



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF 141501

PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA
MICROGRAVITY UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN
FLUIDA DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI
DAN REINJEKSI LAPANGAN PANAS BUMI X

AFTER HELFERT PASARIBU
NRP 3714100022

Dosen Pembimbing
Anik Hilyah, S.Si., M.T
NIP. 1979 0813 200812 2 002
M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T
NIP. 1980 0916 200912 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - RF 141501

**PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA
MICROGRAVITY UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN
FLUIDA DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI
DAN REINJEKSI LAPANGAN PANAS BUMI X**

AFTER HELFERT PASARIBU
NRP 3714100022

Dosen Pembimbing
Anik Hilyah, S.Si., M.T
NIP. 1979 0813 200812 2 002
M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T
NIP. 1980 0916 200912 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

UNDERGRADUATED THESIS - RF 141501

**RESERVOIR MODELING USING MICROGRAVITY DATA
TO IDENTIFY FLUID FLOW AND MASS CHANGES
DUE TO PRODUCTION AND REINJECTION
IN GEOTHERMAL FIELD X**

**AFTER HELFERT PASARIBU
NRP 3714100022**

Supervisors

Anik Hilyah, S.Si., M.T

NIP. 19790813 200812 2 002

M. Singgih Purwanto, S. Si., M.T

NIP. 19800916 200912 1 002

GEOPHYSICS ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2018

**PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA
MICROGRAVITY UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN
FLUIDA DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI
DAN REINJEKSI LAPANGAN PANAS BUMI X**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Surabaya, 24 Juli 2018

Menyetujui,

1. Anik Hilyah, S.Si., M.T (Pembimbing I)
NIP. 1979 0813 200812 2 002

2. Moh. Singgih Purwanto, S.Si., M.T (Pembimbing II)
NIP. 1980 0916 200912 1 002

3. Dr. Widya Utami, DEA (Penguji I)
NIP. 1961 1024 198803 1 001

4. Dr. Dwa Desa Warnana (Penguji II)
NIP. 1976 0123 200003 1 001

Mengetahui,

Kepala Laboratorium Geofisika Eksplorasi
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya



Dr. Ayi. Syaiful Bahri, S.Si., M.T
NIP. 19690906 199702 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN

TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA *MICROGRAVITY* UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN FLUIDA DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI DAN REINJEKSI LAPANGAN PANAS BUMI X” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya. 26 Juli 2018

Penulis



After Helfert Pasaribu

NRP 3714100022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA
MICROGRAVITY UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN FLUIDA
DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI DAN REINJEKSI
LAPANGAN PANAS BUMI X**

Penulis : After Helfert Pasaribu
NRP : 3714100022
Departemen : Teknik Geofisika
Dosen Pembimbing : Anik Hilyah, S.Si., M.T
NIP. 19790813 200812 2 002
M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T
NIP 19800916 200912 1 002

ABSTRAK

Berdasarkan data produksi dan reinjeksi pada lapangan panas bumi X tahun 2015-2016, telah diproduksi fluida sebesar 8,51 Mton. Defisit massa ini dikembalikan secara alami oleh air meteorik melalui *recharge area* dan air yang direinjeksikan melalui sumur reinjeksi. Jumlah fluida yang direinjeksikan pada lapangan panas bumi X tahun 2015-2016 sebesar 2,55 Mton. Perlu dilakukan monitoring pada sumur reinjeksi untuk mengetahui aliran fluida dan kesetimbangan massa produksi dan reinjeksi. Pengukuran *microgravity* yang dilakukan pada 86 titik pengukuran di sekitar daerah produksi dan reinjeksi dapat mendeteksi perubahan gaya berat pada reservoir pada lapangan panas bumi X dengan dimensi 5 km x 9,5 km x 1 km. Pengolahan data yang akan didekatkan menggunakan dua pendekatan yaitu berdasarkan model perubahan densitas dan teori Potensial Gauss. Berdasarkan perhitungan menggunakan pendekatan model perubahan densitas diperoleh nilai perubahan massa sebesar -6,57 Mton sedangkan dengan menggunakan teori Potensial Gauss diperoleh nilai -6,2927 Mton. Hal tersebut dapat dijadikan acuan dalam *maintenance* produksi tahun berikutnya untuk menciptakan sistem produksi yang mencapai target, ramah lingkungan, dan *sustainable*.

Kata kunci : *mass balance*, *microgravity* , produksi, reinjeksi, reservoir

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

RESERVOIR MODELING USING MICROGRAVITY DATA TO IDENTIFY FLUID FLOW AND MASS CHANGES DUE TO PRODUCTION AND REINJECTION IN GEOTHERMAL FIELD X

Author : After Helfert Pasaribu
Student ID Number : 3714100022
Department : Teknik Geofisika
Advisor Lecture : Anik Hilyah, S.Si., M.T
NIP. 1979 0813 200812 2 002
M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T
NIP 1980 0916 200912 1 002

ABSTRACT

Based on production and reinjection data on geothermal field X 2015-2016 year, 8.51 Mton fluid has been produced. This mass deficit succeeds automatically by the air flowing through the recharge area and the air being reinjected through the reinjection well. The amount of fluid that occurs on geothermal surface X 2015-2016 is 2.55 Mton. It is necessary to monitor the reinjection wells for fluid flow and mass production equilibrium and reinjection. Measurement of microgravity performed at 86 points of measurement around the production area and reinjection is very fast on the surface of geothermal soil X with dimensions of 5 km x 9.5 km x 1 km. Data processing that will be approached using two approaches that are based on the dimensions and theories of Potential Gauss. Based on the results of calculations using variables formed by the population of -6.57 Mton while using the theory of Potential Gauss obtained value -6.2927 Mton. It can be used as a reference in next year's production maintenance to create a targeted, environmentally friendly, and sustainable production system.

Keywords : mass balance, microgravity , production, reinjection, reservoir

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya Laporan Tugas Akhir dengan judul **PEMODELAN RESERVOAR MENGGUNAKAN DATA MICROGRAVITY UNTUK MENGIDENTIFIKASI ALIRAN FLUIDA DAN PERUBAHAN MASSA AKIBAT PRODUKSI DAN REINJEKSI LAPANGAN PANAS BUMI X** dapat terselesaikan dengan baik.

Pengerjaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir, tidak terlepas dari dukungan dan bimbingan berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua Orangtua dan Radot Oktora Pasaribu atas dukungan dan semangat yang telah diberikan selama pengerjaan tugas akhir ini.
2. Ibu Anik Hilyah, S.Si., M.T dan Bapak M. Singgih Purwanto, S.Si., M.T selaku dosen pembimbing.
3. Bapak Imam B. Raharjo, Bapak M. Tofan, Bapak Fadhilaz, Bapak Lendri, dan pihak PT. Pertamina Geothermal Energy yang membantu dalam penyediaan data dan fasilitas selama pengerjaan tugas akhir
4. Kepada teman TG-03 atas dukungan selama pengerjaan tugas akhir.
5. Seluruh akademisi dan staf Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah memberikan bantuan baik akademis maupun administrasi selama penulis menempuh studi di Departemen Teknik Geofisika ITS.
6. Serta semua pihak yang membantu dalam pengerjaan dan penyusunan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa penulisan dan hasil penelitian tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun, sehingga dapat sempurna dan membawa manfaat bagi penulis maupun bagi pembaca.

Surabaya, 26 Juli 2018

After Helfert Pasaribu
NRP. 3741400022

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN KEASLIAN.....	vii
TUGAS AKHIR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR GRAFIK.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Sistem Panas Bumi	3
2.1.1 Reservoir <i>Hydrothermal</i>	3
2.1.2 Reservoir <i>Geopressed</i>	3
2.1.3 Reservoir <i>Hot Dry Rock</i>	4
2.1.4 Reservoir Magma.	4
2.2 <i>Microgravity</i>	5
2.2.1 Hukum Newton Tentang Gravitasi	5
2.2.2 Percepatan Gravitasi.....	6
2.2.3 Koreksi Data <i>Microgravity</i>	6
2.2.3.1 <i>Koreksi Pengaruh Pasang Surut</i>	7
2.2.3.2 <i>Perhitungan Koreksi Apungan (Drift)</i>	7
2.3 <i>Forward Operator Microgravity</i>	8
2.4 Anomali Gravitasi.....	9
2.5 Perubahan Massa Akibat Produksi dan Reinjeksi	11
BAB III METODOLOGI	15
3.1 Data	15
3.2 Perangkat Lunak	15
3.3 Metodologi Penelitian	17
3.4 Pengolahan Data	18
3.4.1 <i>Quality Controll</i>	18
3.4.2 <i>Forward Modelling</i>	19
3.4.3 Inversi Data Sintetik	19
3.4.4 Inversi Data Riil	19
3.5 Interpretasi Model.....	20
3.5.1 Analisis Perubahan Densitas.....	20

3.5.2	Analisis Aliran Fluida	20
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	21
4.1	Hasil <i>Quality Control</i> Data	21
4.2	<i>Gridding</i> Data Riil	23
4.3	<i>Forward Modelling</i> Data Sintetik	26
4.3.1	Perhitungan Densitas	26
4.3.2	Model Inisial	27
4.3.3	Hasil <i>Forward Modelling</i>	29
4.4	Inversi Data Sintetik	30
4.5	Inversi Data Riil	32
4.6	Perhitungan Perubahan Massa	36
4.6.1	Perhitungan Berdasarkan Pendekatan Model Perubahan Densitas	36
4.6.2	Perhitungan Berdasarkan Teori Potensial Gauss	37
4.7	Pembahasan	37
BAB V	PENUTUP	43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
DAFTAR	PUSTAKA	45
BIOGRAFI	PENULIS	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perpindahan panas di bawah permukaan (White, 1973) [gambar dimodifikasi]. Menggambarkan sistem panas bumi dengan reservoir <i>Hydrothermal</i>	4
Gambar 2.2	Perubahan nilai gravitasi akibat proses produksi dan reinjeksi. Δg positif menggambarkan adanya penambahan massa sedangkan Δg menggambarkan adanya pengurangan massa yang terjadi di bawah permukaan.....	10
Gambar 2.3	Perubahan massa pada industri panas bumi [gambar dimodifikasi] (Nishijima,2010) Pengukuran <i>microgravity</i> menjadi kegiatan tahunan yang rutin dilakukan untuk melakukan monitoring fluida yang diproduksi dan direinjeksikan.	12
Gambar 2.4	Estimasi perubahan massa menggunakan pendekatan model perubahan densitas. Model perubahan densitas yang dibuat adalah kumpulan dari <i>mesh</i> yang berbentuk balok dengan dimensi tertentu dan memiliki volume. Tiap <i>mesh</i> memiliki nilai perubahan densitas ($\Delta\rho$).	13
Gambar 3.1	<i>Looping</i> pengukuran <i>microgravity</i> . Pengukuran dimulai dari <i>base</i> kemudian ke titik pengukuran lainnya (1,2,3,4,3,2,1) dan kembali ke <i>base</i> . Hal perlu dilakukan untuk mengurangi efek kemelaran pegas pada alat pengukuran sehingga mendapatkan data yang lebih valid dengan menggunakan koreksi apungan.....	15
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian. Terdapat 3 data utama yaitu data <i>microgravity</i> (data pengukuran metode gaya berat <i>time-lapsed</i>), data massa produksi dan reinjeksi tahun 2015-2016, dan informasi geologi berupa keadaan reservoir lapangan panas bumi X.....	17
Gambar 4.1	Gambaran posisi <i>base</i> dan <i>base</i> ikat terhadap zona reservoir. Penentuan titik B01 (<i>base</i> ikat) mempertimbangan mobilisasi saat pengukuran agar menghemat waktu pengukuran dan B01 harus memiliki nilai pengukuran gravitasi yang tidak dipengaruhi oleh perubahan massa akibat produksi dan reinjeksi.	22
Gambar 4.2	<i>Gridding</i> data pengukuran 2015. Daerah dengan warna biru menggambarkan nilai gravitasi yang rendah sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan daerah dengan nilai gravitasi tinggi.	24
Gambar 4.3	<i>Gridding</i> data pengukuran 2016. Daerah dengan warna biru menggambarkan nilai gravitasi yang rendah sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan daerah dengan nilai gravitasi tinggi.	25

