang cutoff, kita dapat menggunakan grafik hasil plot $\ln A$ terhadap bilangan gelombang k untuk mencari bilangan gelombang cutoffnya. Bilangan gelombang k_{cutoff} diketahui dengan menarik garis diantara batas plot kedalaman anomali regional dan residual dan mencatat nilai k cutoffnya seperti gambar berikut:



Gambar 4.45 Penentuan bilangan gelombang cutoff dari proses analisis spektrum

Penentuan lebar jendela N dapat menggunakan persamaan 4.6 dimana Δx atau spasi gridnya sebesar 160 m sesuai dengan spasi grid pengambilan data. Semakin besar lebar jendela N yang digunakan, semakin lebar panjang gelombang yang diloloskan. Jika ditinjau dari persamaan 4.6, besar lebar jendela berbanding terbalik dengan bilangan gelombang potong k_{cutoff} , artinya semakin rendah bilangan gelombang cutoff maka lebar jendela yang dihasilkan semakin besar.

Besar lebar jendela menentukan bidang batas pemisah anomali regional-residual, semakin tinggi lebar jendela maka makin dalam bidang pemisah anomalinnya.

Dari hasil pengolahan dengan analisis spektrum, berikut ini tabel bilangan gelombang potong k_{cutoff} dan lebar jendela N untuk model Syn dan model Intrusi dengan interval cuplik atau Δx sebesar 160 m, untuk selanjutnya digunakan dalam proses lowpass filter:

Tabel 4.1 Besar k_{cutoff} dan lebar jendela yang digunakan dalam proses filter *lowpass* model Syn

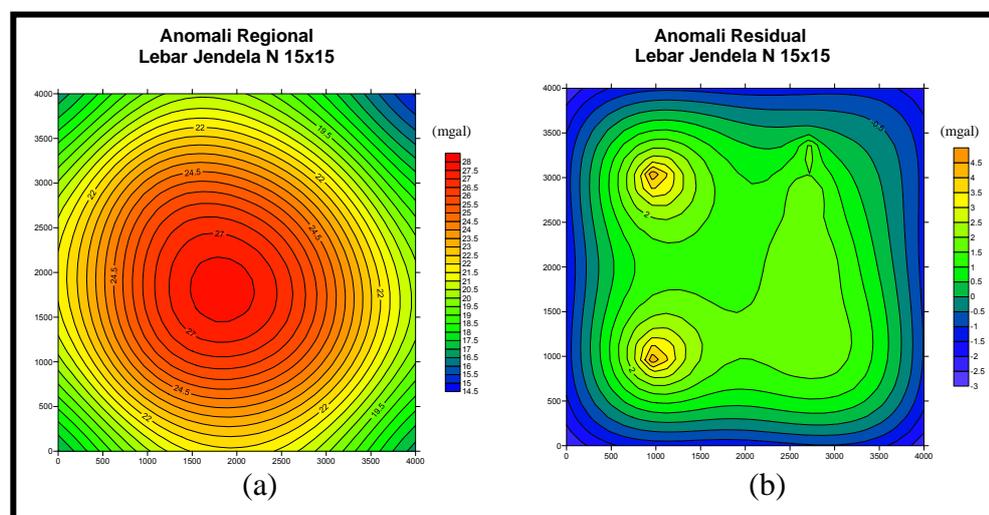
No	Lintasan	k Cutoff	Lebar Jendela
1	Lintasan 1	0.00269	14.591
2	Lintasan 2	0.00270	14.537
3	Lintasan 3	0.00271	14.483
Rata-rata			14.537 → 15

Tabel 4.2 Besar k_{cutoff} dan lebar jendela yang digunakan dalam proses filter *lowpass* model Intrusi

No	Lintasan	k Cutoff	Lebar Jendela
1	Lintasan 1	0.00270	14.537
2	Lintasan 2	0.00269	14.591
Rata-rata			14.564 → 15

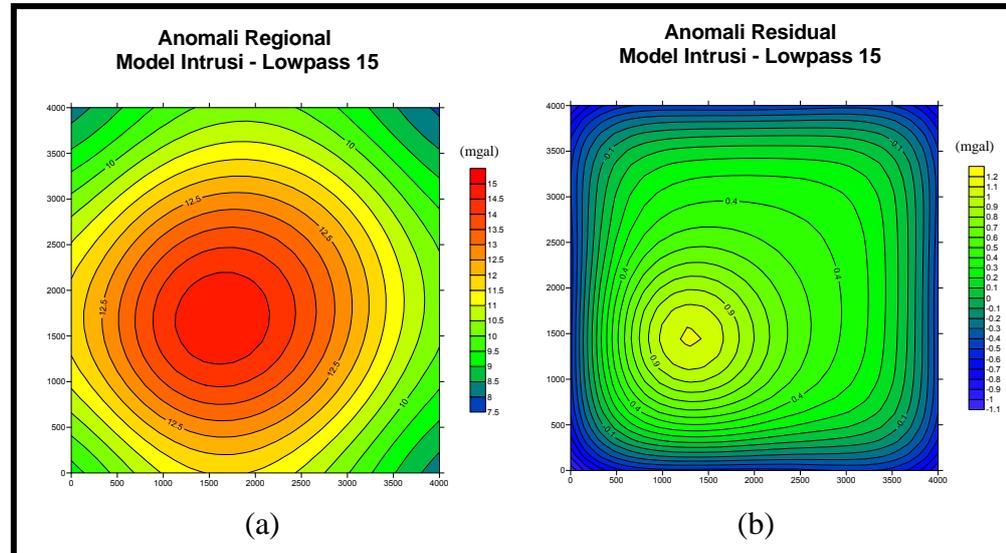
Setelah dilakukan penentuan lebar jendela yang nilainya sebesar 15, kita dapat menggunakan besar lebar jendela ini pada program Surfer 9.0 untuk menjalankan filter lowpas.

1. Lowpass filter model Syn dengan menggunakan lebar jendela 15



Gambar 4.46 Hasil proses lowpass filter model Syn dengan lebar jendela 15 (a) Anomali regional (b) Anomali sesidual

2. Lowpass filter model Intrusi dengan menggunakan lebar jendela 15



Gambar 4.47 Hasil proses lowpass filter model Intrusi dengan lebar jendela 15

(a) Anomali regional (b) Anomali residual

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pemisahan anomali regional-residual dilakukan dengan berbagai metode diantaranya metode *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Upward Continuation* dan *Lowpass Filter*. Sedangkan proses estimasi kedalaman bidang batas anomali regional dan residual dilakukan dengan metode Analisis Spektrum. Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil dari proses pemisahan anomali dan estimasi kedalaman anomali tersebut dan menganalisa hasilnya.

5.1 Model Sintetik dan Anomali Bouguer Sintetik

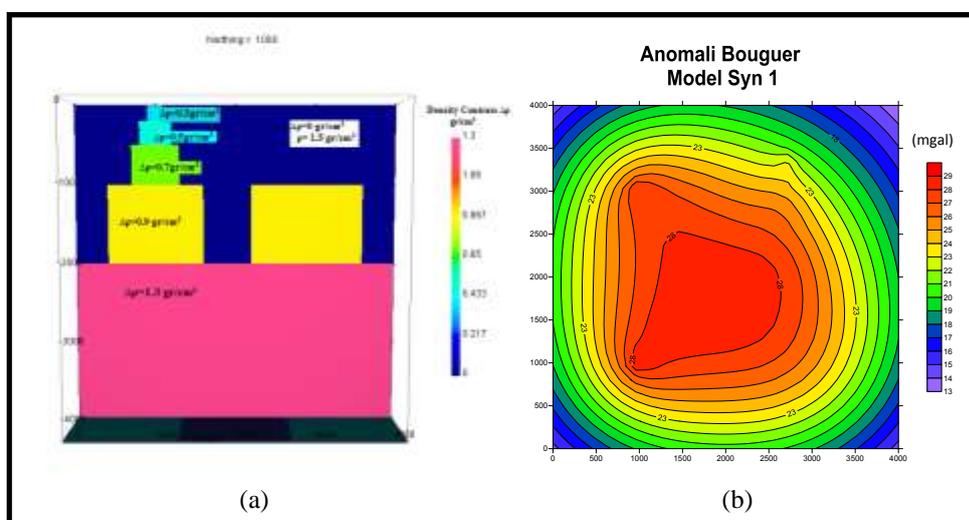
Pengujian metode-metode filtering diantaranya *Polynomial Trend Surface Analysis*, *Upward Continuation*, dan *Lowpass Filter* dilakukan terlebih dahulu dengan membuat model sintetik dan diperoleh data anomali Bouguer sintetik untuk diproses lebih lanjut. Dalam hal ini, model merupakan representasi keadaan geologi bawah permukaan oleh benda anomali dengan besaran fisis (densitas) dan geometri tertentu. Proses pemodelan ini diharapkan dapat menyederhanakan permasalahan pengujian metode filtering dan respon model (gravitasi) dapat di perkirakan dan dihitung.

Data anomali Bouguer sintetik merupakan data respon model tersebut dari hasil model sintetik, yang dalam hal ini diperoleh dengan bantuan Program *Grav3d-UBC*. Model yang dibuat merupakan model yang terdiri dari benda-benda penyebab anomali residual dikedalaman 0 – 2000 m dan benda penyebab anomali regional di kedalaman 2000 m – 4000 m.

5.1 1 Model Syn

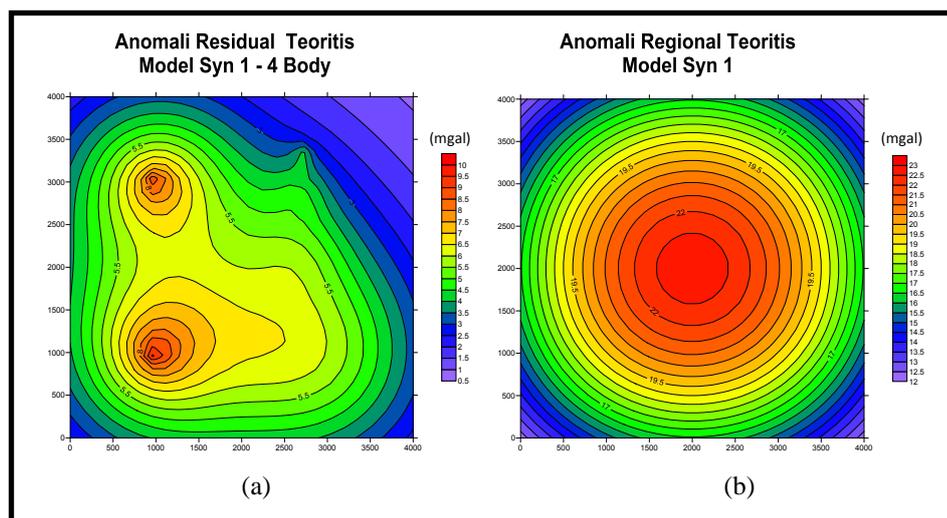
Penulis membuat dua model, model pertama adalah “model Syn” yang merupakan model ideal dengan beberapa benda anomali penyebab *closure-closure* pada kontur anomali Bouguer dan residual. Model tersebut dibuat dengan kontras densitas $\Delta\rho$ seperti pada Gambar 5.1. Benda-benda penyebab anomali residual

terdiri dari 13 bodi, yakni satu bodi berwarna biru dengan densitas $\rho=1.5\text{gr/cm}^3$, tiga bodi pertama berada pada kedalaman 0 – 200 m dengan kontras densitas $\Delta\rho=0.3\text{gr/cm}^3$ terhadap bodi berwarna biru, 3 bodi kedua pada kedalaman 300-500 m dengan kontras densitas $\Delta\rho=0.5\text{gr/cm}^3$, 3 bodi selanjutnya dengan kontras densitas $\Delta\rho=0.7\text{gr/cm}^3$ pada kedalaman 500m-1000m, dan 3 bodi berada pada kedalaman 1000 m – 2000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho=0.9\text{gr/cm}^3$ pada posisi yang berbeda-beda. Sedangkan benda penyebab anomali regional berada pada kedalaman 2000 m – 4000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho= 1.3\text{gr/cm}^3$. Setelah dilakukan proses *forward modelling* maka diperoleh data yang selanjutnya dapat kita sebut Anomali Bouguer sintetis, kontur anomali sintetis dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Model Syn (a) Penampang model sintetis. (b) kontur anomali Bouguer sintetis

Berdasarkan kontur anomali Bouguer pada Gambar 5.1. yang merupakan nilai gabungan antara anomali yang disebabkan oleh benda anomali dangkal atau residual dan anomali yang disebabkan benda anomali dalam atau regional. Penulis juga mencari kontur respon anomali regional teoritis dan anomali residual teoritis secara terpisah untuk membuktikan bahwa anomali Bouguer merupakan jumlah dari keduanya. Selain itu penentuan anomali regional teoritis dan anomali residual teoritis digunakan sebagai estimasi awal atau *control* dalam proses filtering yang akan di uji selanjutnya. Kontur tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3.

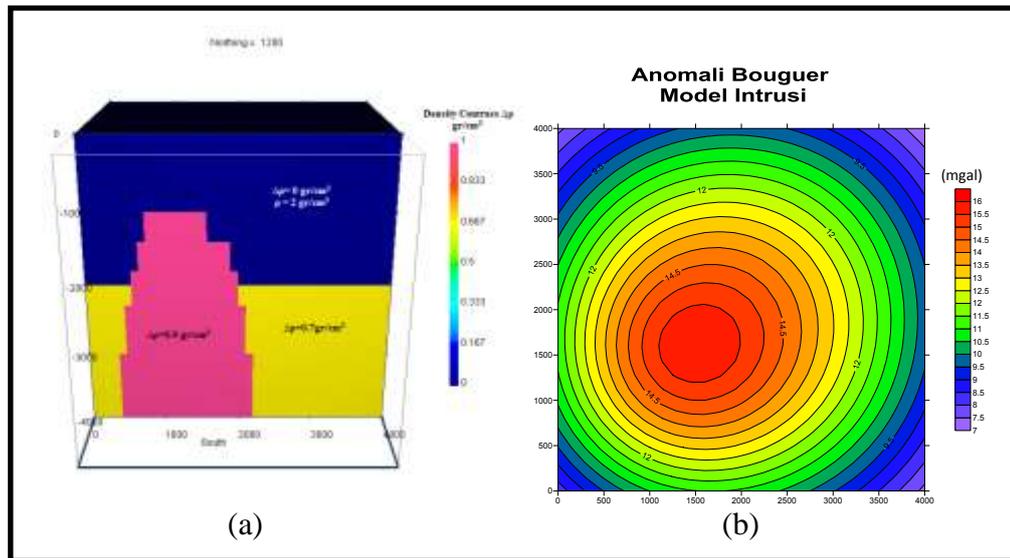


Gambar 5.2 (a) Kontur anomali residual teoritis dan (b) anomali regional teoritis.