Gambar 4.4	<i>Gridding</i> data nilai perubahan gravitasi Sekilas tidak terlihat perbedaan antara <i>gridding</i> data pengukuran 2015 dengan 2016 namun setelah diselisihkan terdapat perbedaan dalam skala μgal	25
Gambar 4.5	Model inisial inversi. Tersusun atas <i>mesh</i> dengan ukuran tertentu. Untuk daerah <i>proven</i> merupakan <i>mesh</i> dengan panjang dan lebar sebesar 250 m, dan kedalamannya diatur secara otomatis sebagai efek dari <i>depth smoothing</i> . Garis merah merupakan batas dari daerah reservoir.....	28
Gambar 4.6	Zona reservoir. Zona reservoir berasal dari tumpukan <i>mesh</i> yang disusun membentuk zona reservoir lapangan panas bumi X. Zona reservoir lapangan panas bumi X yang menjadi lokasi penelitian tugas akhir ini memiliki dimensi 5 x 9,5 x 1 km	28
Gambar 4.7	Sebaran titik <i>forward modelling</i> . <i>Mesh</i> dengan warna biru memiliki nilai perubahan densitas sebesar $-1,6 \text{ kg/m}^3$ dan <i>mesh</i> yang berwarna merah memiliki nilai perubahan densitas sebesar $1,5 \text{ kg/m}^3$	29
Gambar 4.8	Hasil <i>forward modelling</i> . Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai perubahan densitas negatif menghasilkan perubahan nilai gravitasi negatif dan sebaliknya.....	29
Gambar 4.9	Model sintetik perubahan densitas. Model dengan input data hasil perhitungan perubahan densitas kemudian di <i>forward modelling</i> untuk menghasilkan respon perubahan nilai gravitasi	30
Gambar 4.10	Model perubahan densitas hasil inversi dari respon dari model sintetik. Model memiliki kesamaan dengan model perubahan densitas sintetik menyatakan bahwa parameter inversi yang digunakan dapat mengembalikan respon <i>forward modelling</i> menjadi model perubahan densitas.	31
Gambar 4.11	Perubahan nilai gravitasi (a) respon <i>forward modelling</i> dari model perubahan data sintetik (b) hasil kalkulasi <i>forward modelling</i> dari model perubahan densitas hasil inversi.....	31
Gambar 4.12	Jumlah iterasi inversi data sintetik. Jumlah iterasi yang dilakukan adalah sebanyak 14 kali. Iterasi akan terus dilakukan hingga <i>error</i> perhitungan mencapai 0,00001 mgal	32
Gambar 4.13	Hasil inversi data riil. Inversi yang dilakukan dengan menggunakan parameter inversi yang berhasil mengembalikan respon <i>forward modelling</i> menjadi model perubahan densitas.....	33
Gambar 4.14	Jumlah iterasi inversi data riil. Dengan melakukan iterasi sebanyak 7 kali, nilai <i>error</i> -nya telah mencapai 0,00001 mgal . Jumlahnya	

	lebih sedikit dibandingkan data sintetik karena jumlah datanya lebih sedikit.	33
Gambar 4.15	Hasil filter nilai $-1,5$ sampai dengan -3 kg/m^3 menunjukkan daerah pengurangan massa terbesar. Pengurangan massa terbesar terdapat pada daerah yang terdapat sumur produksi dan tidak terdapat di luar daerah reservoir.	34
Gambar 4.16	Hasil filter nilai $0,5$ sampai dengan 3 kg/m^3 menunjukkan daerah penambahan massa terbesar. Pengurangan massa terbesar terjadi di dua daerah yaitu daerah dekat sumur reinjeksi akibat proses reinjeksi fluida dan sebelah barat sumur produksi yang diidentifikasi sebagai akibat <i>natural recharge</i>	35
Gambar 4.17	Hasil filter untuk daerah reservoir. <i>Mesh</i> dengan warna biru (perubahan densitas negatif) menggambarkan pengurangan massa sedangkan warna merah (perubahan densitas positif) menggambarkan penambahan massa. Pengurangan massa mendominasi di daerah sumur produksi.	36
Gambar 4.18	<i>Gridding</i> data untuk menghitung nilai perubahan massa berdasarkan teori Potensial Gauss. Perhitungan menggunakan teori Potensial Gauss menggunakan asumsi bahwa perubahan gravitasi yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa yang terjadi di daerah reservoir.	37
Gambar 4.19	Estimasi aliran fluida sumur reinjeksi menuju zona reservoir. Fluida yang direinjeksikan mengalir dari sumur reinjeksi menuju reservoir ditandai dengan <i>mesh</i> berwarna merah di dekat sumur reinjeksi. Sedangkan <i>mesh</i> merah yang berada di sebelah kiri sumur produksi diidentifikasi sebagai penambahan massa akibat <i>natural recharge</i>	38
Gambar 4.20	Letak <i>mesh</i> reservoir terhadap reservoir. Teori Potensial Gauss yang digunakan mengasumsikan bahwa perubahan nilai gravitasi yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa pada reservoir.	40

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian.....	16
Tabel 3.2 Parameter model. berdasarkan kondisi reservoir lapangan panas bumi X.....	19
Tabel 4.1 Hasil pengukuran pada <i>base</i> dan <i>base</i> ikat.....	22
Tabel 4.2 Parameter inversi. Parameter ini digunakan untuk inversi data sintetik kemudian akan digunakan sebagai parameter inversi pada data riil 30	
Tabel 4.3 Hasil perhitungan defisit massa. Perubahan nilai gravitasi yang terjadi pada lapangan panas bumi X dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan massa.	39

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GRAFIK

- Grafik 4.1 Plot perhitungan standar deviasi dengan nilai di bawah 0,02. Plot perhitungan standar deviasi dengan nilai di bawah 0,02. Sumbu x menggambarkan data ke-n dan sumbu y hasil dari perhitungan standar deviasi yang didefinisikan sebagai *repeatability* 21
- Grafik 4.2 Plot besar nilai koreksi apungan tahun 2015 dan 2016 23
- Grafik 4.3 Histogram G relatif pengukuran tahun 2016. Sumbu X merupakan nilai pengukuran dan sumbu Y adalah jumlah data. Data pengukuran tidak memiliki persebaran data yang terlalu luas atau variatif. Persebaran data pengukuran menunjukkan data yang stasioner. .. 24

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses eksploitasi panas bumi melibatkan pengurasan fluida dari bawah permukaan. Pengurasan ini mengakibatkan terjadinya defisit massa di bawah permukaan. Defisit massa yang diambil dikembalikan secara alami oleh air meteorik melalui recharge area. Namun prosesnya yang lambat tidak dapat mencegah perubahan temperatur, tekanan, dan proses terjadinya *subsidence* secara efisien. Sistem panas bumi adalah istilah umum yang menggambarkan transfer panas alami pada volume tertentu di mana panas dipindahkan dari sebuah sumber panas ke pembuangan panas pada permukaan. Pembuangan panas pada permukaan merupakan sumur produksi. Sedangkan sebagai kontrol produksi dibutuhkan sumur reinjeksi (Hochstein, P & Browne, 2000).

Sumur reinjeksi dirancang untuk dapat menahan suhu dan tekanan tinggi sehingga secara efektif dapat mengembalikan *brine* kedalam reservoir (Rempher, 2013). Proses produksi panas bumi mengambil fluida yang berada di bawah permukaan. Hal ini menyebabkan adanya pengurangan massa yang terjadi di bawah permukaan, salah satu tujuan dari reinjeksi adalah untuk mengembalikan massa yang telah berkurang. Berdasarkan data produksi dan reinjeksi pada lapangan panas bumi X tahun 2015-2016, telah diproduksi fluida sebesar 8,51 Mton dan diinjeksikan kembali sebesar 2,55 Mton. Oleh karena itu, perlu dilakukan monitoring pada sumur-sumur reinjeksi untuk mengetahui aliran fluida dan kesetimbangan massa produksi dan reinjeksi.

Microgravity merupakan pengembangan dari metode gaya berat dengan dimensi keempatnya adalah waktu. Metode ini relatif baru yang berkembang sesuai dengan perkembangan ketelitian peralatan gravimeter yang saat ini mencapai ketelitian 0,001 μ Gal. Prinsip dari metode *microgravity* adalah pengukuran gaya berat secara berulang menggunakan gravimeter yang teliti. Perubahan nilai *microgravity* di suatu titik dapat disebabkan oleh: perubahan fluida bawah permukaan, perubahan tinggi titik amat, dan adanya perubahan topografi di sekitar titik amat (Sarkowi dkk., 2005).

Pengukuran *microgravity* pada daerah sekitar produksi dan reinjeksi dapat mendeteksi perubahan gaya berat pada titik pengukuran. Perubahan gaya berat ini mengidentifikasi perubahan densitas yang kemudian dikonversikan menjadi massa. Perubahan massa dapat diukur melalui pendekatan teori Potensial Gauss dan *Mass Balance*. Pengukuran *microgravity* juga dilakukan untuk mendeteksi aliran fluida pada bawah permukaan lapangan panas bumi. Hal tersebut dapat dijadikan acuan dalam *maintenance* produksi untuk menciptakan sistem pembangkit listrik yang mencapai target produksi, ramah lingkungan, dan

sustainable. Hasil dari pengolahan data dapat memberikan informasi anomali gaya berat daerah lapangan panas bumi dalam satuan μgal kemudian dimodelkan untuk mengetahui aliran fluida dan perubahan massa pada bawah permukaan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pemodelan reservoir menggunakan data *microgravity* pada daerah panas bumi?
2. Bagaimana interpretasi aliran fluida pada lapangan panas bumi X berdasarkan model data *microgravity*?
3. Bagaimana perhitungan perubahan massa berdasarkan pendekatan model perubahan densitas dan teori Potensial Gauss tahun 2015-2016 pada lapangan panas bumi X?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data *microgravity* lapangan panas bumi X tahun 2015 dan 2016.
2. Anomali perubahan gaya berat pada lapangan panas bumi X 20-70 μgal .
3. Perhitungan perubahan massa menggunakan pendekatan model perubahan densitas dan teori Potensial Gauss.
4. Inversi model menggunakan algoritma *Conjugate Gradient*.
5. Perhitungan keseimbangan produksi, reinjeksi, dan *natural recharge* menggunakan teori *Mass Balance*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memodelkan reservoir menggunakan data *microgravity* pada daerah panas bumi X tahun 2015-2016 menjadi model perubahan densitas
2. Menentukan tingkat efektifitas aliran fluida pada reservoir lapangan panas bumi X berdasarkan model data *microgravity*
3. Menghitung perubahan massa berdasarkan pendekatan model perubahan densitas dan teori Potensial Gauss tahun 2015-2016 pada lapangan panas bumi X

1.5 Manfaat

Dari hasil penelitian ini diharapkan adalah sebagai berikut.

1. Dapat mendukung metode geofisika lainnya dalam menggambarkan aliran fluida di reservoir lapangan panas bumi X
2. Sebagai acuan untuk mengetahui *mass balance* 2015-2016 pada lapangan panas bumi X

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Panas Bumi

Geothermal (panas bumi) berasal dari kata “geo” yang berarti bumi dan “thermal” yang berarti panas, sehingga *geothermal* dapat artikan sebagai panas yang berada di dalam bumi. Energi ini berasal dari aktivitas tektonik, peluruhan mineral radioaktif, serta dari energi matahari yang diserap oleh permukaan bumi. Sumber daya energi panas bumi yang terdapat di bawah permukaan diklasifikasikan menjadi 4 (empat) kategori, yaitu reservoir *hydrothermal*, reservoir *geopressured*, reservoir *hot dry rock* dan reservoir magma (DiPippo, 2012).

2.1.1 Reservoir *Hydrothermal*.

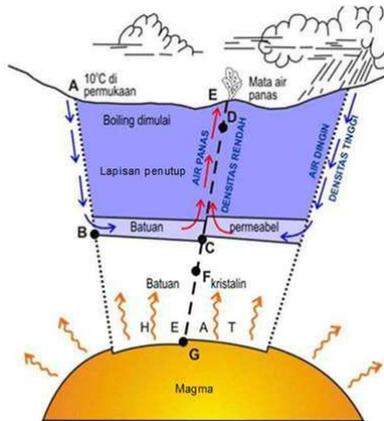
Reservoir yang seringkali ditemukan di Indonesia ini merupakan reservoir dengan batuan yang memiliki tingkat porositas dan permeabilitas yang baik, tergantung pada jenis batumannya, dikarenakan reservoir tersaturasi oleh fluida. Batuan ini berisi uap air atau air panas yang berada pada kedalaman yang mampu ditembus oleh lubang bor yaitu kurang dari 4 km. Pada reservoir ini, air berasal dari permukaan yang diperoleh dari air hujan (*natural recharge*) atau proses injeksi air. Air ini kemudian masuk karena adanya peretakan batuan melalui saluran pori-pori diantara butir-butir batuan. Air tersebut kemudian terakumulasi di dalam reservoir sampai penuh dan terpanaskan oleh batuan beku panas (*pluton*). Sebagai konsekuensi, maka temperatur air meningkat, tekanan meningkat dan air menjadi lebih ringan. Sebagian masih tetap berwujud air panas, namun sebagian lainnya telah berubah menjadi uap air. Sumber panasnya berasal dari hasil intrusi magma akibat tumbukan antar lempeng. Magma memindahkan panas ke batuan beku yang ditempatinya. Akibatnya panas dari magma tersebut dialirkan secara konduksi melalui batuan hingga panasnya merambat ke reservoir. Pada reservoir yang sudah berisi air, terjadilah arus konveksi sehingga memanaskan semua air di dalam reservoir tersebut. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas.

Menurut DiPippo (2012) terdapat lima hal yang sangat penting dimiliki oleh sistem hidrotermal yaitu: sumber panas yang besar, permeabilitas yang besar, berisi air dari permukaan, ditutup oleh lapisan yang impermeabel (*caprock*), dan memungkinkan terjadinya *recharge* (gambar 2.1). Lapangan panas bumi X termasuk lapangan panas bumi dengan reservoir *Hydrothermal*.

2.1.2 Reservoir *Geopressured*.

Lokasi reservoir ini lebih dalam dari pada reservoir *hydrothermal*, yaitu sekitar 2400 m – 9100 m. Reservoir ini memiliki kadar garam yang tinggi, tetapi memiliki temperatur yang rendah. Sistem ini berasosiasi dengan sistem

reservoir gas dan minyak yang dalam. Reservoir ini berisi air panas yang mengandung banyak sekali gas metana sehingga berada pada lingkungan yang gradien tekanannya lebih besar daripada gradien hidrostatik. Percobaan dalam skala laboratorium sudah dilakukan yaitu dengan memproduksi fluida tersebut ke permukaan. Kemudian gas metana dipisahkan dari air panasnya. Gas metana dibakar untuk memanasi air sehingga meningkatkan harga entalpi air.



Gambar 2.1 Perpindahan panas di bawah permukaan (White, D.E., Buffler, L.J.P., dan Truesdell, 1971), [gambar dimodifikasi]. Menggambarkan sistem panas bumi dengan reservoir *Hydrothermal*.

2.1.3 Reservoir *Hot Dry Rock*

Ini hampir tidak dapat disebut sistem karena hampir seluruh panas tersimpan pada batuan dengan kedalaman yang memiliki temperatur lebih besar dari 100° C. Reservoir ini memiliki kedalaman yang sangat dalam sehingga permeabilitasnya menjadi lebih kecil. Sumber panas yang tinggi dalam batuan impermeabel berasal dari intrusi magma atau gradien geothermalnya. Tidak terdapat fluida pada batuan yang impermeabel. Pemanfaatannya dilakukan dengan cara membor reservoir ini dengan membuat *artificial* reservoir (injeksi air dingin pada lapisan batuan panas yang impermeabel), kemudian dilakukan *hydraulic fracturing* (rekahan buatan) dimana air diinjeksikan dengan tekanan yang besar sehingga mengakibatkan rekahan di reservoir (Hochstein, P; Browne, 2000). Hal ini diupayakan untuk meningkatkan permeabilitas batuan.

2.1.4 Reservoir *Magma*.

Eksplotasi ini sangat berbahaya sehingga belum banyak yang mengkajinya. Caranya adalah dengan mencari reservoir yang berisi magma pada

kedalaman yang relatif dangkal kemudian mengambil magma tersebut dari sebuah sumur untuk memanasi *heat exchanger*.

2.2 *Microgravity*

Microgravity adalah pengukuran gravitasi yang dilakukan pada titik yang sama namun dalam waktu yang berbeda. Dari periode pengukuran yang berbeda dicari nilai selisih anomali gaya berat yang merupakan penyebab terjadinya dinamika fluida bawah permukaan (Fiyah dan Bahri, 2012).

Survei gravitasi dapat mendelineasi struktur bawah permukaan berupa zona patahan yang ditandai dengan kontras densitas rendah dan indikasi sumber panas yang ditandai dengan kontras densitas tinggi dengan batuan sekitarnya (Parapat dkk., 2018). Dalam prakteknya, metode gaya berat ini mempelajari perbedaan medan gravitasi dari satu titik terhadap titik observasi lainnya. Dengan demikian suatu sumber yang merupakan satu zona massa di bawah permukaan, akan menyebabkan satu gangguan dalam medan gravitasi. Gangguan medan gaya berat ini disebut sebagai anomali gaya berat. Karena perbedaan medan gaya berat ini relatif kecil maka diperlukan alat ukur yang mempunyai ketelitian cukup tinggi. Pada prinsipnya, metode ini digunakan karena kemampuannya membedakan densitas dari suatu sumber anomali terhadap densitas lingkungan sekitarnya. Dengan demikian dari variasi densitas dapat diketahui bentuk struktur bawah permukaan suatu daerah. Hal ini sering diperlukan untuk tahap eksplorasi selanjutnya. Sehingga metode gaya berat banyak digunakan pada tahap penelitian pendahuluan dalam suatu eksplorasi, baik dalam mencari minyak bumi maupun mineral (Jati dkk., 2009).

2.2.1 **Hukum Newton Tentang Gravitasi**

Gaya berat (*gravitational force*) diekspresikan dalam Hukum Newton yang merupakan dasar dari metode gravitasi. Hukum ini menyatakan bahwa gaya tarik menarik antara 2 partikel dengan masa m_1 dan m_2 berbanding langsung dengan perkalian massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat dari jarak pusat massa. Gaya ini dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}_1 \quad (2.1)$$

Dengan :

F = gaya pada m_2

\hat{r}_1 = vektor satuan dari m_1 ke m_2

r = jarak m_1 - m_2

G = Konstanta gravitasi universal ($6,6720 \times 10^{-11}$ N.m²/kg²)

Gravitasi adalah salah satu gaya lemah yang terdapat di alam. Dewasa ini orang mulai berpendapat bahwa nilai G tidak konstan, tapi menurun secara perlahan terhadap waktu. Banyak kemungkinan tentang konsekuensi dari variasi G tersebut. Salah satu adalah naiknya radius bumi terhadap waktu. Hal ini, jika benar, suatu saat akan merupakan hal penting dalam pengetahuan tentang sejarah geofisika bumi. Meskipun demikian, postulat tentang besarnya perubahan G , jika benar ada, adalah sangat kecil (sekitar 1 % sejak bumi terbentuk, $4,5 \times 10^9$ th.y.l) sehingga tidak mempunyai efek penting dalam metoda explorasi gaya berat.

2.2.2 Percepatan Gravitasi

Dari persamaan (2.1), percepatan dari m_2 yang disebabkan oleh adanya m_1 dapat dihitung dengan membagi F dengan m_2 . secara khusus, kalau m_1 adalah masa bumi Me , percepatan yang dialami suatu massa m_2 di permukaan bumi adalah :

$$g = \frac{F}{m_2} = G \frac{Me}{Re} \hat{r}_1 \tag{2.2}$$

Dengan:

- g = Percepatan Gravitasi (m/s^2)
- F = Gaya pada m_2 (N)
- Re = Jari – jari Bumi (m)
- Me = Massa Bumi (kg)
- \hat{r}_1 = Vektor satuan

Percepatan ini disebut percepatan gaya berat (*Acceleration of Gravity*) dan pertama kali diukur oleh Galileo dengan percobaannya yang terkenal di Pisa. Galileo telah menjatuhkan suatu benda dari puncak menara miring tersebut. Nilai gravitasi dipermukaan bumi adalah sekitar $9,8 \text{ m/s}^2$. Dalam SI unit, satuan gravity adalah $g.u$ (*gravity unit*) dimana $1 \text{ g.u} = 10^{-6} \text{ m/s}^2 = 10^{-1} \text{ gal}$.

2.2.3 Koreksi Data *Micorgravity*

Pembacaan gayaberat terhadap suatu titik di atas permukaan dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya akibat kesalahan sistematik alat, variasi topografi, variasi ketinggian, pasang surut, lintang dan variasi densitas bawah permukaan. Dari beberapa faktor tersebut, yang menjadi target utama adalah variasi densitas bawah permukaan, sehingga faktor-faktor lain yang terekam dalam pembacaan gayaberat perlu dihilangkan. Dengan kata lain nilai pembacaan gayaberat perlu dikoreksi terlebih dahulu, sehingga nilai gayaberat yang diukur benar-benar merepresentasikan anomali karena variasi densitas bawah permukaan.

2.2.3.1 Koreksi Pengaruh Pasang Surut

Koreksi ini disebabkan oleh karena pengaruh gaya tarik yang dialami bumi akibat massa bulan dan matahari. Harganya berubah-ubah setiap waktu secara periodik tergantung dari kedudukan benda-benda langit tersebut. Grafik pasang surut adalah besarnya gaya tarik pasang surut yang dialami oleh bumi. Grafik pasang surut dengan arah positif menunjukkan bahwa bumi mengalami tarikan dari posisi normalnya, sedangkan jika nilainya negatif maka hal ini menunjukkan bahwa bumi mengalami dorongan dari posisi normalnya. Koreksi pasang surut adalah koreksi yang harus diberikan kepada bumi untuk menyetimbangkan ke posisi normalnya. Koreksi pasang surut merupakan kebalikan dari nilai grafik pasang surut (Hendar Gunawan, 1985).

2.2.3.2 Perhitungan Koreksi Apungan (Drift)

Gravimeter biasanya dirancang dengan sistem keseimbangan pegas dan dilengkapi dengan massa (beban) yang tergantung bebas di ujungnya. Karena pegas tidak elastis sempurna, maka sistem pegas tidak kembali ke kedudukan semula. Koreksi karena sifat pegas ini disebut koreksi apungan (*Drift Correction*). Jadi koreksi apungan adalah koreksi yang disebabkan oleh sifat alat itu sendiri yang selalu menunjukkan perubahan harga setiap waktu yang dapat dianggap linear untuk waktu yang relatif pendek. Selain sifat tersebut koreksi apungan dapat juga disebabkan oleh gangguan alat (kejutan, sentakan) selama transportasi atau selama proses pengamatan di lapangan. Perhitungan koreksi apungan pada praktiknya dihitung pada setiap kisaran dengan waktu terpendek setelah dikoreksi dengan koreksi pasang surut bumi.

Untuk mengatasi kesalahan pembacaan gravimeter pada saat pengukuran nilai gravitasi maka perlu dilakukan sistem pengukuran tertutup (*looping*) pada *base station* dalam satu kali survei. Pada awal pengukuran diukur nilai gravitasi pada *base station* dan pada saat akhir survei dilakukan pengukuran ulang di *base station*. Dari sana dapat dibandingkan antara nilai awal dan nilai akhir. Perbedaan antara nilai awal dan nilai akhir ini disebabkan oleh kesalahan pembacaan gravimeter maka koreksi terhadap alat harus dilakukan. Secara matematis koreksi *drift* dapat dinyatakan sebagai berikut (Hendar Gunawan, 1985):

$$DC_B = \frac{g_A - g'_A}{t'_A - t_A} (t_B - t_A) \quad (2.3)$$

Dengan :

DC_B = koreksi drift pada stasiun B

g_A = harga gravitasi di *base* stasiun A pada waktu t_A

g'_A = harga gravitasi di *base* stasiun A pada waktu t'_A (saat penutupan)

- t'_A = waktu pengukuran di stasiun A (saat penutupan)
 t_A = waktu pengukuran di stasiun A (pada pengukuran awal)
 t_B = waktu pengukuran di stasiun B

2.3 *Forward Operator Microgravity*

Time-lapsed microgravity adalah metode gayaberat dengan waktu sebagai dimensi yang keempatnya, sehingga kita dapat mengamati kemungkinan adanya perubahan rapat massa dan geometri (bentuk) sumber bawah permukaan sebagai fungsi x , y , z dan t . Anomali *time-lapsed microgravity* didefinisikan sebagai selisih harga pembacaan gayaberat setiap stasiun pada waktu yang berbeda (Kadir, 1999).

Apabila tidak ada perubahan keadaan lingkungan sekitarnya maka anomali *time-lapsed microgravity* dipengaruhi oleh kemungkinan adanya perubahan elevasi dan perubahan massa bawah permukaan. Kadir (1999) mengungkapkan bahwa untuk benda 3 dimensi dengan distribusi rapat massa $\rho = (\alpha, \beta, \gamma)$, dengan efek gayaberat di titik $P(x, y, z)$ pada permukaan pada selang waktu tertentu (Δt) diberikan oleh :

$$\Delta g(x,y,z,\Delta t) = G \int_0^x \int_{-x}^x \int_{-x}^x \frac{\Delta \rho(\alpha,\beta,\gamma,\Delta t)(z-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (2.4)$$

Jika perubahan gayaberat untuk geometri tertentu misalnya pada prisma tegak maka persamaan (2.4) di atas dapat ditulis ulang menjadi persamaan (2.5) sebagai berikut :

$$\Delta g(x,y,z,\Delta t) = K \cdot \Delta \rho(x,y,z,\Delta t) \quad (2.5)$$

Dimana K adalah fungsi Green yang berhubungan dengan geometri dan volume benda anomali, sedangkan :

$$\Delta g(x,y,z,\Delta t) = g(x,y,z,t') - g(x,y,z,t) \quad (2.6)$$

Anomali gayaberat ini berhubungan langsung dengan adanya perubahan rapat massa yang diakibatkan oleh perubahan material yang mengisi volume pori sumber anomali pada selang waktu tersebut. Rapat massa yang didefinisikan dengan ρ merupakan perbandingan massa terhadap volume suatu benda.

Proses *forward modelling* akan menghasilkan respon perubahan nilai gravitasi. Respon tersebut kemudian dijadikan sebagai input dalam proses inversi untuk mendapatkan model perubahan densitas. Parameter inversi yang digu-

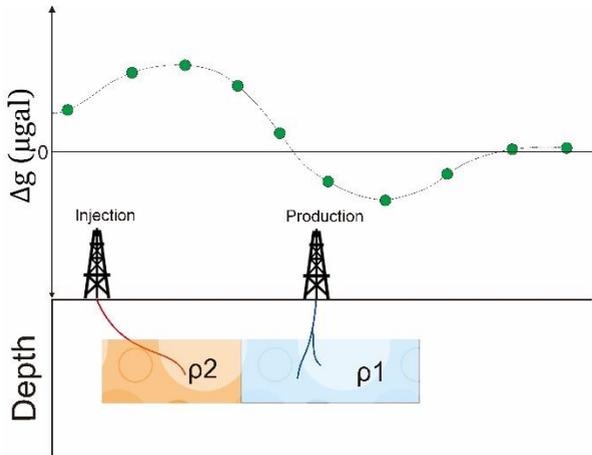
nakan adalah parameter inversi yang berhasil mengembalikan data sintetik gravitasi menjadi model yang menyerupai model pada *forward modelling*. (Grandis, 2009).

Algoritma yang digunakan dalam proses inversi adalah *conjugate-gradient*. *Conjugate-gradient* merupakan metode untuk meminimalkan suatu fungsi yang arah pencarian pertamanya mengambil arah penurunan tercuram (*steepest descent*). Metode ini menggunakan arah pencarian yang saling ortogonal serta gradien yang selalu diperbarui pada setiap langkah iterasi yang diawali oleh nilai awal masukan, sehingga pada setiap iterasi akan bergerak maju menuju penyelesaian yang optimal (Dezulfakar dkk., 2015).

2.4 Anomali Gravitasi

Distribusi rapat massa yang berbeda akan memberikan nilai medan gravitasi yang berbeda. Arah positif medan gravitasi bumi adalah menuju pusat bumi, jika terdapat anomali benda yang memiliki rapat massa yang sangat berbeda dengan rapat massa di sekitarnya, maka akan terjadi penyimpangan arah medan gravitasi. Resultan dari variasi arah penyimpangan medan gravitasi disebut sebagai anomali gravitasi (Δg). Anomali gravitasi adalah selisih nilai gravitasi pengamatan dengan gravitasi normal di posisi tersebut di permukaan bumi. Anomali gravitasi terjadi akibat adanya variasi rapat massa yang berbeda. Dalam *microgravity*, distribusi anomali gravitasi ini dapat berubah dalam interval waktu tertentu dari perubahan setiap menit sampai periode tahunan. (Hunt, 2000), perubahan distribusi anomali gravitasi sebagai fungsi waktu ini dapat disebabkan oleh:

1. Perubahan massa, misalnya disebabkan adanya eksploitasi baik dari reservoir geothermal maupun minyak dan gas. Sehingga karena ada sebagian massa yang terproduksi keluar, maka massa dalam reservoir tersebut mengalami penurunan (gambar 2.2).
2. Variasi tingkat kedalaman untuk *shallow groundwater*, misalkan terjadi penurunan kedalaman muka air tanah.
3. Variasi dalam kelembaban tanah, misalkan disebabkan oleh perubahan tingkat curah hujan, tingkat evaporasi atau tingkat penyerapan air tanah dan tanaman.
4. Perubahan topografi, misalkan pembuatan jalan atau bendungan yang dapat menyebabkan perubahan gravitasi secara signifikan.
5. Penurunan muka tanah atau *ground subsidence*.
6. Gunung api aktif dapat menyebabkan perubahan anomali gravitasi sampai dengan 400 *microgal* disebabkan aktifitas magma.
7. Operasi tambang mineral dapat menyebabkan perubahan anomali gravitasi karena ada sebagian besar massa yang hilang karena proses eksploitasi tambang mineral.