5.1 1 Model Intrusi

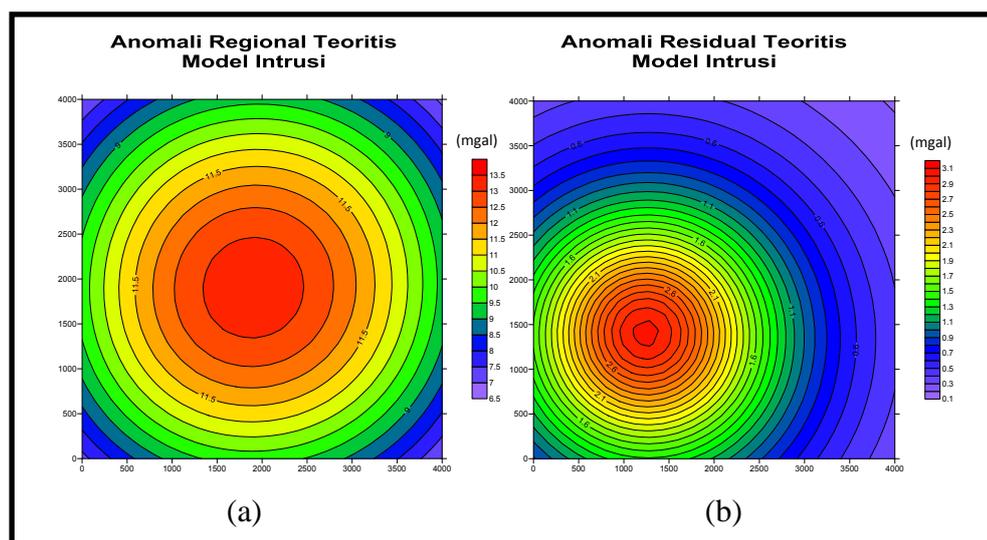
Model kedua yang dibuat adalah model intrusi yang merupakan model dengan pendekatan geologi. Untuk meminimalkan permasalahan ambiguitas, penulis membuat model dengan melakukan studi literatur guna mencari informasi mengenai kondisi geologi intrusi misalnya informasi densitas dari berbagai sumber, salah satunya menggunakan tabel densitas (Telfort et al., 2005) dan kedalaman benda anomali yang diperbolehkan secara geologi, namun dalam hal ini intrusi dianggap tidak mempunyai batasan kedalaman.

Model intrusi secara sederhana dibuat dengan 2 jenis bodi (lapisan) diantaranya lapisan sedimen, basement sediment dan batuan beku intrusi. Lapisan sedimen pada kedalaman 0 - 2000 m dibuat homogen untuk menyederhanakan pemodelan dengan rata-rata densitas $\rho=2.0 \text{ gr/cm}^3$. Bodi basement pada kedalaman 2000 m sampai dengan 4000 m dengan kontras densitas $\Delta\rho=0.7 \text{ gr/cm}^3$ atau $\rho=2.7\text{gr/cm}^3$ yang merupakan basement sediment, kemudian basement sediment diintrusi oleh batuan beku dengan kontras densitas lebih tinggi yakni $\Delta\rho=1 \text{ gr/cm}^3$. Proses intrusi menerus sampai kedalaman 1000 m. Model sintetik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut:



Gambar 5.3 (a) Model intrusi sintetik dan (b) kontur anomali Bouguer sintetik

Sama halnya dengan model Syn, penulis juga mencari anomali regional teoritis dan anomali residual teoritis yang nantinya akan digunakan sebagai salah satu kontrol anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses separasi dengan metode-metode yang diuji.



Gambar 5.4 (a) Kontur anomali regional teoritis dan (b) anomali residual teoritis.

5.2 Analisis Spektrum

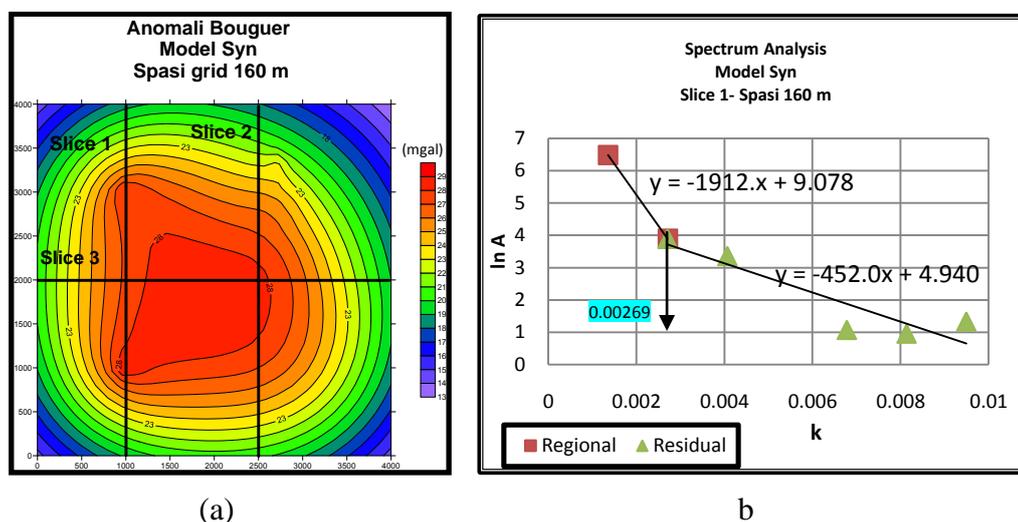
Proses analisis spektrum dilakukan dalam satu dimensi atau dalam suatu penampang *cross section* dari data anomali Bouguer. Penulis melakukan tiga *slice*

atau tiga lintasan yang kemudian akan dianalisis spektrum. Manfaat dari proses ini yakni mengetahui informasi mengenai estimasi kedalaman anomali baik anomali regional maupun residual dengan menggunakan persamaan $\ln A = (z_0 - z')|k|$ atau gradien dari hasil plot antara $\ln A$ dengan bilangan gelombang k yang menyatakan kedalaman anomali ($z_0 - z'$).

Untuk menentukan kedalaman bidang ketidakselarasan dapat menggunakan program Numeri untuk proses transformasi Fourier dan Microsoft Excel untuk proses plot $\ln A$ vs k .

5.2.1 Analisis spektrum model Syn

Proses Analisis spektrum pada model Syn dilakukan dengan membuat tiga lintasan diantaranya slice1, slice2 dan slice 3. Gambar 5.5 (b) sebagai contoh kurva analisis spektrum yang digunakan dalam studi kali ini untuk model Syn pada lintasan 1.



Gambar 5.5 Proses analisis spektrum (a) Kontur anomali Bouguer dan lokasi 3 lintasan yang digunakan dalam analisis spektrum. (b) Plot spektrum amplitud $\ln A$ terhadap bilangan gelombang k untuk menentukan estimasi kedalaman sumber anomali.

Dari proses analisis spektrum pada lintasan 1 (slice 1) untuk besar spasi grid 160 m, diperoleh estimasi kedalaman bidang batas anomali regional pada kedalaman -1912 m dan -452.0 m untuk kedalaman estimasi anomali residual. Untuk lintasan ke 2 dan ke 3 berturut-turut, diperoleh estimasi kedalaman anomali

regional pada kedalaman -1831 m dan -1867 m, sedangkan anomali residualnya pada kedalaman -371.0 m dan -420.9 m.

Secara rekapitulasi, hasil proses analisis spektrum untuk model Syn dapat dilihat dalam Tabel 5.1 berikut ini:

Tabel 5.1 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum untuk model Syn

Lintasan	Estimasi Kedalaman Regional	Estimasi Kedalaman Residual
1	-1912 m	-452.0 m
2	-1831 m	-371.0 m
3	-1867 m	- 420.9 m
Rata-rata	-1870 m	-369.8 m

Dari estimasi kedalaman anomali regional yang diperoleh, rata-rata kedalaman sekitar 1870 m, kedalaman ini walaupun mempunyai selisih sebesar 130 m dari kedalaman anomali yang diasumsikan yakni 2000 m, dapat dikategorikan mendekati kedalaman asumsi pada model. Dapat dilihat pada lintasan 1 bahwa kedalaman anomali regional diestimasi sebesar 1912 m mempunyai selisih sebesar 88 m atau 4.4 % dari kedalaman anomali regional asumsi yakni 2000 m pada model. Untuk itu proses analisis spektrum merupakan salah satu metode yang baik yang dapat digunakan dalam mengestimasi kedalaman anomali baik anomali regional maupun anomali residual.

Perlu diingat bahwa pada proses analisis spektrum, spasi grid atau *sampling rate* merupakan hal penting dalam penentuan estimasi kedalaman anomali. Oleh karena itu, penulis juga mencoba melakukan variasi grid pada salah satu lintasan dan melihat efeknya terhadap estimasi kedalaman anomali yang dihasilkan. Lintasan pertama dari model Syn dipilih untuk kemudian dilakukan proses analisis spektrum dengan memvariasikan spasi grid yakni 160 m, 80 m, dan 320 m.

Estimasi kedalaman anomali regional dan residual yang dihasilkan pada lintasan 1 dengan spasi grid 160 m yaitu pada kedalaman -1912 m dan -317.5 m, selanjutnya untuk analisis spektrum dengan spasi grid 80 m menghasilkan estimasi kedalaman -956.2 m dan -158.7 m, sedangkan untuk lintasan 1 dengan spasi grid 320 m yakni pada kedalaman -3825 m dan -635.1 m.

Tabel 5.2 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum dengan memvariasikan spasi grid untuk lintasan 1

No	Spasi Grid	Estimasi Kedalaman Regional	Estimasi Kedalaman Residual
1	160 m	-1912 m	-317.5 m
2	80 m	-956.2 m	-158.7 m
3	320 m	-3825 m	-635.1 m

Dari hasil memvariasikan grid dapat disimpulkan bahwa grid yang digunakan dapat mempengaruhi besar estimasi kedalaman anomali baik kedalaman anomali regional maupun residual. Besar grid atau sampling rate dapat mempengaruhi panjang gelombang yang dihasilkan dari proses transformasi Fourier yang nilainya sebanding. Sehingga ketika spasi dinaikkan menjadi dua kali lipat (320 m) dari spasi grid lapangan (160 m), maka estimasi kedalaman anomali yang dihasilkan juga dua kali lipatnya, begitu pula sebaliknya. Untuk itu dalam proses analisis spektrum, spasi grid yang digunakan sebaiknya disamakan dengan spasi grid pengukuran di lapangan untuk menghindari kesalahan dalam proses estimasi kedalaman anomali.

5.2.1 Analisis spektrum model Intrusi

Proses analisis spektrum yang dilakukan untuk model Intrusi dilakukan dengan membuat 2 lintasan yang saling memotong. Penentuan kedalaman estimasi anomali regional dan residual model Intrusi mempunyai tahap-tahap yang sama dengan tahap yang dilakukan pada model Syn. Secara singkat, hasil proses analisis spektrum dari model Intrusi dapat ditampilkan pada Tabel 5.3. Dari hasil analisis spektrum diketahui kedalaman estimasi regional untuk lintasan 1 berada pada kedalaman -1791 m dan untuk lintasan 2 berada pada kedalaman -1820 m, dengan rata-rata kedalaman estimasi anomali regional sebesar 1805.5 m yang mempunyai selisih $\pm 10\%$ dari kedalaman regional asumsi pada model.

Tabel 5.3 Estimasi kedalaman sumber anomali hasil analisis spektrum untuk model Intrusi

Lintasan	Estimasi kedalaman regional	Estimasi kedalaman residual
1	-1791 m	-478.3 m
2	-1820 m	-471.9 m
Rata-rata	-1805.5 m	-475.1 m

Selain dapat menentukan estimasi kedalaman bidang batas diskontinuitas anomali regional dan residual, proses analisis spektrum juga digunakan untuk mencari bilangan gelombang potong (*cutoff wavenumber k*) yang berasosiasi dengan panjang gelombang potong dan nilai ini akan digunakan dalam proses pemisahan anomali regional-residual di tahap selanjutnya. Program **Surfer 9.0** yang digunakan penulis untuk melakukan filtering tidak menggunakan bilangan gelombang potong k_{cutoff} dalam pemisahan anomali melainkan menggunakan lebar jendela N yang nilainya tetap berasosiasi dengan k_{cutoff} tersebut. Untuk memperoleh nilai k_{cutoff} dapat dilakukan secara manual dengan bantuan *Microsoft Excel* dari proses analisis spektrum seperti pada Gambar 5.3 (b). Sedangkan untuk mengetahui lebar jendela N dari bilangan gelombang *cutoff* dapat menggunakan rumus:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k_{cutoff}} \rightarrow N = \frac{\lambda}{\Delta x} \quad \dots(5.1)$$

Nilai k_{cutoff} dan lebar jendela N untuk model Syn dan model Intrusi secara singkat dapat dijabarkan pada Tabel 5.4 dan 5.5 berikut ini:

Tabel 5.4 Bilangan gelombang potong (k_{cutoff}) menggunakan analisis spektrum

No	Lintasan	k Cutoff (m^{-1})	Lebar Jendela N
1	Lintasan 1	0.00269	14.59
2	Lintasan 2	0.00272	14.43
3	Lintasan 3	0.00271	14.48
			14.51 → 15

Tabel 5.5 Bilangan gelombang potong (k_{cutoff}) menggunakan analisis spektrum

No	Lintasan	k Cutoff (m^{-1})	Lebar Jendela N
1	Lintasan 1	0.00270	14.54
2	Lintasan 2	0.00268	14.65
			14.60 → 15

Berdasarkan perhitungan sesuai dengan persamaan 5.1 yang kemudian dirangkum pada Tabel 5.3 untuk model Syn dan Tabel 5.4 untuk model Intrusi, dapat dilihat bahwa rata-rata bilangan gelombang k_{cutoff} berkisar antara 0.00269-0.00272. Nilai lebar jendela yang diperoleh dari hasil perhitungan k_{cutoff} yakni mempunyai rata-rata 14.51 dan 14.60 sehingga dapat dibulatkan menjadi 15 untuk

kedua model tersebut. Proses pemilihan lebar jendela yakni bernilai 15 ini akan digunakan pada saat proses pemisahan anomali regional-residual dengan metode *lowpass filter*.