Gambar 2.2 Perubahan nilai gravitasi akibat proses produksi dan reinjeksi. Δg positif menggambarkan adanya penambahan massa sedangkan Δg menggambarkan adanya pengurangan massa yang terjadi di bawah permukaan.

Dalam monitoring reservoir geothermal, perubahan nilai medan gravitasi yang ingin diamati adalah karena pengaruh perubahan massa dalam reservoir. Perubahan nilai medan gravitasi yang ada harus dikoreksi dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi perubahan nilai medan gravitasi, seperti faktor perubahan tingkat kedalaman groundwater, kelembaban tanah, topografi dan penurunan muka tanah. Perhitungan anomali *microgravity* antar waktu dilakukan dengan mengurangi nilai gravitasi observasi, anomali Bouguer sederhana ataupun anomali Bouguer lengkap tergantung dari perubahan yang terjadi di daerah tersebut. Anomali Bouguer lengkap merupakan selisih antara nilai gravitasi pengamatan dengan gravitasi teoritik yang didefinisikan pada titik pengamatan bukan pada bidang referensi, baik ellipsoid maupun muka laut rata-rata (Sarkowi dkk., 2005). Pada penelitian ini, nilai anomali *time-lapse microgravity* dicari dengan menghitung selisih nilai gravitasi observasi antara beberapa tahun tertentu. Anomali dalam reservoir panas bumi diakibatkan oleh dua hal, yakni akibat perubahan di permukaan dan akibat perubahan bawah permukaan. Dalam hal ini yang dicari adalah perubahan di bawah permukaan (pergerakan massa) akibat adanya proses produksi dan injeksi (gambar 2.2).

Dengan Δg anomali *time-lapse microgravity*, $\Delta \rho$ perubahan densitas fluida panas bumi. Efek gravitasi akibat perubahan massa (rapat-massa) pada reservoir panasbumi didapatkan dengan mengoreksikannya dengan efek gravitasi akibat perubahan muka airtanah dan pergerakan tanah vertikal. Dengan ketentuan, penurunan nilai gravitasi (-) berkenaan dengan pengurangan massa (*discharge*) dan penurunan muka airtanah (*groundwater level lowering*) dan

kenaikan nilai gravitasi (+) berkenaan dengan penambahan massa (*recharge*) dan kenaikan muka airtanah (*groundwater level upheaval*). Penurunan nilai gravitasi (-) berkenaan dengan penurunan muka tanah (*subsidence*) dan kenaikan nilai gravitasi (+) berkenaan dengan kenaikan muka tanah (*inflation*).

2.5 Perubahan Massa Akibat Produksi dan Reinjeksi

Panas bumi dapat dimanfaatkan menjadi energi ketika tekanan dan suhu fluida yang keluar dari bawah permukaan bumi memutar turbin pada pembangkit listrik. Hal ini menyebabkan adanya perpindahan fluida dari bawah permukaan menuju ke permukaan. Tentunya massa yang sebelumnya ada di bawah permukaan akan mengalami perubahan. Massa berubah, akan menyebabkan densitas berubah.

Pori batuan yang sebelumnya diisi oleh fluida atau memiliki saturasi (S) tertentu akan mengalami perubahan. Hubungan densitas (ρ) dan porositas (ϕ) adalah sebagai berikut (Sumardi, 2005).

$$\rho_{rata-rata} = (\rho_{air} \times S_{air}) + (\rho_{uap} \times S_{uap}) \quad (2.7)$$

Dengan

$$\Delta\rho = \rho_{rata-rata} \times Porositas (\phi) \quad (2.8)$$

Hasil dari ΔM adalah jumlah massa yang hilang (*mass loss/gain*) di suatu daerah tertentu pada rentang waktu tertentu berdasarkan survei *microgravity*. Metode ini dapat menggambarkan perubahan massa dengan sangat baik karena secara sendirinya dapat memberikan asumsi besarnya densitas fluida, kedalaman produksi, permeabilitas dan porositas. Namun semuanya kembali ke tingkat akuratan dan presisi dari alat, *error* yang terjadi, dan jumlah data.

Hubungan antara massa dari batuan (M) dan perubahan gravitasi digambarkan dalam teori Potential Gauss (Hammer, 1945; La Fehr, 1965):

$$M = \frac{1}{2\pi G} = \iint_p g da \quad (2.9)$$

Persamaan ini sering digunakan pada pertambangan untuk mendeteksi anomali massa yang dideteksi pada anomali Bouger maupun Residual. Persamaan tersebut dapat diturunkan (Hunt, 1970) untuk mengidentifikasi perubahan massa (ΔM) dan dihubungkan dengan perubahan gravitasi:

$$\Delta M = \frac{1}{2\pi G} \iint dg da \quad (2.10)$$

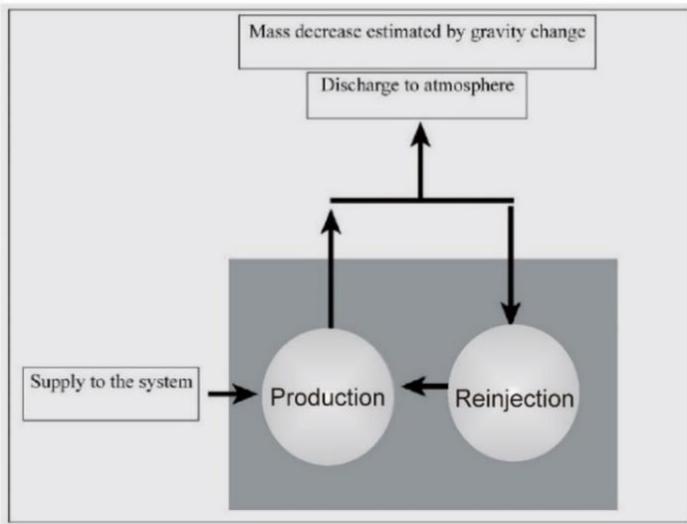
Bentuk integral ini dapat disederhanakan menjadi bentuk penjumlahan, sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta M = \frac{1}{2\pi G} \Sigma \Delta g \Delta a \tag{2.11}$$

Jika massa yang diambil dari bawah permukaan melalui sumur (M_w), dan segala massa yang keluar dari bawah permukaan secara natural adalah M_t maka dapat diketahui jumlah *recharge* yang mestinya diinjeksikan kembali melalui sumur reinjeksi untuk menjaga kestabilan bawah permukaan (gambar 2.3). Persamaannya adalah sebagai berikut

$$\Delta M = (M_w + M_t) - (R + I) \tag{2.12}$$

I adalah jumlah fluida yang masuk kebawah permukaan secara natural (berdasarkan curah hujan).

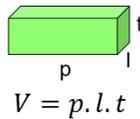
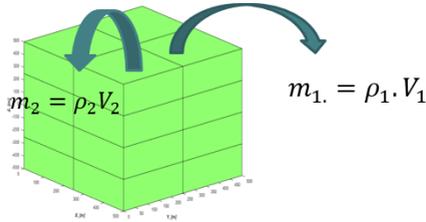


Gambar 2.3 Perubahan massa pada industri panas bumi [gambar dimodifikasi] (Jun Nishijima dkk., 2010). Pengukuran *microgravity* menjadi kegiatan tahunan yang rutin dilakukan untuk melakukan monitoring fluida yang diproduksi dan direinjeksikan.

Nilai perubahan massa dihitung menggunakan 2 pendekatan. Pertama adalah dengan menggunakan pendekatan model perubahan densitas yaitu massa

sama dengan densitas dikali dengan volume (gambar 2.4). Jadi model yang tersusun atas *mesh* dihitung nilai massanya kemudian dijumlahkan (persamaan 2.13).

$$m_t = \sum_{x=1}^n \rho_x V_x \tag{2.13}$$



Gambar 2.4 Estimasi perubahan massa menggunakan pendekatan model perubahan densitas. Model perubahan densitas yang dibuat adalah kumpulan dari *mesh* yang berbentuk balok dengan dimensi tertentu dan memiliki volume. Tiap *mesh* memiliki nilai perubahan densitas ($\Delta\rho$).

Kedua adalah menggunakan Potential Gauss. Dalam prakteknya. Persamaan Potential Gauss dilakukan secara numerik dengan membuat *grid* pada peta perubahan gravitasi kemudian mengestimasi rata-rata perubahan per kotak pada *grid* lalu dijumlahkan (persamaan 2.14).

$$\Delta M = \frac{\sum \Delta g \Delta a}{2\pi G} \tag{2.14}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

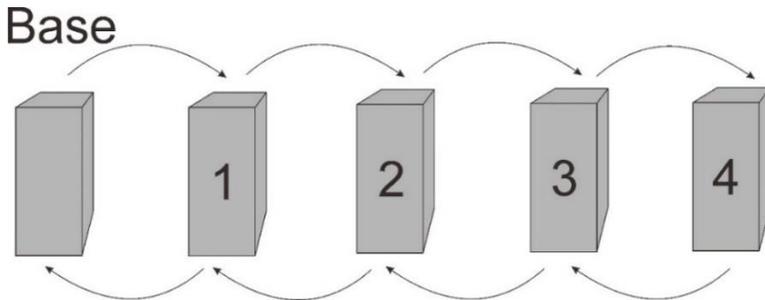
BAB III METODOLOGI

3.1 Data

Data yang digunakan pada penelitian ini tugas akhir ini adalah

1. Data produksi dan reinjeksi lapangan panas bumi X
2. Data pengukuran *microgravity* lapangan panas bumi X periode 2015-2016 dengan jumlah 86 titik pengukuran

Gravitasi pada satu titik mengalami perubahan yang kecil. Rentang perubahan yang digunakan dalam pengukuran *microgravity* adalah hingga ketelitian 10 μgal . Jika dalam produksi panas bumi menarik fluida dengan rata-rata 30 Mton per tahun, maka perubahan yang terjadi adalah sebesar 30 μgal (Oka dkk., 2011). Oleh karena itu, perlu dilakukan *quality controll* pada data *microgravity* untuk mendapatkan nilai yang menggambarkan perubahan gravitasi yang valid. Pengukuran dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal yang dapat mempengaruhi nilai gravitasi pada titik pengukuran seperti halnya curah hujan, kondisi *base*, juga hal-hal lainnya. Data yang digunakan adalah data *microgravity* pada tahun 2015-2016 dengan sistem pengukuran *looping* dengan pengulangan. Hal ini dilakukan untuk menjaga tingkat presisi data yang diambil dan mengurangi nilai koreksi apungan yang besar, sehingga menghasilkan data yang valid (gambar 3.1).



Gambar 3.1 *Looping* pengukuran *microgravity*. Pengukuran dimulai dari *base* kemudian ke titik pengukuran lainnya (1,2,3,4,3,2,1) dan kembali ke *base*. Hal perlu dilakukan untuk mengurangi efek kemelaran pegas pada alat pengukuran sehingga mendapatkan data yang lebih valid dengan menggunakan koreksi apungan.

3.2 Perangkat Lunak

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dua pengolahan. Pertama, pengolahan data sintetik hasil *forward modelling* untuk mendapatkan parameter inversi dan yang kedua adalah menginversi data riil pengukuran menggunakan

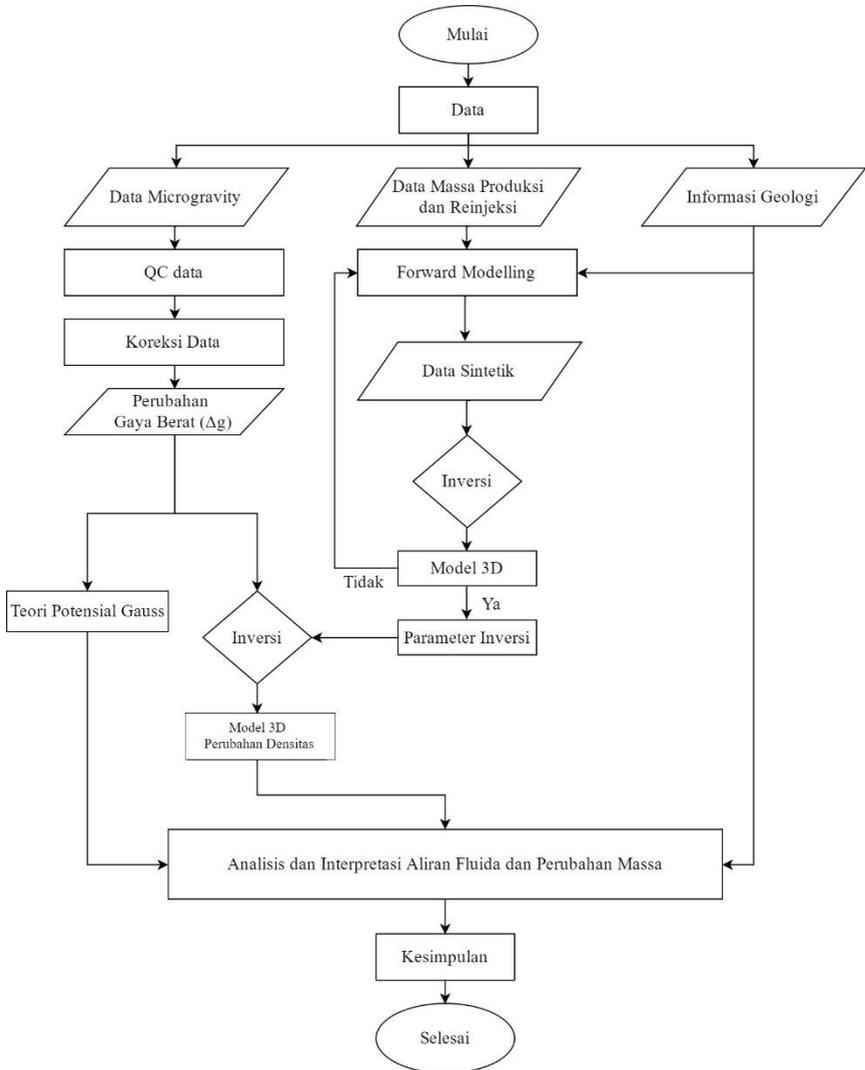
parameter inversi pada data sintetik untuk memperoleh model *microgravity* pada zona reservoir. Tabel 3.1 menerangkan daftar dan fungsi perangkat lunak digunakan untuk mendukung pengolahan data pada penelitian tugas akhir.