5.3 Pemisahan Anomali Regional-Residual dengan Metode Polynomial TSA

Proses pemisahan anomali regional dan residual pada umumnya dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis*. Proses pemisahan anomali dilakukan dengan menggunakan pendekatan persamaan polinomial orde- n misalnya orde 2 (fungsi kuadrat) maupun orde 3 (fungsi kubik). Dari proses ini akan diketahui konstanta-konstanta persamaan polinomial yang ketika dihitung sesuai persamaan polinomial yang digunakan, nilai tersebut mendekati nilai anomali Bouguer. Proses pengujian metode pendekatan persamaan polinomial dalam metode TSA ini dilakukan dengan memvariasikan orde polinomial, diantaranya polinomial orde-1 (linear), orde 2 (kuadrat), sampai dengan orde 5.

Seperti yang kita ketahui bahwa walaupun anomali Bouguer mengandung komponen regional yang dominan, tetapi unsur lokal (residual) tetap ada. Oleh karena itu, pada kurva anomali Bouguer terdapat undulasi, dan penyebab undulasi tersebut adalah komponen residual. Data anomali Bouguer inilah yang kemudian didekati dengan persamaan *polynomial* berorde- n , dimana proses pendekatan ini menghasilkan anomali regional (*TSA*). Dengan mengurangkan hasil polinomial ini terhadap anomali Bouguer, maka akan diperoleh anomali residual.

Pendekatan anomali regional dengan menggunakan persamaan orde 1 secara matematis linear karena berpangkat 1 dan suku persamaan yang sedikit. Persamaan *polynomial* orde 1 yang bersifat linear ini secara matematis cukup sulit untuk mendekati anomali Bouguer yang kurvanya berundulasi. Anomali Bouguer menggambarkan anomali regional namun berundulasi karena terdapat pengaruh residual, artinya anomali Bouguer secara fisis tidak homogen atau dengan kata lain heterogen. Keheterogenan itulah yang kemudian menyebabkan kurva anomali Bouguer berundulasi. *Polynomial* orde 1 yang mempunyai pangkat 1 (linear) yang telah dijelaskan diatas secara fisis bersifat homogen. Sehingga secara fisis pun,

anomali Bouguer yang didekati dengan persamaan polynomial orde 1 tidak representatif.

Berbeda dengan polinomial orde 2 yang secara matematis berpangkat dua dan memiliki suku yang cukup banyak sehingga dapat pula diaplikasikan untuk proses pendekatan anomali Bouguer yang juga berundulasi. Begitu juga secara fisis, persamaan polynomial orde 2 ini memiliki suku yang banyak (6 suku) dan berpangkat 2 menandakan persamaan tersebut dapat bersifat lebih heterogen sehingga proses pendekatan anomali Bouguer yang juga heterogen dapat diaplikasikan. Semakin besar orde dari persamaan polinomial yang dipakai, secara matematis semakin besar pangkat persamaan dan suku yang digunakan semakin banyak. Oleh karena itu secara fisis pun semakin besar orde persamaan polinomial maka regional yang diperoleh dari hasil pendekatan metode TSA semakin heterogen.

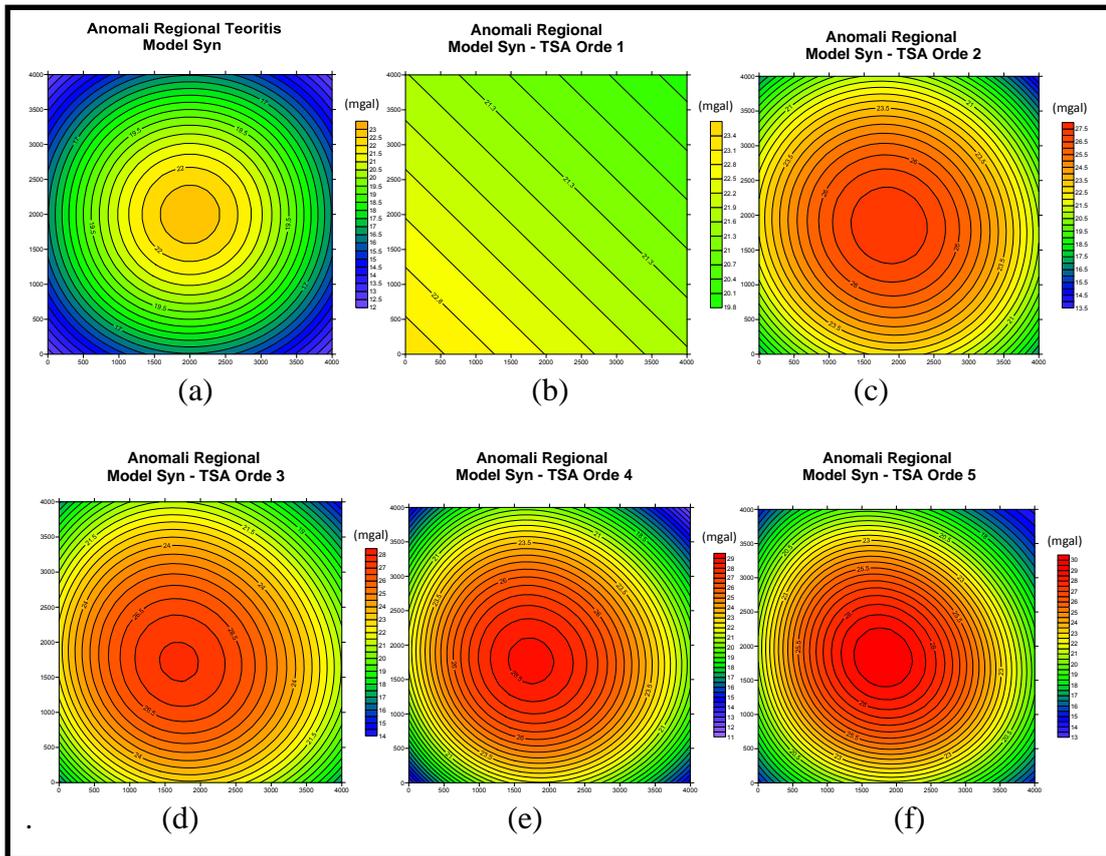
Analisis diatas dari sudut pandang matematis dan fisis kemudian dihubungkan dengan logika geologi. Karakteristik batuan dibawah permukaan secara geologi semakin kedalam semakin homogen atau semakin kepermukaan semakin heterogen. Jika dikaitkan dengan persamaan polinomial yang digunakan bahwa secara matematis semakin besar orde polinomial maka suku dan pangkat dari persamaan tersebut semakin banyak dan secara fisis berarti semakin heterogen, dengan demikian dapat disimpulkan semakin besar orde persamaan polinomial yang digunakan maka anomali regional yang diperoleh akan semakin dangkal secara geologi.

Polinomial TSA untuk pemisahan anomali regional dan residual dilakukan dengan menggunakan data anomali Bouguer sintetik untuk model Syn dan model Intrusi. Berikut ini akan dijabarkan hasil dan analisis dari proses pemisahan anomali menggunakan kedua model tersebut.

5.3.1 Pengujian Polynomial TSA menggunakan model Syn

Gambar 5.4 merupakan kontur anomali regional baik anomali regional teortis dan anomali regional dari hasil proses *Polynomial Trend Surface Analysis*

model Syn, kontur tersebut mempunyai skala warna yang sama (29 mgal - 11 mgal) dengan interval kontur sebesar 0.5 mgal.



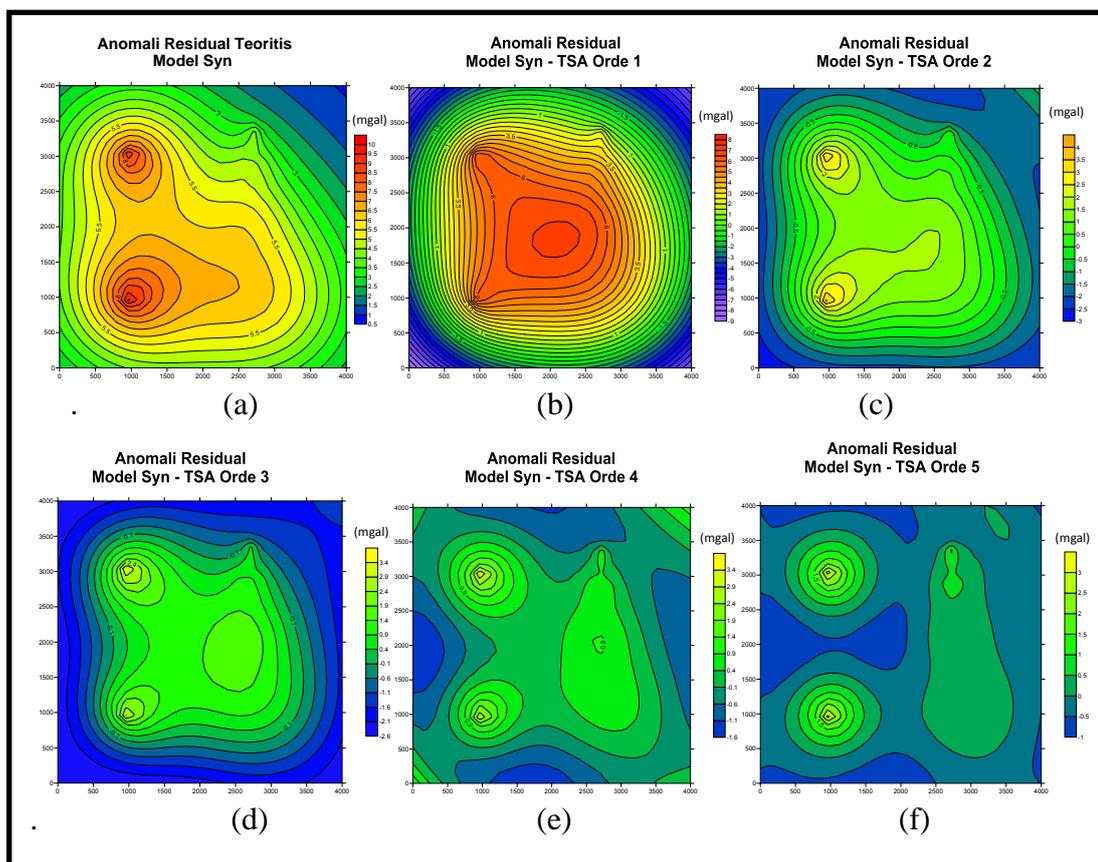
Gambar 5.6 Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis*. (a) Anomali regional teoritis (b) Anomali regional TSA orde 1. (c) Anomali regional TSA orde 2. (d) Anomali regional TSA orde 3. (e) Anomali regional TSA orde 4. (f) Anomali regional TSA orde 5.

Dapat dilihat dari anomali regional yang dihasilkan dari proses TSA, untuk polinomial orde 1 anomali regional yang dihasilkan tidak representatif. Kurva anomali regional yang dihasilkan tidak sesuai dengan anomali regional secara teoritis. Anomali regional yang dihasilkan diharapkan berupa *closure* (bulatan) ditengah. Pendekatan persamaan polinomial orde 1 secara matematis linear yang dalam hal ini tidak dapat merepresentasikan anomali anomali Bouguer yang kurvanya berundulasi seperti dijelaskan sebelumnya. Anomali regional dengan pendekatan persamaan polinomial orde ke-2 yang diperoleh secara kontur dapat dikatakan mendekati anomali regional yang diharapkan.

Berdasarkan nilai gravitasinya, anomali regional hasil TSA mempunyai nilai gravitasi tertinggi sebesar 27.5 mgal, hal ini lebih besar 4.5 mgal

dibandingkan dengan anomali regional teoritis yang mempunyai nilai gravitasi tertinggi sebesar 23mgal. Secara fisis hal ini menunjukkan bahwa anomali regional hasil TSA orde 2 masih mengandung pengaruh anomali residual.

Selanjutnya untuk anomali regional yang dihasilkan dari *Polynomial TSA* orde 3 (d), orde 4 (e), dan orde 5(f), menunjukkan bahwa semakin besar orde polinomial maka anomali regional yang dihasilkan nilainya semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa masih terdapat pengaruh residual didalam anomali regional yang dihasilkan. Jika dilihat dari bentuk konturnya, terlihat tidak bulat sempurna dikarenakan juga terdapat pengaruh anomali residual pada data anomali regionalnya.



Gambar 5.7 Anomali residual hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Polynomial TSA* (a) anomali residual teoritis. (b) Anomali residual TSA orde 1. (c) anomali residual TSA orde 2. (d) anomali residual TSA orde 3. (e) anomali residual TSA orde 4. (f) anomali residual TSA orde 5.

Gambar 5.7 menunjukkan anomali residual teoritis (a) yang digunakan sebagai kontrol pemisahan anomali regional-residual dan anomali residual yang

diperoleh dari hasil proses *Polynomial TSA* untuk variasi orde diantaranya orde 1 (b), orde 2 (c), orde 3 (d), orde 4 (e) dan orde 5 (f). Anomali residual ini didapat dari proses pengurangan anomali Bouguer sintetis dengan anomali regional yang dihasilkan dari proses *Polynomial TSA* seperti pada Gambar 5.4. Dapat kita lihat dari kontur anomali residual orde 1 (b) bahwa terlihat peta anomali residual hampir sama dengan peta anomali Bouguer. Pada kontur ini efek regional masih dominan sehingga dapat dikatakan *polynomial orde 1* pada kasus ini tidak representatif dan didukung juga dengan anomali regional orde 1 yang juga dapat dikatakan tidak representatif.