Tabel 3.1 Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian

PERANGKAT LUNAK	KETERANGAN
Ms.Excel	Menghitung nilai koreksi pengukuran, <i>plotting</i> grafik, dan <i>quality control</i> data
MATLAB	Melakukan kalkulasi nilai perubahan massa, permodelan reservoir, <i>gridding</i> , dan visualisasi model
Surfer	<i>Gridding</i> dan visualisasi map perubahan gravitasi

3.3 Metodologi Penelitian

Berikut merupakan diagram alir dari pengerjaan tugas akhir ini.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian. Terdapat 3 data utama yaitu data *microgravity* (data pengukuran metode gaya berat *time-lapsed*), data massa produksi dan reinjeksi tahun 2015-2016, dan informasi geologi berupa keadaan reservoir lapangan panas bumi X.

Pengerjaan penelitian ini menggunakan tiga komponen data utama yaitu

1. Data *microgravity*

Data hasil pengukuran nilai gravitasi daerah lapangan panas bumi X periode 2015-2016 dengan tingkat ketelitian mencapai 10 μ gal

2. Data massa produksi dan reinjeksi

Meliputi data produksi dan reinjeksi 2015-2016 yang dihitung tiap akhir tahun. Data ini menjadi input data pada proses *forward modelling* dan interpretasi keseimbangan massa pada reservoir.

3. Informasi geologi

Meliputi nilai porositas, temperatur reservoir, saturasi dan dimensi reservoir. Jenis batuan pada daerah penelitian mempengaruhi karena perubahan densitas yang terjadi diidentifikasi sebagai akibat dari penambahan dan pengurangan fluida oleh proses.

Data *microgravity* dilakukan *quality control* untuk mendapatkan data yang valid dan dapat digunakan. Lalu dilakukan koreksi pada data. Selanjutnya dilakukan pengurangan antara data pengukuran tahun 2016 dengan tahun 2015 untuk mendapatkan data perubahan nilai gravitasi (Δg). Δg digunakan sebagai input dalam proses inversi untuk mendapatkan model perubahan densitas pada reservoir dan digunakan untuk perhitungan perubahan massa pada teori Potensial Gauss.

Data massa produksi dan reinjeksi dan informasi geologi menjadi input pada proses *forward modelling*. *Forward modelling* menghasilkan data sintetik perubahan nilai densitas yang kemudian akan diinversikan. Model perubahan densitas kemudian dicocokkan kembali ke model awal. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan parameter inversi yang dapat mengembalikan data sintetik menjadi model perubahan densitas sehingga dapat digunakan untuk menginversi data *microgravity* hasil pengukuran.

Output yang dihasilkan merupakan model perubahan densitas dan hasil perhitungan perubahan massa. Dari model dapat digunakan untuk mengidentifikasi arah aliran fluidanya sedangkan hasil perhitungan perubahan massa akan digunakan untuk menghitung keseimbangan massa pada reservoir.

3.4 Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

3.4.1 Quality Controll

- Pertama, dilakukan pengumpulan dan pengelompokan data berdasarkan waktu pengambilan data

- Kedua, dilakukan penghitungan standar deviasi. Dari data yang tersedia kemudian dipilih 5 data pengukuran dengan standar deviasi dibawah 0,02 (*repeatability* baik)
- Ketiga, dilakukan koreksi apungan dan koreksi elevasi. Nilai koreksi apungan melebihi $\pm 0,035$ tidak digunakan karena diindikasikan menjadi data yang tidak valid.

3.4.2 *Forward Modelling*

Forward modelling merupakan suatu metode untuk menghasilkan respon dari parameter yang diinginkan yaitu perubahan nilai gravitasi dari model yang dibuat. Nilai tersebut diperoleh menggunakan parameter *forward modelling* (pers.2.4). Model yang dibuat pada penelitian tugas akhir ini memiliki dimensi yang sama dengan resevoir lapangan panas bumi X. Adapun parameter yang dimasukkan dalam model dituangkan dalam tabel 3.2

Tabel 3.2 Parameter model berdasarkan kondisi reservoir lapangan panas bumi X

PARAMETER	NILAI
Ukuran <i>mesh</i>	250 x 250 x 250 m
Temperatur awal reservoir	290 ⁰ C
Temperatur akhir reservoir	291 ⁰ C
Porositas	3 %
Saturasi air	80 %

3.4.3 *Inversi Data Sintetik*

Respon hasil *forward modelling* kemudian diinversikan untuk menghasilkan model. Model tersebut kemudian dibandingkan dengan model inisiasi awal. Jika model tersebut telah memiliki nilai kemiripan densitas ± 10 % maka parameter penginversi tersebut dianggap valid untuk melakukan inversi pada data riil.

3.4.4 *Inversi Data Riil*

Inversi yang dilakukan adalah dengan menginput data riil perubahan nilai gravitasi pada lapangan panas bumi X periode 2015-2016 dengan parameter inversi yang diperoleh dari inversi data sintetik.

3.5 Interpretasi Model

3.5.1 Analisis Perubahan Densitas

Rentang waktu antara 2016 hingga 2017 dapat diasumsikan tidak mengalami perubahan litologi batuan. Perubahan nilai densitas yang teridentifikasi pada pengukuran *microgravity* disebabkan oleh proses produksi dan reinjeksi panas bumi daerah penelitian. Sehingga yang menjadi fokus adalah perubahan densitas pada reservoir.

3.5.2 Analisis Aliran Fluida

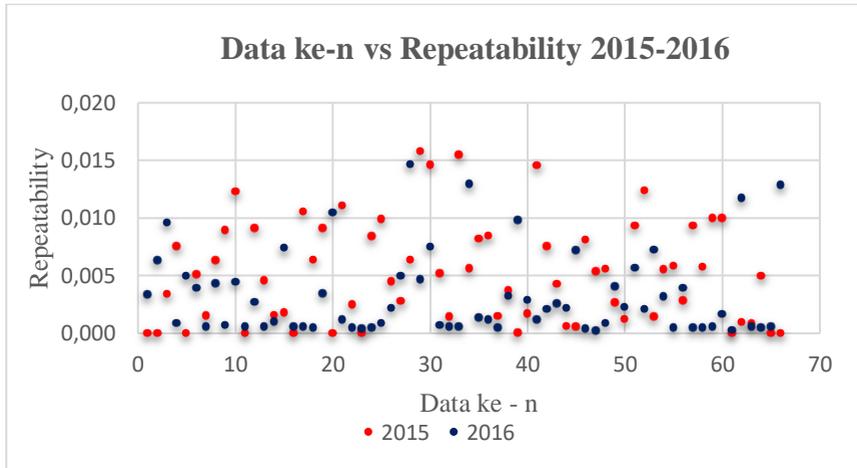
Pada sistem panas bumi diharapkan bahwa fluida yang diinjeksikan kembali ke bawah permukaan mencapai reservoir untuk mengembalikan massa yang berkurang akibat proses produksi. Namun pada kenyataannya tidak semua fluida yang diinjeksikan langsung menuju reservoir. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh beberapa faktor contoh permeabilitas pada *recharge area*, arah patahan, termasuk jumlah dari fluida yang hendak diinjeksikan.

Dengan melakukan permodelan *microgravity* dapat diperoleh sebaran perbedaan densitas pada daerah penelitian. Daerah yang mengalami peningkatan densitas diasumsikan mengalami penambahan massa dengan demikian dapat disimpulkan bahwa terdapat aliran fluida pada daerah tersebut. Dengan metode ini juga dapat digunakan untuk mendeteksi patahan-patahan pada daerah penelitian. Bahkan jika dikombinasikan dengan data *microearthquake* data *microgravity* akan menggambarkan aliran fluida serta arahnya.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil *Quality Control* Data

Setelah dilakukan *quality control* pada data pengukuran *microgravity* lapangan panas bumi X kemudian dihitung nilai standar deviasinya. Hasil perhitungan nilai standar deviasi data pengukuran tertuang dalam grafik 4.1.



Grafik 4.1 Plot perhitungan standar deviasi dengan nilai di bawah 0,02. Sumbu x menggambarkan data ke-n dan sumbu y hasil dari perhitungan standar deviasi yang didefinisikan sebagai *repeatability*

Grafik 4.1 merupakan hasil dari perhitungan standar deviasi. Nilai standar deviasi menunjukkan tingkat *repeatability* pengukuran. Semakin kecil nilai standar deviasinya, semakin baik tingkat *repeatability*. Data titik pengukuran dengan nilai standar deviasi di bawah 0,02 digunakan menjadi data pada proses pengolahan. Data yang tertuang telah dikoreksi pasang surut secara otomatis oleh alat (SCIENTREX CG-5).

Setelah didapatkan data pengukuran yang memiliki *repeatability* yang baik, kemudian dilakukan koreksi apungan. Koreksi apungan merupakan koreksi yang dilakukan akibat kemelaran pegas terhadap waktu pengukuran. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.3. *Base* pengukuran berada di BMKG setempat yang berjarak ± 40 km dari zona reservoir. Penentuan *base* ikat sangat menentukan dalam efektifitas waktu pengukuran dan banyaknya *looping*. Untuk menentukan *base* ikat perlu diperhatikan beberapa hal yaitu jarak, letak, dan keterpengaruhannya terhadap zona reservoir. *Base* ikat yang terlalu dekat dengan zona reservoir akan memberikan nilai yang jauh berbeda tiap waktu pengukuran

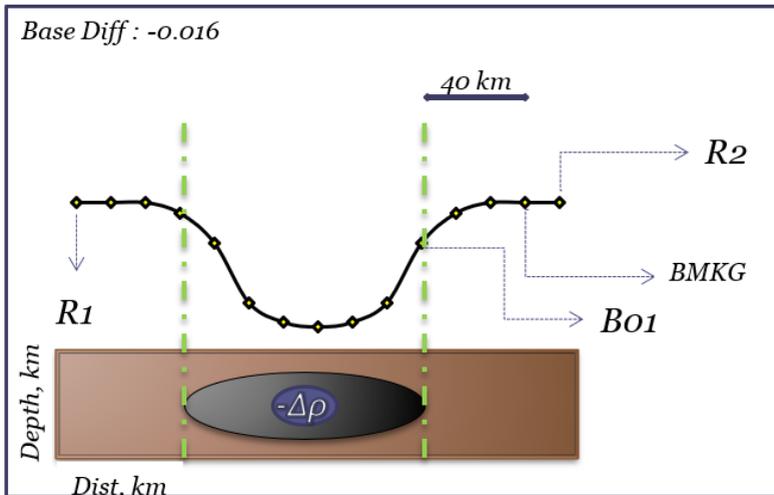
karena nilai gravitasi sendiri akan berubah seiring berubahnya massa bawah permukaan.

Untuk memaksimalkan waktu pengukuran dan tingkat presisi data, *base* diikat di titik B01. Hasil pengukuran pada *base* (BMKG) dan *base* ikat (B01) disajikan dalam tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil pengukuran pada *base* dan *base* ikat

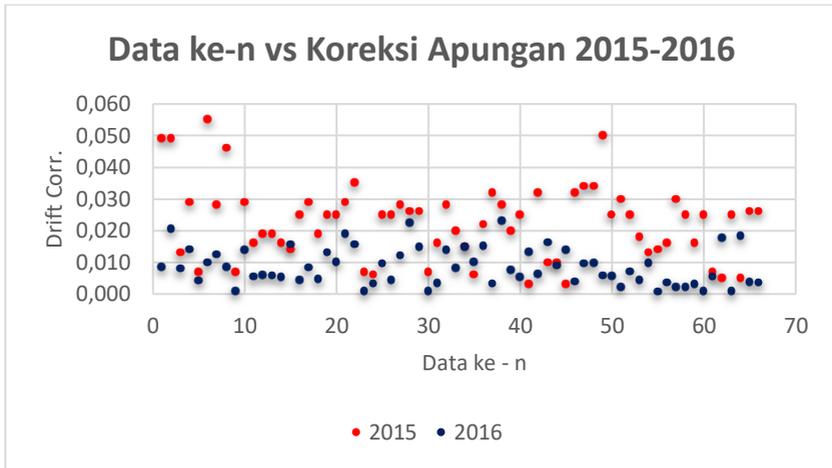
Stasiun	2015 (mgal)	2016 (mgal)
BMKG	978185,971	978185,971
B01	978043,113	978043,129

Dari hasil pengukuran diketahui bahwa nilai gravitasi pada *base* tidak mengalami perubahan pada 2 periode yang berbeda. Sedangkan pengukuran pada *base* ikat (B01) mengalami perbedaan sebesar 0,016. Hal ini dikarenakan titik B01 masih terpengaruh oleh zona reservoir (gambar 4.1). Sehingga dalam perhitungan perubahan nilai gravitasi akan mengubah nilainya sebesar selisih pengukuran.



Gambar 4.1 Gambaran posisi *base* dan *base* ikat terhadap zona reservoir. Penentuan titik B01 (*base* ikat) mempertimbangan mobilisasi saat pengukuran agar menghemat waktu pengukuran dan B01 harus memiliki nilai pengukuran gravitasi yang tidak dipengaruhi oleh perubahan massa akibat produksi dan reinjeksi.

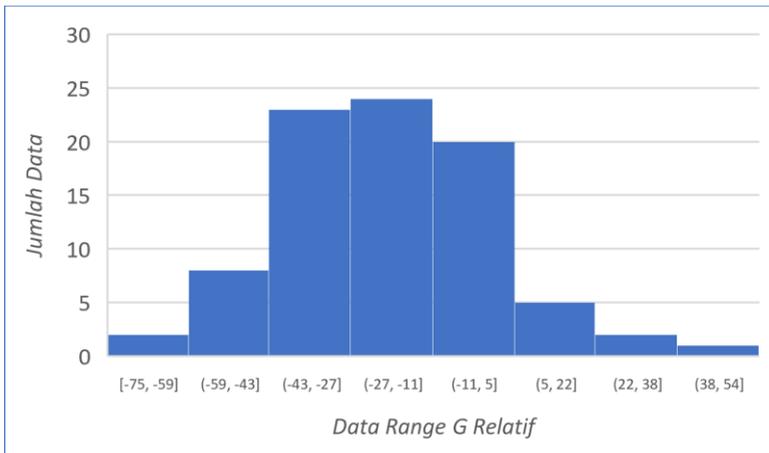
Kemudian hasil koreksi apungan kemudian diplot dalam grafik (grafik 4.2). Dari hasil plot diketahui bahwa data tahun 2015 memiliki koreksi apungan yang lebih besar dibandingkan dengan data tahun 2016. Data tersebut masih dianggap valid, karena nilai *repeatability* yang baik.