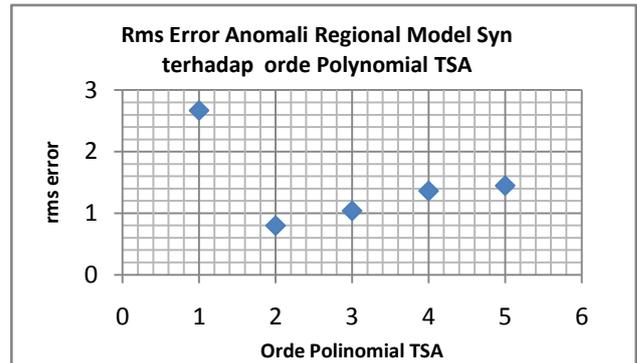
Berbeda dengan kontur anomali residual orde 2 (c), secara nilai, anomali residual orde 2 mempunyai nilai anomali yang lebih rendah dibandingkan anomali residual teoritis dan secara kontur kedua kontur dapat dikatakan mirip. Nilai anomali residual yang rendah ini dipengaruhi oleh anomali regional yang dihasilkan dari proses separasi yang harganya lebih tinggi dari anomali regional teoritis, sehingga ketika dikurangkan dengan anomali bouguer sintetis anomali residual orde 2 mempunyai nilai yang lebih kecil daripada anomali residual teoritis. Untuk anomali residual orde 3(d), orde 4(e) dan orde 5(f), terlihat anomali residual mulai eksklusif, artinya makin besar orde maka benda anomali makin terlihat terpisah dan value atau nilainya semakin rendah, hal ini menguatkan hipotesis bahwa semakin besar orde maka pengaruh regional semakin kecil atau semakin dangkal.

Permasalahan berikutnya adalah pada orde berapakah yang paling optimum untuk menghasilkan anomali regional dan residual yang paling representatif. Pemilihan orde yang paling optimum dalam kasus ini dapat dilakukan dengan menganalisis rms error dari anomali regional ataupun anomali residual yang dihasilkan terhadap anomali regional teoritis atau anomali residual teoritis. Kemudian rms error ini dibandingkan terhadap error yang dihasilkan untuk masing-masing orde.

Perhitungan *rms error* berdasarkan Sherrif (2001), rms error merupakan akar kuadrat dari rata-rata kuadrat dari selisih pengukuran m dengan rata-rata pengukuran m tersebut. Secara matematis *rms error* atau disebut juga deviasi minimum dapat dirumuskan sebagai berikut:

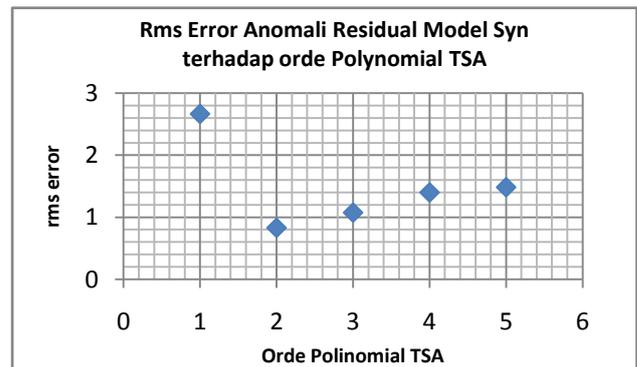
$$\delta = \left[\frac{1}{n} \sum (m_i - \bar{m})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

orde polinomial TSA	rms error anomali regional (mgal)
orde 1	2.670
orde 2	0.706
orde 3	1.038
orde 4	1.361
orde 5	1.447



Gambar 5.8 Plot rms error anomali regional terhadap orde polynomial TSA

orde polinomial TSA	rms error anomali residual (mgal)
orde 1	2.666
orde 2	0.751
orde 3	1.076
orde 4	1.401
orde 5	1.485

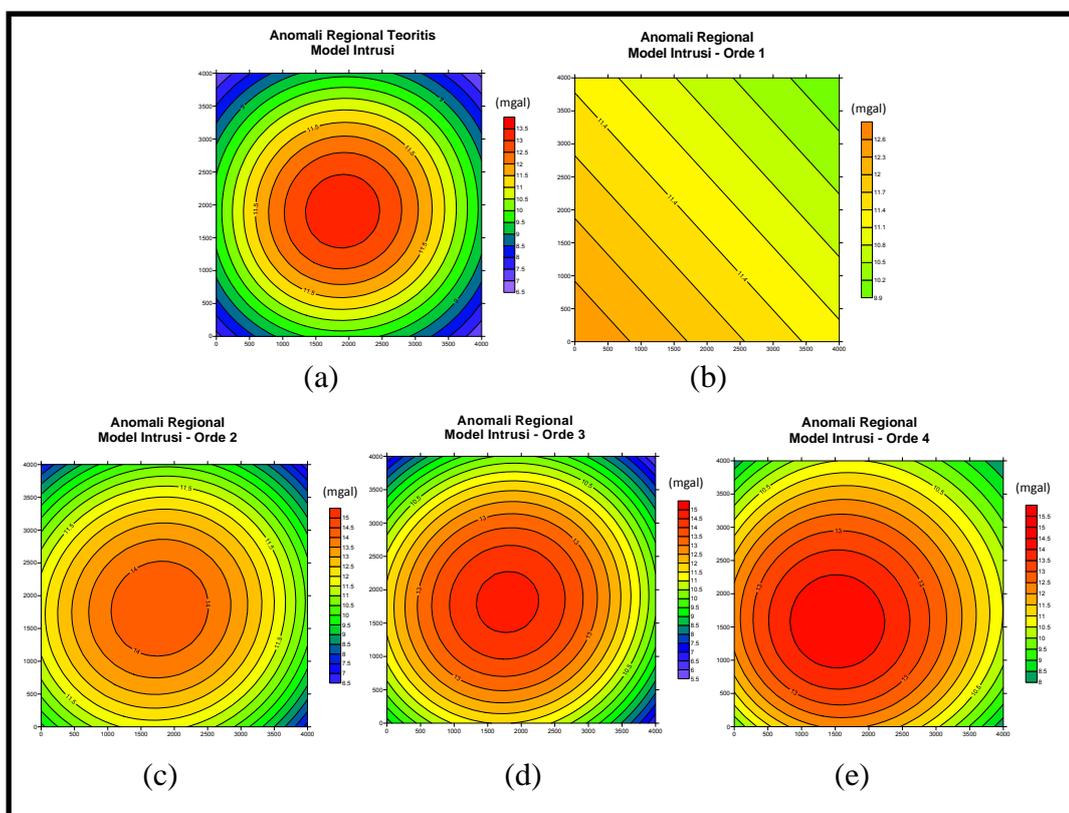


Gambar 5.9 Plot rms error anomali residual terhadap orde polynomial TSA

Berdasarkan nilai rms error anomali regional dan anomali residual yang dihitung terhadap anomali regional teoritis dan anomali residual teoritis, diperoleh bahwa nilai rms error terkecil adalah anomali regional dan residual yang dihasilkan oleh Polynomial TSA orde 2. Secara kontur juga dapat dilihat bahwa anomali regional dan residual pada orde 2 mempunyai kemiripan dengan anomali regional dan residual teoritis. Hal ini dapat disimpulkan bahwa anomali regional dan residual pada orde 2 lebih mendekati estimasi anomali regional dan residual teoritis. Secara garis besar persamaan orde 2 merupakan pilihan yang paling efektif, namun jika kita ingin melihat benda-benda anomali yang lebih dangkal, menaikkan orde polynomial merupakan pilihan yang dapat dilakukan.

5.3.2 Pengujian Polynomial TSA menggunakan model Intrusi

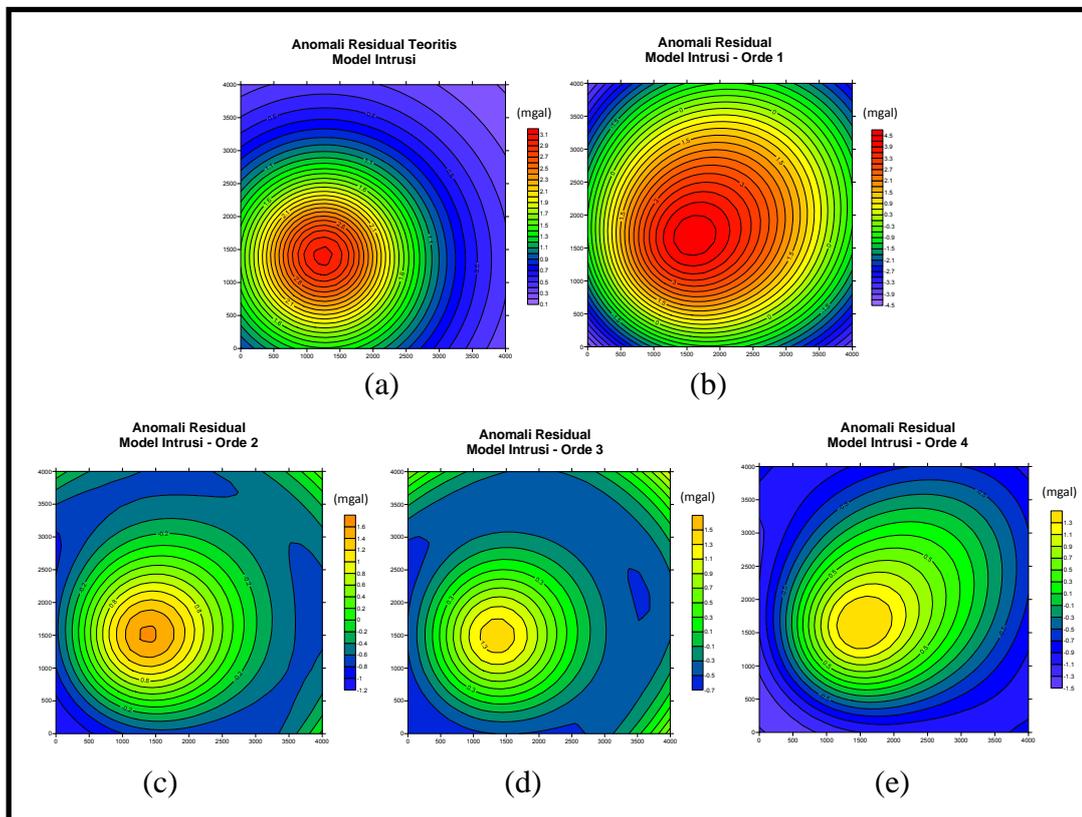
Proses Polynomial ini juga diuji menggunakan pemodelan Intrusi, dimana juga dilakukan dengan orde yang bervariasi mulai dari orde 1 sampai dengan orde ke 4. Anomali regional dan residual hasil pengujian metode ini dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis*. (a) Anomali regional teoritis (b) Anomali regional TSA orde 1. (c) Anomali regional TSA orde 2. (d) Anomali regional TSA orde 3. (e) Anomali regional TSA orde 4.

Dari hasil pengujian menggunakan model intrusi, seperti pada penjelasan sebelumnya dapat dilihat bahwa penggunaan *Polynomial TSA* orde 1 tidak dapat merepresentasikan anomali regional maupun residual dikarenakan pendekatan dilakukan secara linear dan suku orde yang sedikit sehingga data anomali Bouguer sulit didekati. Untuk persamaan polinomial orde ke 2, dapat dilihat bahwa anomali regional yang dihasilkan sudah mendekati anomali regional teoritis yang diharapkan, yakni berupa *closure* ditengah. Dengan bertambahnya orde polinomial, maka anomali regional yang dihasilkan semakin dangkal atau

dipengaruhi benda-benda residual, sehingga kontur yang berupa *closure* bergerak kearah kiri bawah. Begitu juga dengan nilai anomali regional yang dihasilkan, semakin besar orde maka nilainya semakin besar.

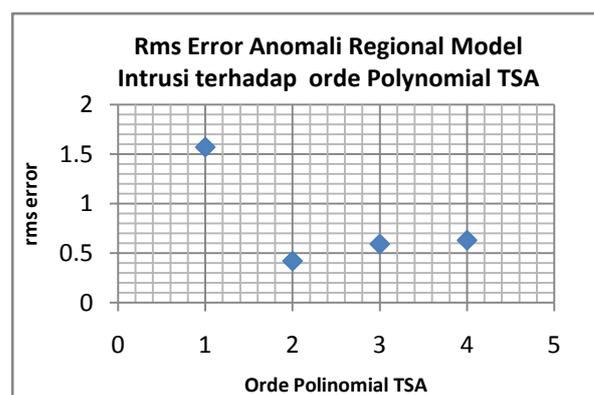


Gambar 5.11 Anomali residual hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Polynomial Trend Surface Analysis*. (a) Anomali residual teoritis (b) Anomali residual TSA orde 1. (c) Anomali residual TSA orde 2. (d) Anomali residual TSA orde 3. (e) Anomali residual TSA orde 4

Untuk anomali residual model intrusi yang dihasilkan dari metode ini, dapat dilihat pada Gambar 5.11, pada orde 1 anomali residual yang dihasilkan tidak dapat merepresentasikan anomali residual sesungguhnya karena pengaruh regional masih dominan. Anomali residual yang dihasilkan oleh polynomial TSA orde 2 dapat dikatakan representatif, selain dikarenakan kontur anomali yang mirip dengan anomali residual teoritis, anomali regional pada orde 2 juga cukup representatif sehingga hasil pengurangannya dengan anomali Bouguer menghasilkan anomali residual yang baik. Untuk anomali residual orde ke 3, masih cukup representatif namun lebih dangkal. Berbeda dengan anomali residual yang dihasilkan dari orde 4 melebar ke arah kanan atas.