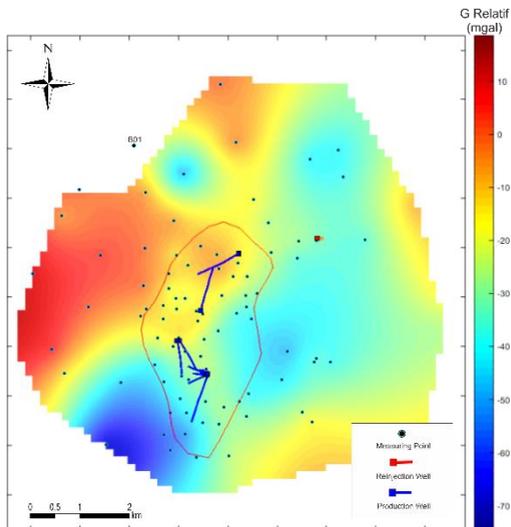
Grafik 4.2 Plot besar nilai koreksi apungan tahun 2015 dan 2016

4.2 *Gridding* Data Riil

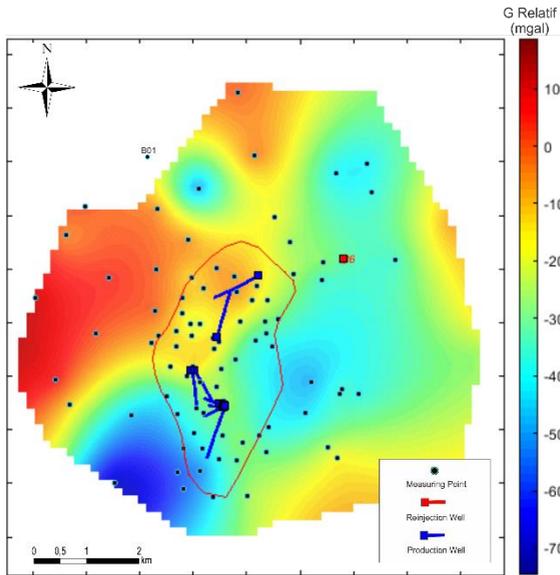
Nilai koreksi kemudian dijumlahkan dengan nilai pengukuran. Nilai tersebut kemudian di-*gridding* dengan metode *gridding kriging*. *Kriging* merupakan suatu teknik perhitungan untuk estimasi dari suatu variabel terregional yang menggunakan pendekatan bahwa data yang dianalisis dianggap sebagai suatu realisasi dari suatu variabel acak, dan keseluruhan variabel acak yang dianalisis tersebut akan membentuk suatu fungsi acak menggunakan model struktural variogram. *Kriging* adalah suatu metode geostatistika yang memanfaatkan nilai spasial pada lokasi tersampel dan variogram untuk memprediksi nilai pada lokasi lain yang belum dan/atau tidak tersampel dimana nilai prediksi tersebut tergantung pada kedekatannya terhadap lokasi tersampel. Pada penerapannya, *kriging* dibawah asumsi kestasioneran dalam rata-rata (μ) dan varians (σ^2), sehingga jika asumsi kestasioneran tersebut dilanggar maka *kriging* menghasilkan nilai prediksi yang kurang presisif. Grafik 4.3 merupakan histogram persebaran data hasil pengukuran G relatif tahun 2016. Dari histogram tersebut dapat disimpulkan bahwa data hasil pengukuran memiliki nilai dengan variasi data yang kecil dengan data yang dominan pada kisaran $-27 \mu\text{gal}$ hingga $11 \mu\text{gal}$. Jika dilihat dari histogram, data pengukuran merupakan data stasioner yang dapat di-*gridding* menggunakan metode *kriging*.



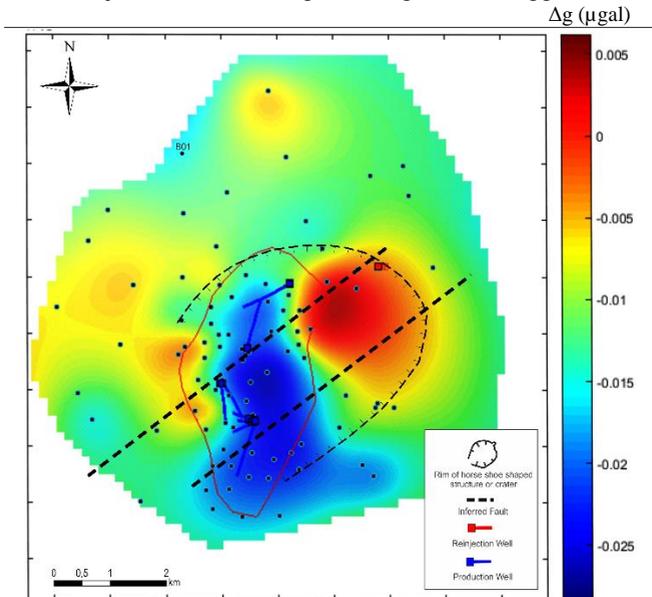
Grafik 4.3 Histogram G relatif pengukuran tahun 2016. Sumbu X merupakan nilai pengukuran dan sumbu Y adalah jumlah data. Data pengukuran tidak memiliki persebaran data yang terlalu luas atau variatif. Persebaran data pengukuran menunjukkan data yang stasioner.



Gambar 4.2 Gridding data pengukuran 2015. Daerah dengan warna biru menggambarkan nilai gravitasi yang rendah sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan daerah dengan nilai gravitasi tinggi.



Gambar 4.3 *Gridding* data pengukuran 2016. Warna biru menggambarkan nilai gravitasi yang rendah sedangkan daerah dengan warna merah menunjukkan daerah dengan nilai gravitasi tinggi.



Gambar 4.4 *Gridding* data nilai perubahan gravitasi. Sekilas tidak terlihat perbedaan antara *gridding* data pengukuran 2015 dengan 2016 namun setelah diselisihkan terdapat perbedaan dalam skala μgal .

Hasil dari *gridding* data tahun 2016 tertuang dalam gambar 4.2 dan hasil data *gridding* data tahun 2015 tertuang dalam gambar 4.3. Dari hasil *gridding* tidak terlalu terlihat adanya perbedaan atau perubahan nilai gravitasi pada zona reservoir dikarenakan memang perubahannya hanya berkisar 10 hingga -70 μgal . Jika nilai pengukuran 2016 dikurangkan dengan nilai pengukuran tahun 2015 diperoleh nilai perubahan gravitasi.

4.3 Forward Modelling Data Sintetik

4.3.1 Perhitungan Densitas

Dengan menggunakan parameter pada tabel 3.2 maka densitas pada keadaan I dapat dihitung menggunakan prinsip termodinamika. Perhitungannya adalah sebagai berikut.

Dengan estimasi temperatur adalah 290°C kemudian mengalami kenaikan suhu akibat proses produksi sebesar 1°C , saturasi air 80 %, porositas 3 % (496 *mesh* pada zona reservoir) maka :

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= 250 \times 250 \times 250 \text{ m} \\ \text{Volume total} &= 7,75 \times 10^9 \text{ m}^3 \\ \text{Volume fluida} &= \emptyset \times \text{Volume total} \\ \text{Volume fluida} &= 2,325 \times 10^8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Untuk temperatur 290°C (*steam table*) nilai volume spesifik (v_f):

$$v_f = 0,001366 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0,0255 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Dengan menggunakan data pada *steam table*, maka dapat diperoleh massa air dan uap.

$$\text{massa air} = \frac{V_f}{v_w} = \frac{2,325 \times 10^8 \text{ m}^3}{0,001366 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1,7 \times 10^{11} \text{ kg}$$

$$\text{massa uap} = \frac{V_u}{v_g} = \frac{2,325 \times 10^8 \text{ m}^3}{0,0255 \text{ m}^3/\text{kg}} = 9,12 \times 10^9 \text{ kg}$$

Sehingga dapat diperoleh besar densitas air dan uap:

$$\rho_{air} = \frac{m}{v} = 732,06 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\rho_{uap} = \frac{m}{v} = 39,21 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Dari persamaan 2.7 diperoleh nilai densitas fluida

$$\rho_{rata-rata} = (\rho_{air} \times S_{air}) + (\rho_{uap} \times S_{uap})$$

$$\rho_{rata-rata} = (732,06 \times 0,8) + (39,21 \times 0,2)$$

$$\rho_{rata-rata} = 593,49 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Keadaan II terjadi perubahan temperatur sehingga mempengaruhi nilai densitasnya. Meningkatnya temperatur mengakibatkan penurunan densitas akibat perubahan fase dari *liquid* menjadi gas, juga sebaliknya.

Untuk temperatur 291°C berdasarkan hasil interpolasi:

$$v_f = 0,001366 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0,0255 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Dengan asumsi bahwa tidak terdapat perubahan porositas, sehingga volume tetap, maka:

$$\text{massa air} = \frac{V_f}{v_w} = \frac{2,325 \times 10^8 \text{ m}^3}{0,00137 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1,7... \cdot 10^{11} \text{ kg}$$

$$\text{massa uap} = \frac{V_u}{v_g} = \frac{2,325 \cdot 10^8 \text{ m}^3}{0,0251 \text{ m}^3/\text{kg}} = 9,12... \cdot 10^9 \text{ kg}$$

$$\rho_{air} = \frac{m}{V} = 729,9 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{uap} = \frac{m}{V} = 39,8 \text{ kg/m}^3$$

Dengan menggunakan persamaan 2.7 maka diperoleh:

$$\rho_{rata-rata} = (\rho_{air} \times S_{air}) + (\rho_{uap} \times S_{uap})$$

$$\rho_{rata-rata} = (729,9 \times 0,8) + (39,8 \times 0,2)$$

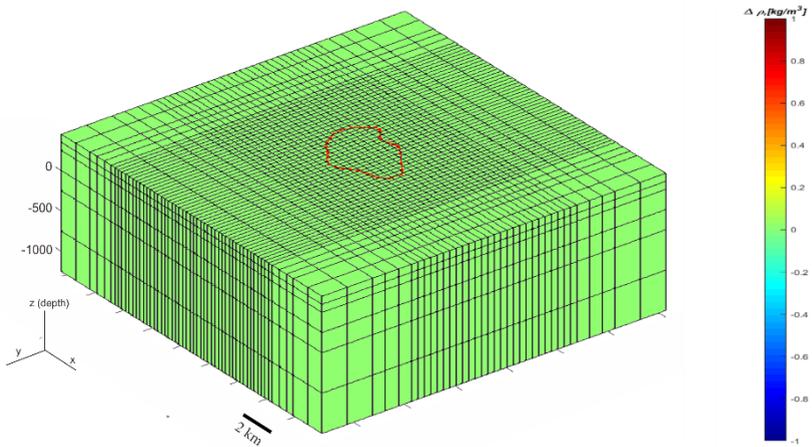
$$\rho_{rata-rata} = 591,9 \text{ kg/m}^3$$

Jadi, terdapat penurunan densitas sebesar 1,6 kg/m³ pada zona reservoir. Untuk perubahan densitas pada daerah produksi diinisiasikan sebesar -1,6 kg/m³ sedangkan pada daerah reinjeksi diinisiasikan dengan asumsi bahwa reinjeksi dapat mengembalikan densitas ke nilai semula, yaitu sekitar -1,5 kg/m³.

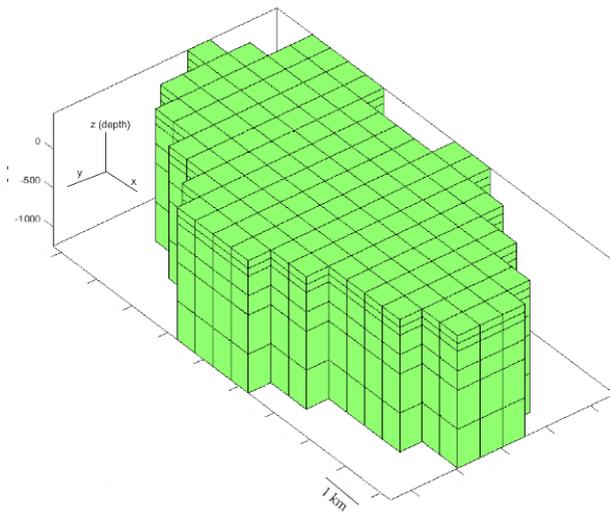
4.3.2 Model Inisial

Inisial model inisial yang digunakan (gambar 4.5) merupakan daerah yang meliputi zona *proven*, reservoir, dan titik pengukuran. Zona *proven* merupakan daerah produksi uap pada suatu lapangan panas bumi dan dalam penelitian ini menjadi inisial model pada proses inversi. Zona reservoir lapangan panas bumi X yang menjadi lokasi penelitian tugas akhir ini memiliki dimensi 5 x 9,5 x 1 km (gambar 4.6).

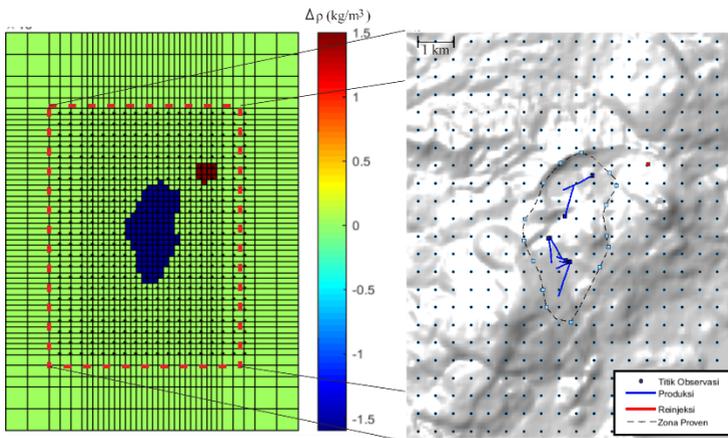
Untuk *forward modelling*, titik pengukuran dikondisikan dalam bentuk *grid* dengan spasi antar titik sebesar 500 m (gambar 4.7).