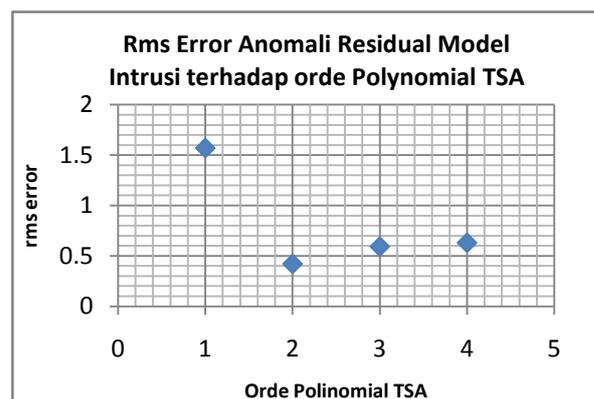
Seperti halnya pengujian metode *Polynomial TSA* menggunakan model Syn, penulis juga mencoba melihat rms error yang dihasilkan oleh anomali regional terhadap regional teoritis dari model intrusi pada orde yang bervariasi. Dari tabel dan grafik pada Gambar 5.12 dan 5.13, menunjukkan bahwa anomali regional dan residual yang mempunyai rms error terkecil terhadap anomali regional teoritis yakni menggunakan persamaan polinomial orde 2, begitu juga dengan anomali residualnya. Hal ini hampir sama dengan yang dihasilkan dalam pengujian menggunakan model Syn.

orde polinomial TSA	rms error anomali regional
orde 1	1.570
orde 2	0.410
orde 3	0.593
orde 4	0.641



Gambar 5.12 Plot rms error anomali regional terhadap orde polinomial TSA untuk model intrusi

orde polinomial TSA	rms error anomali residual
orde 1	1.570
orde 2	0.410
orde 3	0.592
orde 4	0.641



Gambar 5.13 Plot rms error anomali residual terhadap orde polinomial TSA untuk model intrusi

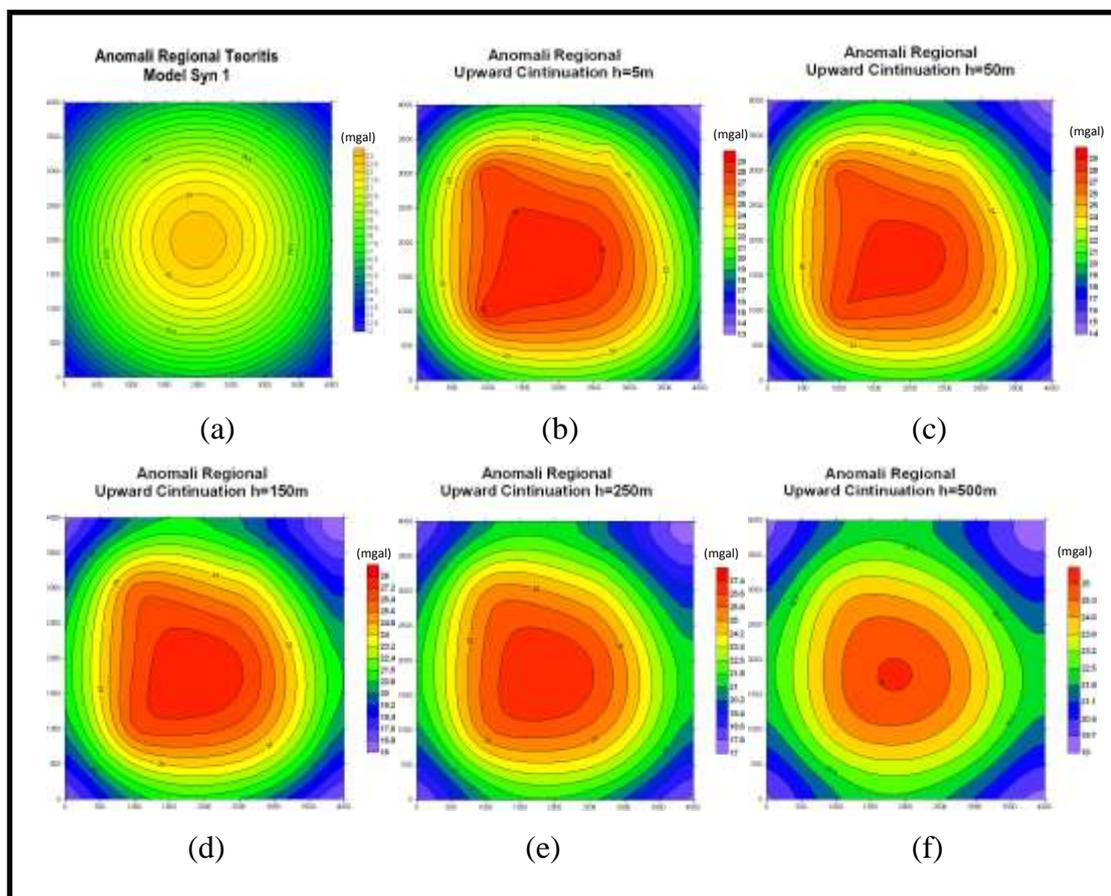
5.4 Metode Upward Continuation

Proses kontinuitas keatas atau *Upward Continuation* pada prinsipnya menaikkan bidang pengukuran keatas pada ketinggian tertentu untuk melihat tren anomali regional dari data anomali Bouguer. Metode ini hanya mendominasi

efek anomali regional dari data anomali Bouguer bukan membuang efek anomali residual, sehingga berapapun ketinggian yang di variasikan, pengaruh anomali residual pada data anomali regional akan tetap ada.

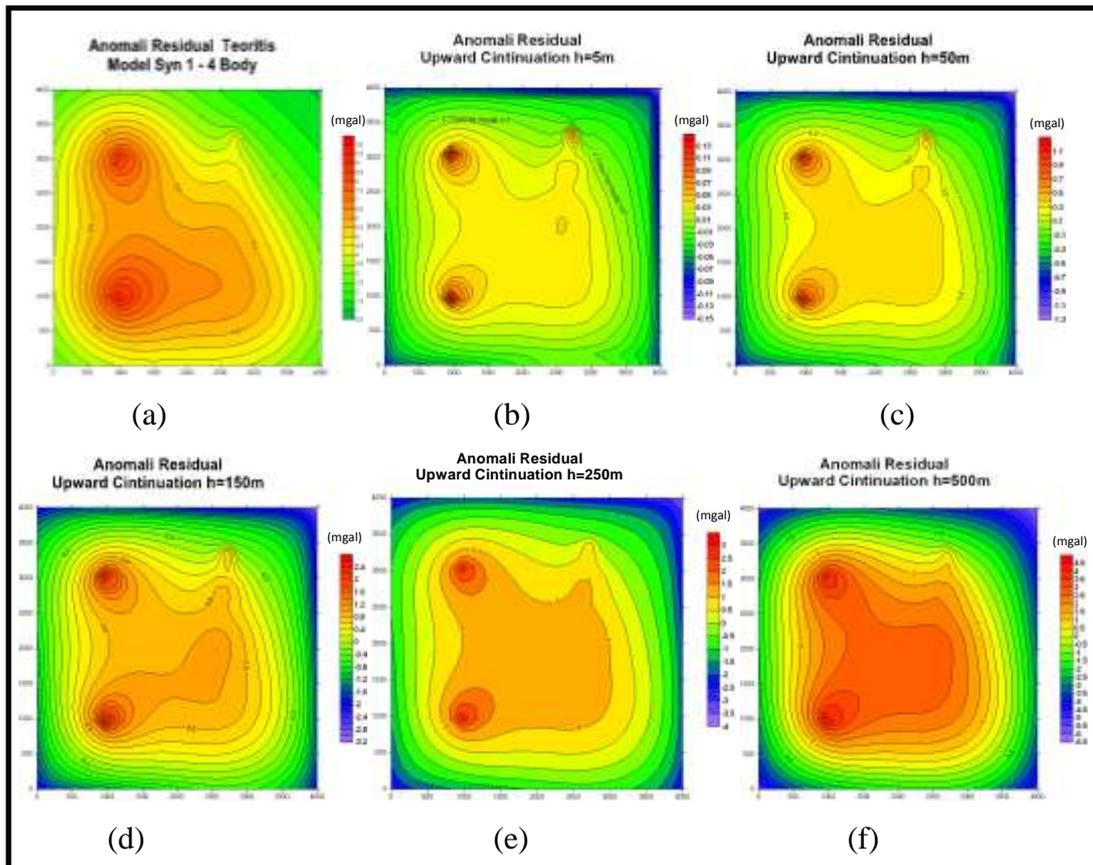
5.4.1 Pengujian Metode *Upward Continuation* menggunakan model Syn

Berikut ini hasil kontinuitas keatas dengan beberapa variasi ketinggian yang dapat kita analisis:



Gambar 5.14 Anomali regional hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Upward Continuation*. (a) Anomali regional teoritis (b) Anomali regional *upward* h=5m. (c) Anomali regional *upward* h=50m. (d) Anomali regional *upward* h=150m. (e) Anomali regional *upward* h=250m (f) Anomali regional *upward* h=500m

Secara kontur, anomali regional dapat dilihat trennya dengan menambah ketinggian bidang kontinuitas h dalam proses *upward continuation*, dimana semakin besar ketinggian bidang kontinuitas maka anomali regional akan semakin dominan.



Gambar 5.15 Anomali residual hasil pemisahan anomali menggunakan metode Upward Continuation . (a) Anomali Residual Teoritis (b) Anomali residual upward $h=5\text{m}$. (c) Anomali residual *upward* $h=50\text{m}$. (d) Anomali residual *upward* $h=150\text{m}$. (e) Anomali residual *upward* $h=250\text{m}$ (f) Anomali residual *upward* $h=500\text{m}$

Jika dilihat dari anomali regional yang dihasilkan dalam proses kontinuitas, semakin besar ketinggian bidang kontinuitas h , maka anomali regional yang dihasilkan semakin dominan dari data anomali Bouguer. Namun demikian semakin tinggi bidang kontinuitas h , anomali residualnya juga terpengaruh oleh anomali regional yang dominan sehingga kontur anomali residual yang dihasilkan tidak cukup merepresentasikan benda anomali residual yang sebenarnya. Pada umumnya proses kontinuitas keatas ini memang sangat jarang digunakan dalam proses pemisahan anomali regional dan residual, dikarenakan metode ini hanya mendominankan efek regional dari data anomali Bouguer untuk melihat tren anomali regionalnya, bukan membuang efek residual dari anomali Bouguernya. Karena itulah berapapun besar ketinggian bidang kontinuitas h , anomali regionalnya masih dipengaruhi anomali residual dan sebaliknya.

Namun begitu, dari metode *Upward Continuation*, hal yang cukup penting untuk diketahui adalah berapakah ketinggian h yang paling baik untuk memperoleh anomali regional yang paling optimum dikarenakan cukup sulit untuk menganalisis dengan hanya melihat dari kontur anomali regional yang dihasilkan. Oleh karena itu, penulis mencoba mencari nilai anomali regional yang paling optimum secara matematis. Artinya, penulis membandingkan nilai anomali regional yang dihasilkan menggunakan metode *Upward Continuation* dengan anomali regional teoritis dan menghitung besar penyimpangan atau rms errornya. Anomali regional yang mempunyai rms error terkecil adalah yang merupakan anomali regional dengan ketinggian h optimum. Perhitungan *rms error* berdasarkan (Sherrif, 2001) dapat dirumuskan sebagai berikut:

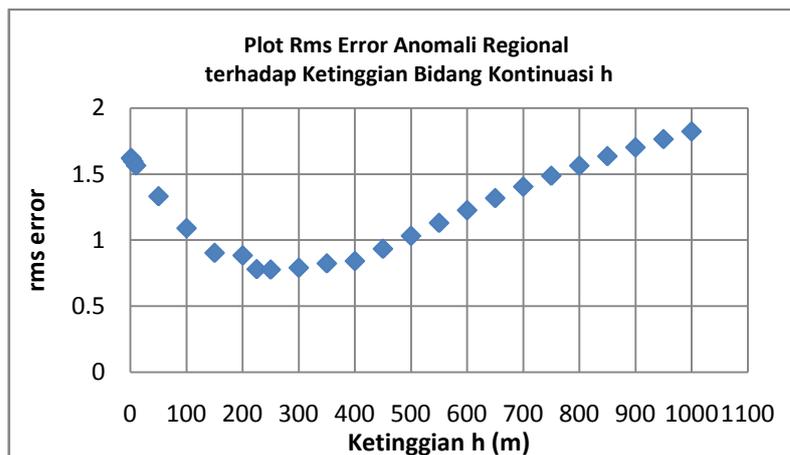
$$\delta = \left[\frac{1}{n} \sum (m_i - \bar{m})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Berikut ini tabel yang memuat informasi mengenai error rms yang dicari dari anomali regional hasil kontinuitas dengan anomali regional teoritis terhadap variasi ketinggian bidang kontinuitas keatas h :

Tabel . 5.6 Besar error rms anomali regional terhadap ketinggian bidang kontinuitas

Ketinggian h bidang kontinuitas	error rms	Ketinggian h bidang kontinuitas	error rms
1	1.621	450	0.933
2	1.614	500	1.031
5	1.595	550	1.129
10	1.563	600	1.225
50	1.331	650	1.317
100	1.089	700	1.404
150	0.902	750	1.485
200	0.882	800	1.562
225	0.828	850	1.634
250	0.785	900	1.701
300	0.799	950	1.763
350	0.822	1000	1.822
400	0.840		

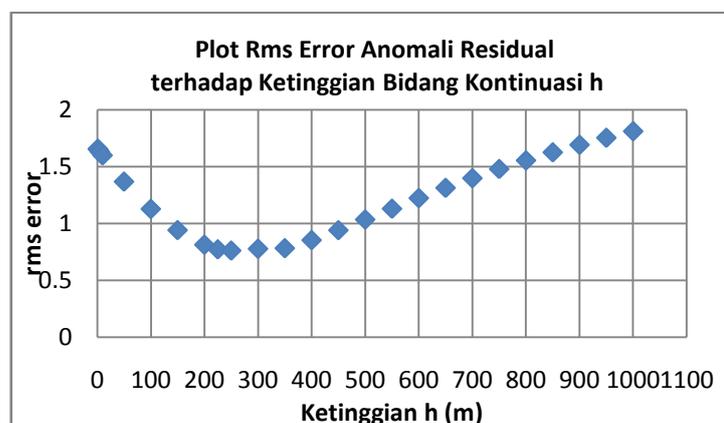
Jika data pada Tabel 5.6 diatas diplot dalam sebuah grafik, maka dapat dilihat bahwa anomali regional yang mempunyai nilai deviasi minimum atau error rms terkecil adalah pada ketinggian 250 m.



Gambar 5.16 Plot standar rms error anomali regional terhadap ketinggian bidang kontinuasi h

Tabel . 5.7 Besar error rms anomali residual terhadap ketinggian bidang kontinuasi

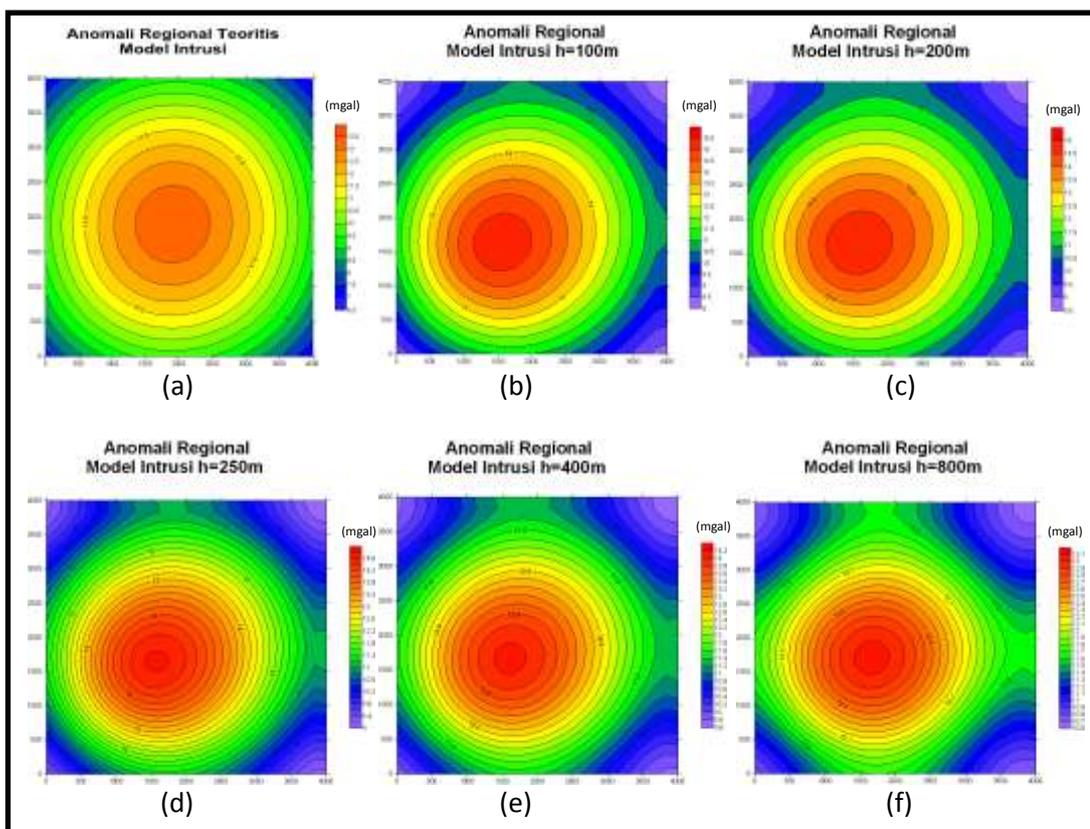
Ketinggian h bidang kontinuasi	error rms anomali residual	Ketinggian h bidang kontinuasi	error rms anomali residual
1	1.656	450	0.940
2	1.649	500	1.034
5	1.630	550	1.129
10	1.598	600	1.223
50	1.368	650	1.312
100	1.127	700	1.398
150	0.940	750	1.478
200	0.812	800	1.554
225	0.772	850	1.625
250	0.768	900	1.691
300	0.776	950	1.753
400	0.852	1000	1.811



Gambar 5.17 Plot rms error terhadap ketinggian bidang kontinuasi h dari data anomali residual

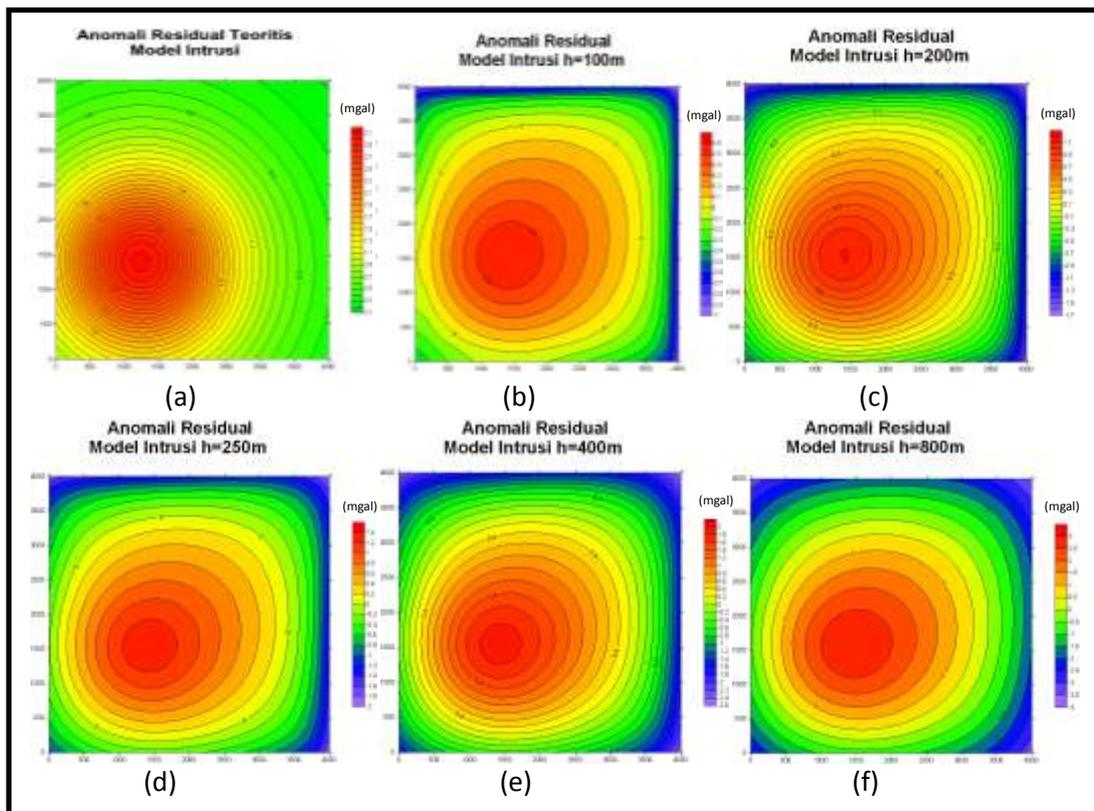
5.4.2 Pengujian Metode *Upward Continuation* menggunakan model Intrusi

Pengujian metode *Upward Continuation* sebagai salah satu metode pemisahan anomali regional-residual kemudian juga dilakukan menggunakan data anomali Bouguer sintetik dari model Intrusi. Berikut ini akan ditampilkan anomali regional dan residual hasil proses *Upward Continuation* untuk berbagai variasi ketinggian h bidang kontinuasi:



Gambar 5.18 Anomali regional model Intrusi hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Upward Continuation*. (a) Anomali regional Teoritis (b) Anomali regional *upward* $h=100\text{m}$. (c) Anomali regional *upward* $h=200\text{m}$. (d) Anomali regional *upward* $h=250\text{m}$. (e) Anomali regional *upward* $h=400\text{m}$ (f) Anomali regional *upward* $h=800\text{m}$

Seperti halnya anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses *upward* menggunakan model Syn, dengan bertambahnya ketinggian bidang kontinuasi h , maka anomali regional akan didominasi sehingga tren regionalnya dapat diketahui.



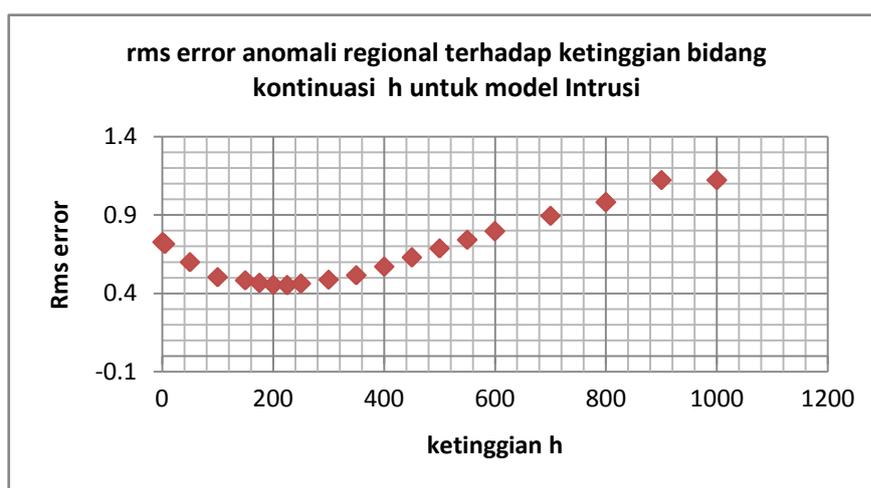
Gambar 5.19 Anomali regional model Intrusi hasil pemisahan anomali menggunakan metode *Upward Continuation*. (a) Anomali residual teoritis (b) Anomali residual *upward* $h=100\text{m}$. (c) Anomali residual *upward* $h=200\text{m}$. (d) Anomali residual *upward* $h=250\text{m}$. (e) Anomali residual *upward* $h = 400\text{m}$ (f) Anomali residual *upward* $h=800\text{m}$

Untuk mengetahui ketinggian bidang kontinuitas yang paling optimum guna menghasilkan anomali regional dan residual yang representatif, maka penulis mencoba mencari error rms seperti pada Tabel 5.8.

. Tabel 5.8 Besar error rms anomali regional terhadap ketinggian bidang kontinuitas

Ketinggian h	rms error (mgal)	Ketinggian h	Rms error (mgal)
1	0.727	350	0.516
5	0.715	400	0.571
50	0.599	450	0.629
100	0.503	500	0.686
150	0.483	550	0.742
175	0.466	600	0.796
200	0.454	700	0.894
225	0.451	800	0.981
250	0.462	900	1.123
300	0.487	1000	1.124

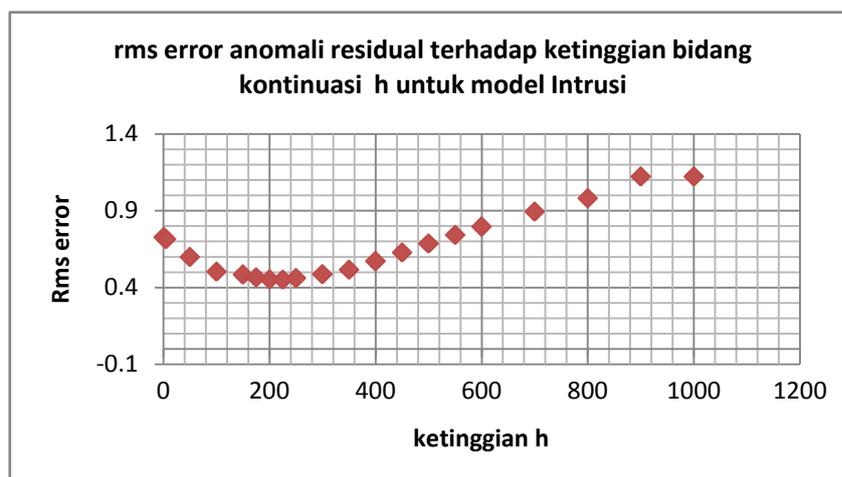
Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa anomali regional yang mempunyai nilai error rms terkecil terhadap anomali regional teoritis yakni pada ketinggian 225m. Namun ditinjau dari kontur terlihat kontur anomali regional pada ketinggian tersebut tidak begitu smooth seperti anomali regional teoritis, hal ini dikarenakan berapapun ketinggian h yang diaplikasikan dalam proses *upward continuation*, anomali regionalnya masih dipengaruhi efek residual. Hal ini dikarenakan proses kontinuitas keatas hanya mendominankan efek regional tanpa membuang pengaruh residual untuk melihat tren regional dari data anomali Bouguer yang ingin diuji.



Gambar 5.20 Plot standar deviasi minimum (rms error) terhadap ketinggian bidang kontinuitas h dari data anomali regional model Intrusi

Tabel 5.9 Besar error rms anomali residual terhadap ketinggian bidang kontinuitas

Ketinggian h	rms error (residual)	Ketinggian h	rms error (residual)
1	0.727	400	0.571
5	0.715	450	0.629
50	0.599	500	0.686
100	0.503	550	0.742
150	0.473	600	0.796
200	0.451	700	0.895
225	0.443	800	0.982
250	0.462	900	1.057
300	0.467	1000	1.124
350	0.516		



Gambar 5.21 Plot standar deviasi minimum (rms error) terhadap ketinggian bidang kontinuitas h dari data anomali residual model Intrusi

5.5 Metode Lowpass Filter

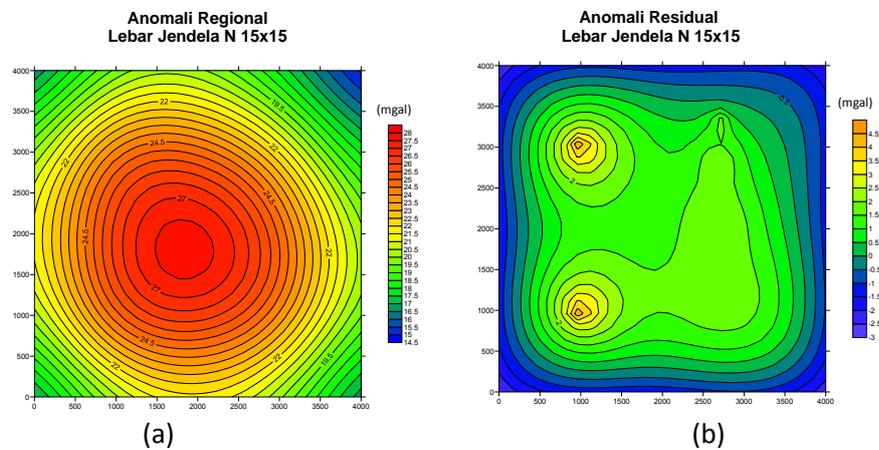
Metode *Lowpass Filter* merupakan salah satu metode yang cukup banyak digunakan dalam studi gravitasi. Pada prinsipnya metode lowpass filter akan meloloskan frekuensi-frekuensi rendah yang berasosiasi dengan anomali regional dan membuang frekuensi-frekuensi tinggi (panjang gelombang rendah) yang berasosiasi dengan anomali residual. Perose filtering ini bergantung dari bilangan gelombang k_{cutoff} yang digunakan.