Gambar 4.5 Model inisial inversi. Tersusun atas *mesh* dengan ukuran tertentu. Untuk daerah *proven* merupakan *mesh* dengan panjang dan lebar sebesar 250 m, dan kedalamannya diatur secara otomatis sebagai efek dari *depth smoothing*. Garis merah merupakan batas dari daerah reservoir.



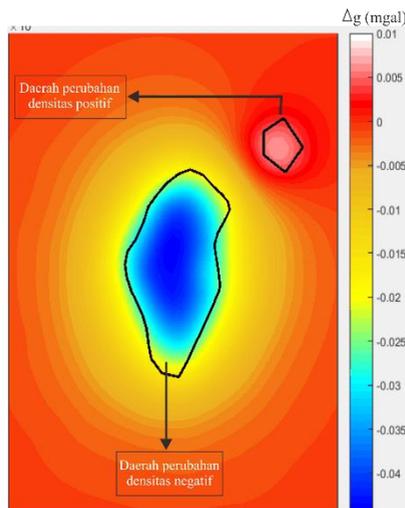
Gambar 4.6 Zona reservoir, berasal dari tumpukan *mesh* yang disusun membentuk zona reservoir lapangan panas bumi X. Zona reservoir lapangan panas bumi X yang menjadi lokasi penelitian tugas akhir ini memiliki dimensi 5 x 9,5 x 1 km



Gambar 4.7 Sebaran titik *forward modelling*. *Mesh* dengan warna biru memiliki nilai perubahan densitas sebesar $-1,6 \text{ kg/m}^3$ dan *mesh* yang berwarna merah memiliki nilai perubahan densitas sebesar $1,5 \text{ kg/m}^3$.

4.3.3 Hasil *Forward Modelling*

Dengan menggunakan *forward* operator (persamaan 2.4) diperoleh respon dari model yang dibuat. Respon ini merupakan hasil dari *forward modelling*.



Gambar 4.8 Hasil *forward modelling*. Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai perubahan densitas negatif menghasilkan perubahan nilai gravitasi negatif dan sebaliknya.

Dari gambar 4.8 dapat diketahui bahwa perubahan nilai densitas mengakibatkan perubahan nilai gravitasi. Penurunan nilai densitas mengakibatkan penurunan nilai gravitasi, dan sebaliknya ketika terdapat penambahan nilai densitas mengakibatkan peningkatan nilai gravitasi. Hasil *forward modelling* kemudian diinversikan untuk mendapatkan model perubahan densitas untuk menguji parameter inversi yang digunakan apakah model yang dihasilkan dari hasil *forward modelling* mendekati model semula.

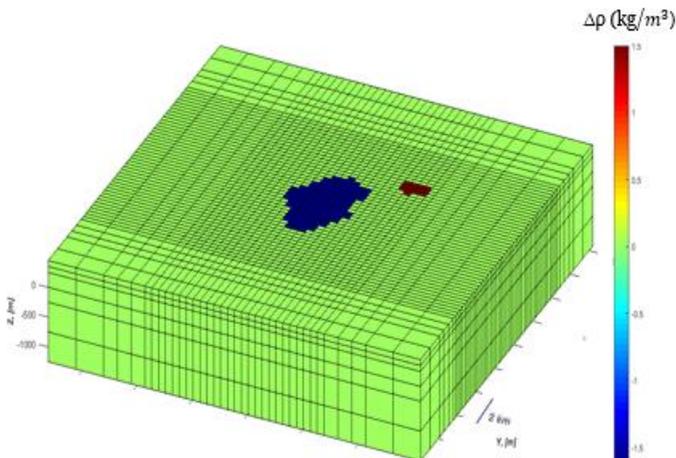
4.4 Inversi Data Sintetik

Parameter inversi yang digunakan tertuang dalam tabel 4.2.

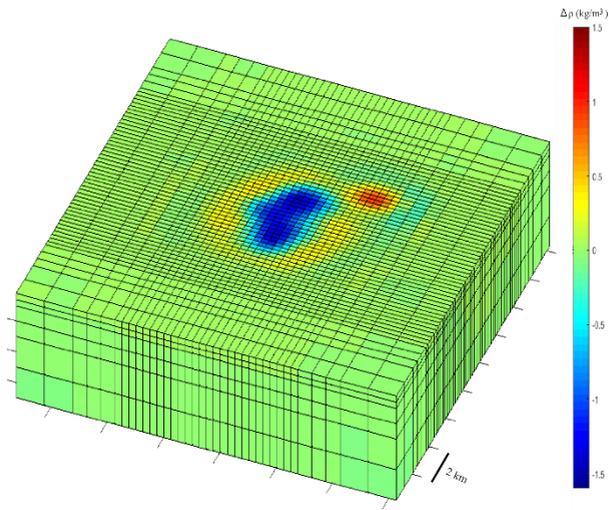
Tabel 1.2 Parameter inversi. Parameter ini digunakan untuk inversi data sintetik kemudian akan digunakan sebagai parameter inversi pada data riil

Algoritma	<i>Conjugate Gradient</i>
Nilai <i>Error</i>	0,00001 mgal
Peningkatan densitas maksimal	3 kg/m ³
Penurunan densitas minimal	-3 kg/m ³

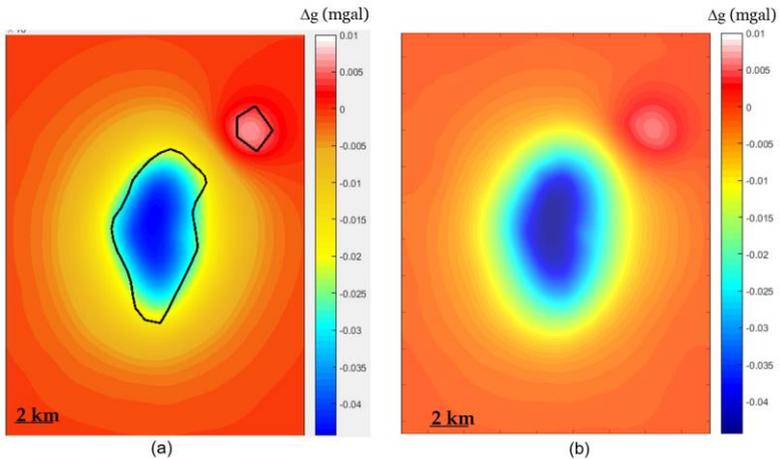
Setelah dilakukan inversi diperoleh data hasil inversi (gambar 4.10). Jika dibandingkan dengan gambar 4.9 yang merupakan model perubahan densitas model dapat diketahui bahwa inversi berhasil membalikkan data *forward modelling* seperti model awal.



Gambar 4.9 Model sintetik perubahan densitas. Model dengan input data hasil perhitungan perubahan densitas kemudian di *forward modelling* untuk menghasilkan respon perubahan nilai gravitasi



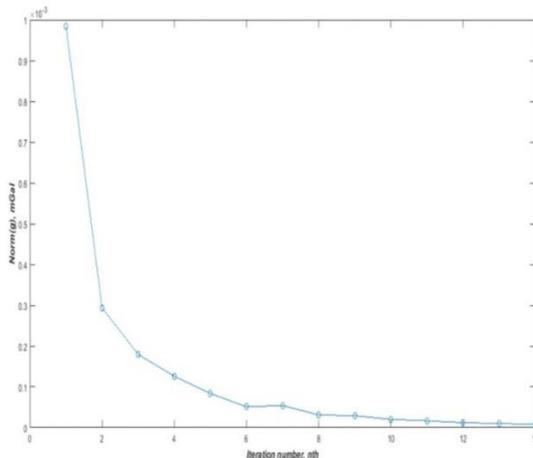
Gambar 4.10 Model perubahan densitas hasil inversi dari respon dari model sintetik. Model memiliki kesamaan dengan model perubahan densitas sintetik menyatakan bahwa parameter inversi yang digunakan dapat mengembalikan respon *forward modelling* menjadi model perubahan densitas.



Gambar 4.11 Perubahan nilai gravitasi (a) respon *forward modelling* dari model perubahan data sintetik (b) hasil kalkulasi *forward modelling* dari model perubahan densitas hasil inversi

Gambar 4.11a menunjukkan kemiripan dengan gambar 4.11b, hal ini menunjukkan bahwa *forward operator* yang digunakan dapat menghasilkan respon yang sesuai dengan yang diharapkan.

Dari gambar 4.12 diperoleh bahwa nilai hasil respon model awal jika dibandingkan dengan hasil kalkulasi inversi memiliki nilai yang representatif dengan model perubahan densitasnya. Jika ditinjau proses inversi yang dilakukan, inversi yang dilakukan adalah sebanyak 14 kali (gambar 4.12). Nilai *error* mengalami penurunan hingga mencapai nilai *error* yang diinput yaitu 0,00001 mgal. Dari hasil inversi dan jumlah iterasi, dapat diketahui bahwa parameter inversi yang digunakan pada inversi data sintetik yang telah dilakukan dapat digunakan untuk menginversi data riil pengukuran.

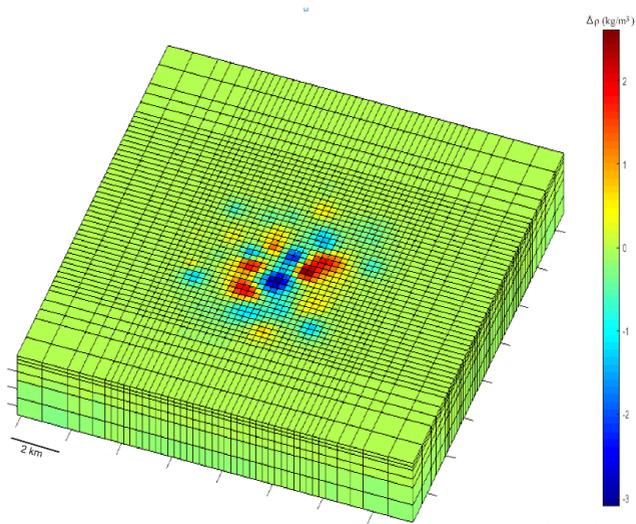


Gambar 4.12 Jumlah iterasi inversi data sintetik. Jumlah iterasi yang dilakukan adalah sebanyak 14 kali. Iterasi akan terus dilakukan hingga *error* perhitungan mencapai 0,00001 mgal.

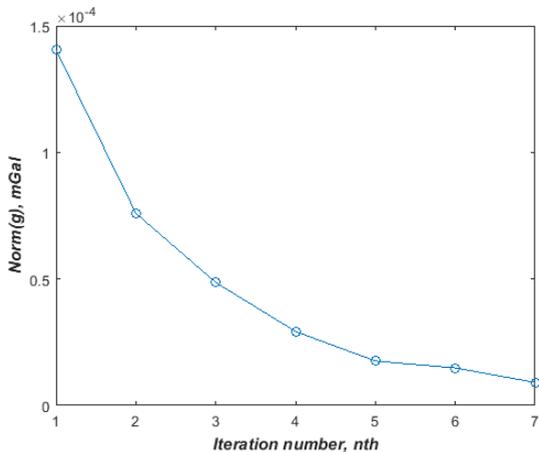
4.5 Inversi Data Riil

Setelah dilakukan *quality controll* dan koreksi pada data riil, kemudian data diinput menggunakan parameter inversi yang telah diinput pada proses inversi data sintetik (tabel 4.2). Dari inversi tersebut diperoleh hasil inversi pada gambar 4.13.

Dari gambar 4.13 dapat diketahui bahwa daerah yang mengalami kenaikan densitas yaitu daerah dengan warna merah (bernilai positif) sedangkan daerah yang mengalami penurunan densitas yaitu daerah dengan warna biru (bernilai negatif).

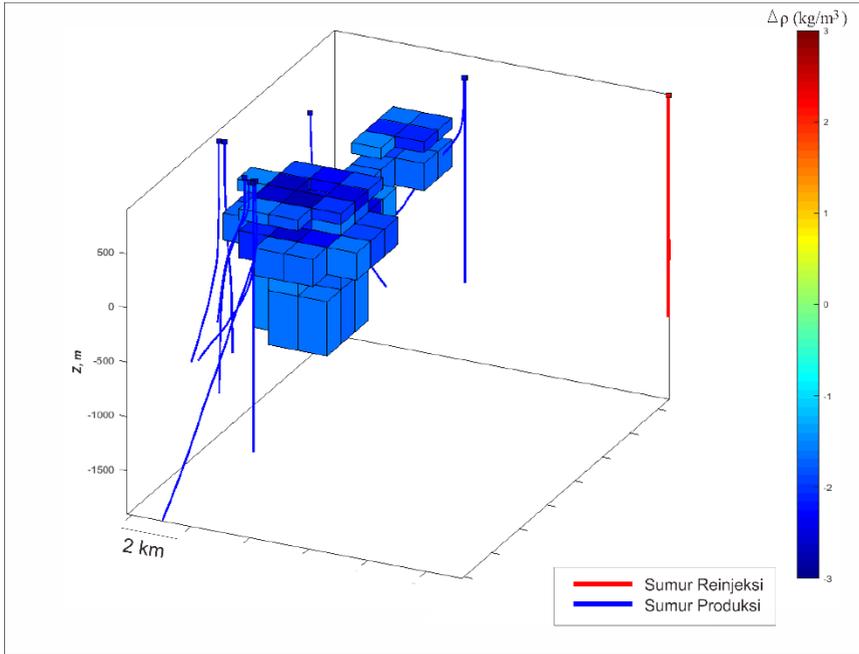


Gambar 4.13 Hasil inversi data riil. Inversi yang dilakukan dengan menggunakan parameter inversi yang berhasil mengembalikan respon *forward modelling* menjadi model perubahan densitas



Gambar 4.14 Jumlah iterasi inversi data riil. Dengan melakukan iterasi sebanyak 7 kali, nilai *error*-nya telah mencapai 0,00001 mGal. Jumlahnya lebih sedikit dibandingkan data sintetik karena jumlah datanya lebih sedikit.