Besar bilangan gelombang k_{cutoff} dapat ditentukan dengan menggunakan metode analisis spektrum. Proses ini dilakukan untuk mencari bilangan gelombang pemisah antara anomali regional (panjang gelombang tinggi) dengan anomali residual (panjang gelombang rendah). Lebar jendela N merupakan salah satu variabel yang berasosiasi dengan besar bilangan gelombang potong k_{cutoff} yang dapat digunakan dalam proses lowpass pada program filter seperti Surfer 9.0. Untuk mencari besar lebar jendela, kita dapat menggunakan persamaan 5.1 yang telah dibahas sebelumnya.

Besar lebar jendela dan bilangan gelombang pemotong untuk model intrusi dan model Syn dapat dilihat dari Tabel 5.3 dan 5.4 dari subbab analisis spektum. Dari tabel tersebut menunjukkan bahwa nilai lebar jendela yang sesuai dengan bilangan cutoffnya yakni ~ 15 . Dari persamaan diatas juga dapat dilihat hubungan bilangan gelombang k_{cutoff} dengan besar jendela yang nilainya berkebalikan,

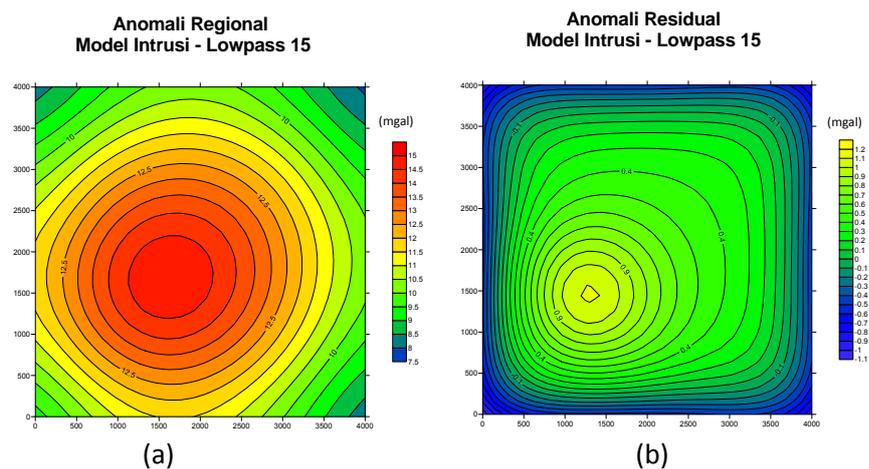
dimana semakin tinggi k_{cutoff} maka lebar jendela yang dihasilkan akan semakin besar, begitu pula sebaliknya. Secara fisis, semakin besar lebar jendela maka anomali regional yang dihasilkan semakin dangkal, dikarenakan bilangan gelombang pemisahannya semakin rendah (panjang gelombang semakin tinggi).

1. Hasil lowpass filter untuk model Syn dengan menggunakan lebar jendela 15.



Gambar 5.22 Hasil lowpass filter dengan lebar jendela 15 (a) Anomali regional model syn (b) Anomali residual model Syn

2. Hasil lowpass filter untuk model Intrusi dengan menggunakan lebar jendela 15.



Gambar 5.23 Hasil lowpass filter dengan lebar jendela 15 (a) Anomali regional model Intrusi (b) Anomali residual model Intrusi

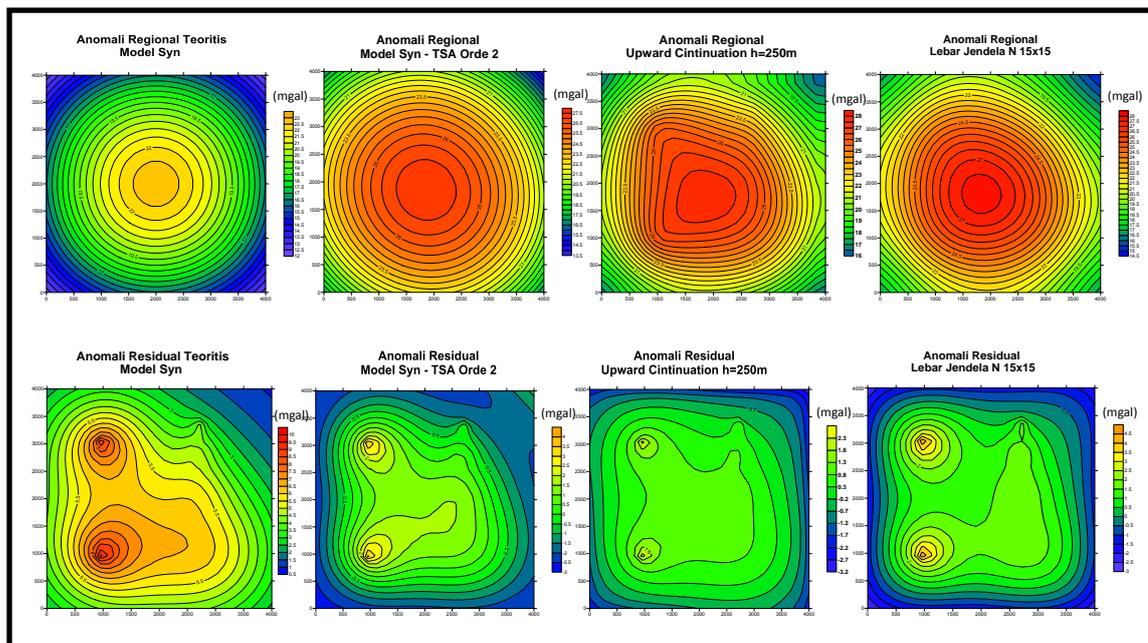
Untuk mengetahui lebar jendela yang paling efektif, kita dapat menggunakan lebar jendela yang dicari melalui proses analisis spektrum, namun demikian dapat kita sesuaikan dengan kedalaman target yang ingin kita ketahui. Semakin dangkal kedalaman target yang ingin kita ketahui, maka semakin kecil lebar jendela N yang dapat digunakan. Dikarenakan lebar jendela atau k_{cutoff} yang

digunakan merupakan hasil dari perhitungan menggunakan proses analisis spektrum, dimana kedalaman estimasi anomali regional dan residual mempunyai selisih dengan kedalaman asumsi anomali regional dan residual teoritis. Oleh karena itu, anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses Lowpass menggunakan lebar jendela dari analisis spektrum mempunyai selisih jika dihitung terhadap nilai anomali regional dan residual teoritis.

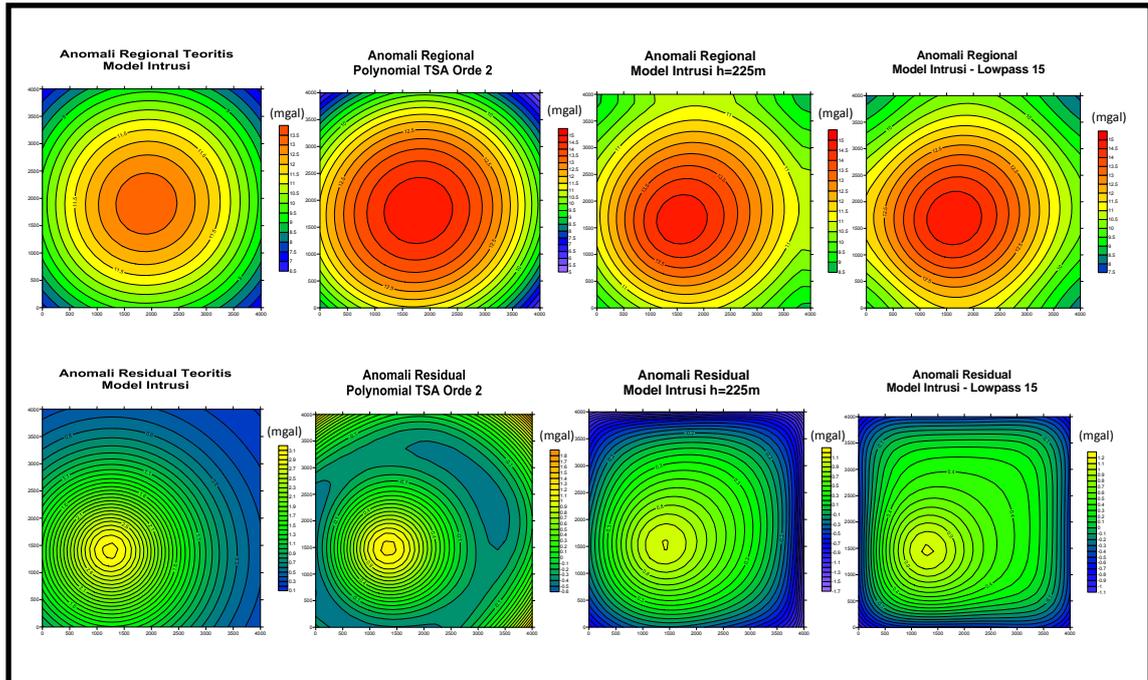
Penulis mencoba mencari rms error anomali regional dan residual yang dihasilkan dari proses lowpass filter terhadap anomali regional dan residual teoritis. Model Syn dengan lebar jendela 15 mempunyai rms error anomali regional sebesar 0.766 terhadap anomali regional teoritis. Selanjutnya, anomali regional model Intrusi yang dihasilkan dari proses lowpass filter mempunyai rms error 0.450, sedangkan anomali residual model intrusi mempunyai rms error sebesar 0.441 terhadap anomali residual teoritisnya.

5.5 Anomali Optimum Masing-masing Metode

Berikut ini hasil pemisahan anomali regional dan residual yang diaplikasikan pada model Syn dan model Intrusi (setelah disamakan skala warna dan interval kontur):



Gambar 5.24 Hasil Pemisahan anomali regional–residual dari model Syn



Gambar 5.25 Hasil pemisahan anomali regional–residual dari model Intrusi

Tabel 5.8 Rms error anomali regional dan anomali residual model Syn untuk masing-masing metode

No	Metode	Anomali Regional	Rms error
1	Polynomial TSA	Orde 2	0.706
2	Upward Continuation	250 m	0.785
3	Lowpass Filter	15	0.766
No	Metode	Anomali Residual	Rms error
1	Polynomial TSA	Orde 2	0.751
2	Upward Continuation	250 m	0.769
3	Lowpass Filter	15	0.768

Tabel 5.9 Rms error anomali regional dan anomali residual model Intrusi untuk masing-masing metode

No	Metode	Anomali Regional	Rms error
1	Polynomial TSA	Orde 2	0.410
2	Upward Continuation	225 m	0.451
3	Lowpass Filter	15	0.450
No	Metode	Anomali Residual	Rms error
1	Polynomial TSA	Orde 2	0.410
2	Upward Continuation	225 m	0.443
3	Lowpass Filter	15	0.441

Gambar 5.15 dan 5.16 merupakan hasil pemisahan anomali regional-residual dari model Syn dan model Intrusi menggunakan ketiga metode yang diuji, diantaranya metode *Polynomial TSA*, *Upward Continuation* dan *Lowpass Filter*. Dilihat dari konturnya, pada model Syn dapat dilihat bahwa anomali regional yang serupa dengan anomali regional teoritis yakni anomali regional dengan menggunakan metode *Polynomial TSA*, berbeda dengan anomali regional hasil metode *Upward Continuation* dan *Lowpass Filter* dimana jika dilihat secara kasat mata, anomali regional yang dihasilkan tidak *smooth* atau terdapat sedikit undulasi. Begitu juga dengan model Intrusi dimana ketika menggunakan metode kontinuitas dan lowpass, menunjukkan kontur mulai bergerak ke kiri bawah.

Ketidak-*smooth*-an anomali regional yang dihasilkan dari metode kontinuitas pada model Syn dan model Intrusi dikarenakan oleh berapapun ketinggian bidang kontinuitas yang diaplikasikan, pengaruh anomali residual akan masih tetap ada dalam data anomali regional walaupun tidak dominan, sedangkan undulasi dari proses lowpass dikarenakan oleh lebar jendela yang digunakan berdasarkan analisis spektrum dimana kedalaman regionalnya lebih dangkal terhadap kedalaman asumsi teoritis, atau dengan kata lain anomali regional yang dihasilkan oleh proses lowpass masih mengandung pengaruh benda-benda residualnya.

Jika dilihat dari rms error yang dihasilkan dari ketiga metode untuk masing-masing metode, menunjukkan bahwa metode *Polynomial* memiliki nilai error rms anomali regional dan residual paling kecil yang dihitung terhadap anomali regional dan residual teoritis dibandingkan metode kontinuitas dan lowpass filter sehingga secara umum metode ini cukup representatif jika digunakan dalam proses separasi anomali regional dan residual.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian yang berjudul “Studi komparasi metode filtering untuk pemisahan anomali regional-residual dari data anomali Bouguer” menghasilkan beberapa kesimpulan hasil penelitian dan saran yang direkomendasikan penulis.

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian uji metode filtering, terdapat beberapa kesimpulan yang penulis rangkum, diantaranya:

1. Metode *Polynomial Trend Surface Analysis* bekerja dengan memvariasikan orde polinomial. Semakin besar orde polinomial, anomali regional yang dihasilkan semakin dangkal dan sebaliknya
2. Metode *Upward Continuation* membawa bidang pengukuran keatas. Metode kontinuitas mendominasi anomali regionalnya dengan tidak mengeliminasi pengaruh residual.
3. Metode *Lowpass Filter* meloloskan frekuensi atau bilangan gelombang rendah dan membuang frekuensi tinggi . Lebar jendela, N , dalam lowpass filter diperoleh dari proses analisis spektrum. Makin besar N , berkorelasi dengan makin rendah bilangan gelombang k (frekuensi rendah) maka anomali regional makin dalam dan sebaliknya.
4. Dari hasil penelitian, metode *Polynomial TSA* mempunyai error lebih kecil dan hasil yang lebih baik dibandingkan metode *Lowpass filter* dan *Upward Continuation* dalam proses pemisahan anomali regional dan residual.

6.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang direkomendasikan penulis, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Jika dilakukan penelitian lanjutan, model sintetik dapat dibuat lebih mendekati keadaan real dan jika perlu dapat dites menggunakan data real dari lapangan.
2. Studi komparasi tidak hanya dilakukan menggunakan 3 jenis filter saja melainkan dapat dilakukan dengan metode yang lebih banyak lagi.

DAFTAR ACUAN

- Blakely, R.J., 1995, *Potential Theory in Gravity & Magnetic application*, Cambridge University Press.
- Fitriana, Indah, 2011, *Penentuan Struktur Bawah Permukaan berdasarkan analisa dan Pemodelan Data Gaya Berat*. Geophysics Program studi Department of Physics, University of Indonesia.
- Geosoft Incorporated, 2001, *MAGMAP 2D frequency domain processing*, Software Manual.
- Grandis, H., 2009, *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Institut Teknologi Bandung.
- Reynolds, J.M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Chichester, John Wiley and Sons.
- Robinson, E. S., 1970, *Upward Continuation of Total intensity magnetic fields*. *Geophysics*, Vol.35.
- Rosid, Syamsu, 2005, *Gravity Method in Exploration Geophysics*, Lecture Notes, Geophysics Program Studi Department of Physics, University of Indonesia.
- Sheriff, Robert E., 2001, *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., and Keys, D.A., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press.
- Widianto, E., 2008, *Penentuan konfigurasi struktur batuan dasar dan jenis cekungan dengan data gayaberat serta implikasinya pada target eksplorasi minyak dan gas bumi di Pulau Jawa*, Institut Teknologi Bandung.
- UBC., 2005, *GRAV3D - A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Gravity Data over 3D Structures*, Departement of Earth and Ocean Science, Geophysical Inversion Facility, University of British Columbia.

LAMPIRAN 1

Tabel Densitas Batuan

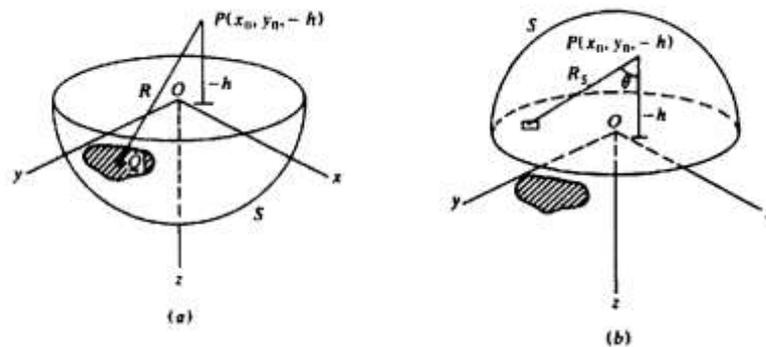
Tabel 1 Daftar densitas batuan (Telford et al., 1976)

Rock type	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)	Mineral	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)
Sediments (wet)			Metallic minerals		
Overburden		1.92	Oxides, carbonates		
Soil	1.2 – 2.4	1.92	Bauxite	2.3 – 2.55	2.45
Clay	1.63 – 2.6	2.21	Limonite	3.5 – 4.0	3.78
Gravel	1.7 – 2.4	2.0	Siderite	3.7 – 3.9	3.83
Sand	1.7 – 2.3	2.0	Rutile	4.18 – 4.3	4.25
Sandstone	1.61 – 2.76	2.35	Manganite	4.2 – 4.4	4.32
Shale	1.77 – 3.2	2.40	Chromite	4.3 – 4.6	4.36
Limestone	1.93 – 2.90	2.55	Ilmenite	4.3 – 5.0	4.67
Dolomite	2.28 – 2.90	2.70	Pyrolusite	4.7 – 5.0	4.82
Sedimentary rocks (av.)		2.50	Magnetite	4.9 – 5.2	5.12
Igneous rocks			Franklinite	5.0 – 5.22	5.12
Rhyolite	2.35 – 2.70	2.52	Hematite	4.9 – 5.3	5.18
Andesite	2.4 – 2.8	2.61	Cuprite	5.7 – 6.15	5.92
Granite	2.50 – 2.81	2.64	Cassiterite	6.8 – 7.1	6.92
Granodiorite	2.67 – 2.79	2.73	Wolframite	7.1 – 7.5	7.32
Porphyry	2.60 – 2.89	2.74	Sulfides, arsenides		
Quartz diorite	2.62 – 2.96	2.79	Sphalerite	3.5 – 4.0	3.75
Diorite	2.72 – 2.99	2.85	Malachite	3.9 – 4.03	4.0
Lavas	2.80 – 3.00	2.90	Chalcocopyrite	4.1 – 4.3	4.2
Diabase	2.50 – 3.20	2.91	Stannite	4.3 – 4.52	4.4
Basalt	2.70 – 3.30	2.99	Stibnite	4.5 – 4.6	4.6
Gabbro	2.70 – 3.50	3.03	Pyrrhotite	4.5 – 4.8	4.65
Peridotite	2.78 – 3.37	3.15	Molybdenite	4.4 – 4.8	4.7
Acid igneous	2.30 – 3.11	2.61	Marcasite	4.7 – 4.9	4.85
Basic igneous	2.09 – 3.17	2.79	Pyrite	4.9 – 5.2	5.0
Metamorphic rocks			Bornite	4.9 – 5.4	5.1
Quartzite	2.5 – 2.70	2.60	Chalcocite	5.5 – 5.8	5.65
Schists	2.39 – 2.9	2.64	Cobaltite	5.8 – 6.3	6.1
Graywacke	2.6 – 2.7	2.65	Arsenopyrite	5.9 – 6.2	6.1
Marble	2.6 – 2.9	2.75	Bismuththinite	6.5 – 6.7	6.57
Serpentine	2.4 – 3.10	2.78	Galena	7.4 – 7.6	7.5
Slate	2.7 – 2.9	2.79	Cinnabar	8.0 – 8.2	8.1
Gneiss	2.59 – 3.0	2.80	Non-metallic minerals		
Amphibolite	2.90 – 3.04	2.96	Petroleum	0.6 – 0.9	—
Eclogite	3.2 – 3.54	3.37	Ice	0.88 – 0.92	—
Metamorphic	2.4 – 3.1	2.74	Sea Water	1.01 – 1.05	—
			Lignite	1.1 – 1.25	1.19
			Soft coal	1.2 – 1.5	1.32
			Anthracite	1.34 – 1.8	1.50
			Chalk	1.53 – 2.6	2.01
			Graphite	1.9 – 2.3	2.15
			Rock salt	2.1 – 2.6	2.22
			Gypsum	2.2 – 2.6	2.35
			Kaolinite	2.2 – 2.63	2.53
			Orthoclase	2.5 – 2.6	—
			Quartz	2.5 – 2.7	2.65
			Calcite	2.6 – 2.7	—
			Anhydrite	2.29 – 3.0	2.93
			Biotite	2.7 – 3.2	2.92
			Magnesite	2.9 – 3.12	3.03
			Fluorite	3.01 – 3.25	3.14
			Barite	4.3 – 4.7	4.47

LAMPIRAN 2

Kontinuasi Keatas (*Upward Continuation*)

Kontinuasi keatas merupakan salah satu cara untuk melihat tren anomali regional dengan membawa bidang pengukuran keatas dengan ketinggian h tertentu. Pada metode ini, anomali regional didominasi dan meminimalkan efek anomali residual atau noise dari data anomali Bouguer, sehingga berapapun ketinggian yang diaplikasikan dalam metode ini untuk melihat tren anomali regionalnya, maka efek residual akan tetap ada. Berikut ini adalah penurunan persamaan kontinuasi keatas yang dijabarkan oleh Blakely (1995).



Gambar 1. Teori Kontinuasi (a) Hemisphere S di bagian positif bidang xy.
(b) Hemisphere s di bagian negatif bidang xy (Blakely, 1995).

Potensial di titik P dan Q:

$$U_p = \gamma \int_v \left(\frac{\rho}{R} \right) dv$$

$$\nabla^2 U_Q = -4\pi\gamma\rho$$

Eliminasi ρ sehingga:

$$U_p = \left(\frac{1}{4\pi} \right) \int_v \left(\frac{1}{R} \right) \nabla^2 U_Q dv$$

Gunakan teorema Green untuk menyelesaikan persamaan diatas:

$$\int_v (W\nabla^2 U - U\nabla^2 W) dv = \int_s (W\nabla U - U\nabla W) ds$$

dimana $W = 1/R$, $U = U_Q$ di dalam S, dan $U = U_s$ di permukaan, dengan demikian diperoleh:

$$\int_v (1/R\nabla^2 U_Q - U_Q\nabla^2 (1/R)) dv = \int_s (1/R_s \nabla U_s - U_s \nabla(1/R_s)) ds$$

dengan $\nabla^2 \left(\frac{1}{R}\right) = 0$ maka akan didapatkan:

$$\begin{aligned} \int_v \left(\frac{1}{R\nabla^2 U_Q}\right) dv &= \int_s \left(\frac{1}{R_s \nabla U_s} - U_s \nabla \left(\frac{1}{R_s}\right)\right) ds \\ - \int_v \left(\frac{1}{R\nabla^2 U_Q}\right) dv &= 4\pi U_p = \int_s \left(U_s \nabla \left(\frac{1}{R_s}\right) - \frac{1}{R_s \nabla U_s}\right) ds \\ &= \int_s \left(U_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R_s}\right) - \left(\frac{1}{R_s} \frac{\partial}{\partial n} U_s\right)\right) ds \\ 4\pi U_p &= \int_x \int_y \left(U_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R_s}\right) - \left(\frac{1}{R_s} \frac{\partial}{\partial n} U_s\right)\right) dx dy \end{aligned}$$

Jika tidak ada massa di dalam volume ,

$$0 = \int_x \int_y \left(U_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R_s}\right) - \left(\frac{1}{R_s} \frac{\partial}{\partial n} U_s\right)\right) dx dy$$

diketahui $R_s^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + h)^2$, maka pada bidang xy:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial n}\right) \left(\frac{1}{R_s}\right) &= \lim_{z \rightarrow 0} \left(\frac{\partial}{\partial z}\right) \left(\frac{1}{R_s}\right) \\ &= \lim_{z \rightarrow 0} (-(z + h)/R_s^3) \\ &= -h/R_s^3 \end{aligned}$$

substitusi ke persamaan $4\pi U_p = \int_x \int_y \left(U_s \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R_s}\right) - \left(\frac{1}{R_s} \frac{\partial}{\partial n} U_s\right)\right) dx dy$, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} 4\pi U_p &= \int_x \int_y \left(U_s (-h/R_s^3) - \left(\frac{1}{R_s}\right) (-g)\right) dx dy \\ \int_x \int_y (U_s (-h/R_s^3)) dx dy &= \int_x \int_y \frac{1}{R_s} (+g) dx dy \\ U_p &= \frac{1}{2\pi} \int_x \int_y \frac{g dx dy}{R_s^3} \end{aligned}$$

nilai g dititil p dinyatakan dengan:

$$\frac{\partial U_p}{\partial z} = g_p = \frac{h}{2\pi} \int_x \int_y \frac{g}{R_s^3} dx dy$$

Pesamaan diatas adalah persamaan **Kontinuasi Keatas (Upward Continuation)**

Jika nilai g di titik p disebut juga $G(x', y', -h)$ dengan ketinggian h diatas permukaan. dan $G(x, y, 0)$ di permukaan dan $R = \{(x - x')^2 + (y - y')^2 + h^2\}^{\frac{3}{2}}$ adalah Secara sederhana dapat ditulis kembali menjadi:

$$G(x', y', -h) = \iint \frac{h/2\pi}{\{(x - x')^2 + (y - y')^2 + h^2\}^{\frac{3}{2}}} G(x, y, 0) dx dy$$

Persamaan kontinuitas keatas yang dijabarkan diatas merupakan integral hasil konvolusi dari $G(x,y)$ yakni data anomali Bouguer yang diperoleh di permukaan dan fungsi filter $\frac{h/2\pi}{\{x^2+y^2+h^2\}^{\frac{3}{2}}}$ atau dapat kita sebut W_{up} . Persamaan kontinuitas dimodifikasi menjadi (domain spasial):

$$G(x, y) = F(x, y) * W_{up}(x, y)$$

dimana $G(x,y)$ merupakan data hasil kontinuitas keatas, $F(x,y)$ data anomali di permukaan dan $W_{up}(x,y)$ merupakan fungsi filter kontinuitas.

Dalam domain frekuensi setelah dilakukan proses transformasi Fourier, persamaan kontinuitas keatas berbentuk:

$$K(u, v) = G(u, v) Y_{up}(u, v)$$

dimana $K(u, v)$, $G(u, v)$ dan $Y_{up}(u, v)$ merupakan komponen persamaan kontinuitas keatas dalam domain frekuensi yang berasosiasi $G(x, y)$, $F(x, y)$ dan $W_{up}(x, y)$ dalam domain spasial.

Untuk memperoleh fungsi filter dalam domain frekuensi, maka dilakukan proses Transformasi Fourier, sehingga diperoleh persamaan fungsi filter seperti berikut:

$$\begin{aligned} Y_{up}(u, v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h/2\pi}{\{x^2 + y^2 + h^2\}^{\frac{3}{2}}} e^{-i(ux+vy)} dx dy \\ &= e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}} \end{aligned}$$

Sehingga persamaan **kontinuitas upward (2D)** dalam domain frekuensi frekuensi berupa

$$K(u, v) = G(u, v) e^{-h(u^2+v^2)^{1/2}}$$