Hasil inversi yang dilakukan mengalami iterasi sebanyak 7 kali (gambar 4.14) dengan nilai *error* menunjukkan terrain semakin menurun dengan bertambahnya jumlah iterasi yang berarti proses iterasi pada inversi berhasil menurunkan nilai *error*-nya.

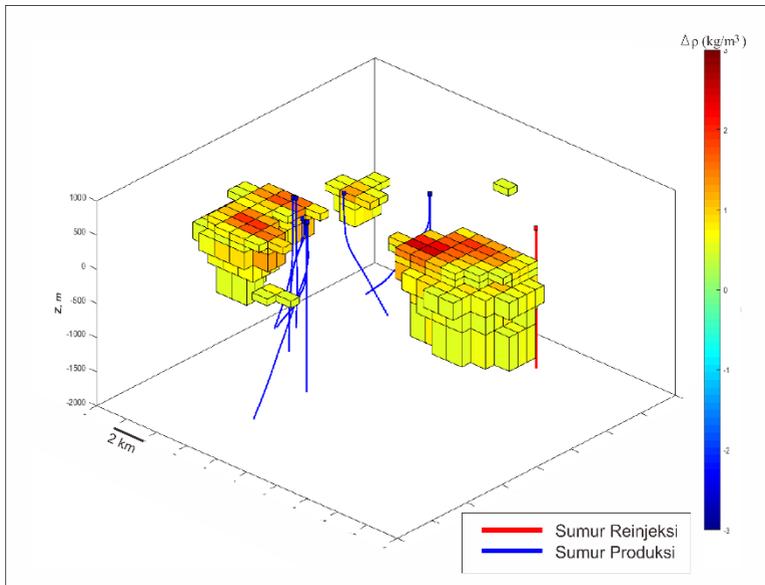


Gambar 4.15 Hasil filter nilai -1,5 sampai dengan -3 kg/m³ menunjukkan daerah pengurangan massa terbesar. Pengurangan massa terbesar terdapat pada daerah yang terdapat sumur produksi dan tidak terdapat di luar daerah reservoir.

Dari gambar 4.14 kemudian dilakukan filter. Filter yang dilakukan berdasarkan nilai dan juga berdasarkan zona. Filter berdasarkan nilai biasanya digunakan untuk menganalisis daerah pengurangan dan penambahan massa terbesar.

Pengurangan massa terbesar berada pada daerah sumur produksi (gambar 4.15). Dengan indikasi bahwa proses produksi panas bumi mengakibatkan pengurangan massa pada daerah reservoir. Jika dibandingkan dengan gambar 4.16 yaitu hasil filter nilai perubahan densitas (0,5-3 kg/m³), daerah yang mengalami penambahan massa berada diluar daerah sumur produksi. Filter berikutnya adalah filter berdasarkan zona. Gambar 4.18 merupakan hasil filter

dengan batas zona reservoir. Hasil filter ini menggambarkan situasi perubahan nilai densitas pada daerah reservoir.



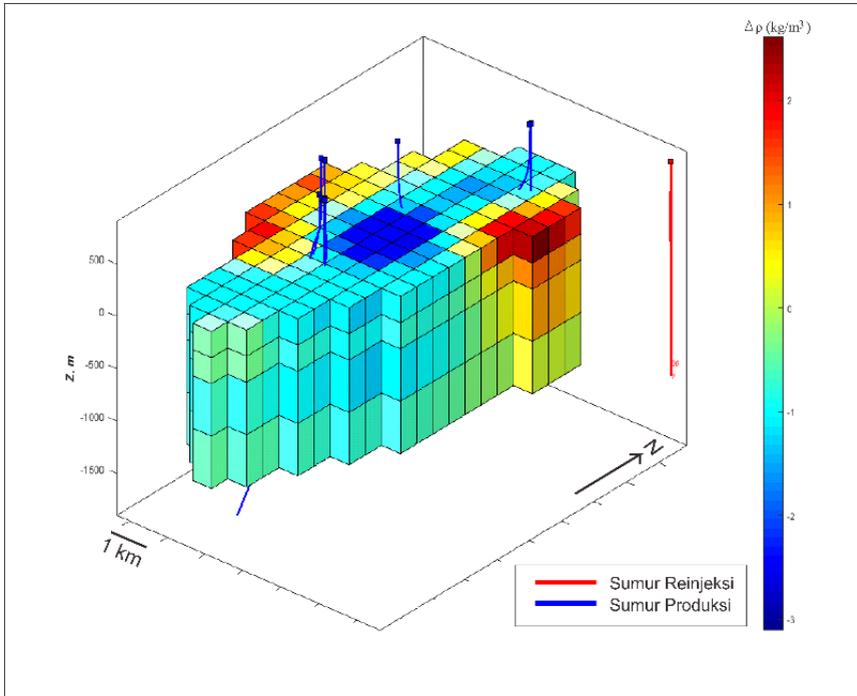
Gambar 4.16 Hasil filter nilai 0,5 sampai dengan 3 kg/m³ menunjukkan daerah penambahan massa terbesar. Pengurangan massa terbesar terjadi di dua daerah yaitu daerah dekat sumur reinjeksi akibat proses reinjeksi fluida dan sebelah barat sumur produksi yang diidentifikasi sebagai akibat *natural recharge*

Gambar 4.15 menggambarkan bahwa pengurangan massa yang terjadi pada lapangan panas bumi X terjadi akibat proses produksi uap. Terbukti dari zona yang mengalami pengurangan massa terbesar berada di bawah sumur produksi.

Gambar 4.16 memberikan gambaran bahwa penambahan massa yang terjadi di reservoir tidak hanya disebabkan oleh fluida yang direinjeksikan ke bawah permukaan. Terdapat daerah yang mengalami penambahan massa yang terjadi secara natural. Sehingga perubahan massa yang terjadi pada reservoir tidak dapat dihitung secara langsung dengan menghitung selisih antara produksi dan reinjeksi.

Gambar 4.17 memperjelas bahwa penambahan massa yang terjadi pada reservoir tidak hanya disebabkan oleh fluida yang direinjeksikan melalui sumur reinjeksi. Hal tersebut ditandai oleh *mesh* yang berada di sebelah sumur reinjeksi

menunjukkan adanya penambahan massa. Namun, terdapat juga daerah yang mengalami penambahan massa di daerah yang tidak terdapat sumur reinjeksi.



Gambar 4.17 Hasil filter untuk daerah reservoir. *Mesh* dengan warna biru (perubahan densitas negatif) menggambarkan pengurangan massa sedangkan warna merah (perubahan densitas positif) menggambarkan penambahan massa. Pengurangan massa mendominasi di daerah sumur produksi.

4.6 Perhitungan Perubahan Massa

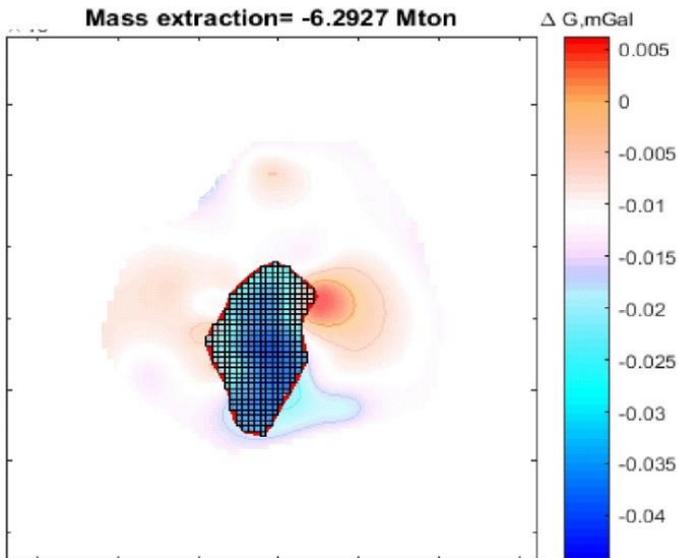
4.6.1 Perhitungan Berdasarkan Pendekatan Model Perubahan Densitas

Perhitungan berdasarkan pendekatan model perubahan densitas menggunakan persamaan 2.13 Dengan menghitung nilai massa per *mesh* yang merupakan hasil dari densitas dikali dengan volume kemudian massa *mesh* seluruhnya dijumlahkan. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai perubahan massa sebesar -6,57 Mton. Perhitungan menggunakan pendekatan model perubahan densitas menggunakan asumsi bahwa perubahan nilai gravitasi yang terjadi sebagai akibat dari perubahan massa yang terjadi di reservoir.

4.6.2 Perhitungan Berdasarkan Teori Potensial Gauss

Teori Potensial Gauss berdasarkan persamaan 2.14 merupakan penjumlahan dari rata-rata perubahan gravitasi pada satuan daerah tertentu kemudian dibagi dengan konstanta gravitasi. Untuk mendapatkan nilai perubahan gravitasi di daerah Δs perlu ditentukan terlebih dahulu Δs . Δs dapat diperoleh dengan membuat *grid* pada zona reservoir, besarnya satu kotak menggambarkan luasan Δs . Semakin besar ukuran kotak, maka tingkat ketelitiannya semakin kecil.

Dari hasil perhitungan berdasarkan teori Potensial Gauss (gambar 4.18) diperoleh nilai gravitasi diperoleh nilai perubahan massa -6,2927 Mton.



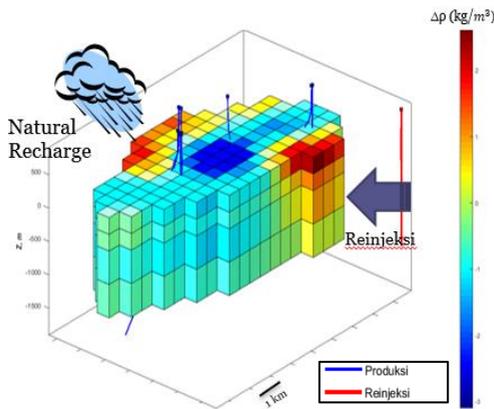
Gambar 4.18 *Gridding* data untuk menghitung nilai perubahan massa berdasarkan teori Potensial Gauss. Perhitungan menggunakan teori Potensial Gauss menggunakan asumsi bahwa perubahan gravitasi yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa yang terjadi di daerah reservoir.

4.7 Pembahasan

Pengukuran *microgravity* pada lapangan panas bumi X digunakan untuk memonitor keadaan reservoir. Berdasarkan gambar 4.17 diketahui bahwa terdapat perubahan nilai densitas pada daerah zona reservoir. Model menjelaskan bahwa pada daerah yang terdapat sumur produksi, terdapat

pengurangan massa terbesar (gambar 4.15), sedangkan daerah yang mengalami penambahan massa terbesar berada di daerah sumur reinjeksi (gambar 4.16). Namun, terdapat juga penambahan massa yang besar selain daerah sumur reinjeksi yaitu sebelah kiri reservoir. Penambahan massa tersebut diidentifikasi akibat adanya *natural recharge*. *Natural recharge* berperan sebagai daerah penambahan massa pada reservoir secara natural yaitu yang didominasi oleh air meteorik. *Natural recharge* pada lapangan panas bumi X tidak dapat mengembalikan massa yang hilang akibat produksi secara seutuhnya, sehingga perlu dibantu dengan sumur reinjeksi.

Gambar 4.17 merupakan model perubahan densitas pada zona reservoir. *Mesh* dengan warna merah mengidentifikasi penambahan massa dan *mesh* berwarna biru mengidentifikasi pengurangan massa. Fluida yang diinjeksikan melalui sumur reinjeksi (merah) mengalir ke arah reservoir dan mengakibatkan peningkatan densitas pada reservoir ditandai dengan *mesh* yang berwarna merah dekat sumur reinjeksi. Reinjeksi hanya dapat mengembalikan kehilangan massa secara efektif pada bagian dekat sumur reinjeksi. Hal ini terbukti dari gambar 4.19. Sumur reinjeksi tidak dapat mengatasi pengurangan massa pada bagian tengah reservoir. Oleh karena itu, untuk produksi tahun berikutnya perlu adanya pertimbangan untuk melakukan reinjeksi pada daerah yang mengalami pengurangan terbesar pada tahun 2015-2016.



Gambar 4.19 Estimasi aliran fluida sumur reinjeksi menuju zona reservoir. Fluida yang direinjeksikan mengalir dari sumur reinjeksi menuju reservoir ditandai dengan *mesh* berwarna merah di dekat sumur reinjeksi. Sedangkan *mesh* merah yang berada di sebelah kiri sumur produksi diidentifikasi sebagai penambahan massa akibat *natural recharge*.

Fluida yang direinjeksikan melalui sumur reinjeksi (gambar 4.19) bergerak menuju zona reservoir. Terbukti dari *mesh* yang berada di sebelah sumur reinjeksi menunjukkan penambahan massa. Namun, tidak seluruh fluida yang direinjeksikan mengalir menuju zona reservoir. Sehingga dalam perhitungan perubahan massa yang terjadi pada zona reservoir tidak dapat diperoleh dengan menghitung selisih jumlah fluida yang produksi dan yang direinjeksikan. Hal ini diperkuat melalui hasil *gridding* (gambar 4.4), fluida yang direinjeksikan mengisi daerah kaldera yang ditandai dengan peningkatan nilai gravitasi. Diasumsikan bahwa fluida yang direinjeksikan pada sumur reinjeksi mengalir melalui *inferred fault* menuju reservoir.

Berdasarkan data produksi dan reinjeksi pada lapangan panas bumi X diketahui bahwa banyaknya uap yang diproduksi pada tahun 2015-2016 adalah sebesar 8,51 Mton sedangkan jumlah fluida yang diinjeksikan sebesar 2,55 Mton. Jika dihitung selisih jumlah produksi dan reinjeksi diperoleh nilai defisit sebesar 6,06 Mton. Tabel 4.3 menunjukkan adanya perbedaan hasil perhitungan defisit massa pada lapangan panas bumi X.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan defisit massa. Perubahan nilai gravitasi yang terjadi pada lapangan panas bumi X dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan massa.

PENDEKATAN	DEFISIT MASSA (Mton)	KETERANGAN
Produksi dan reinjeksi	6,06	Selisih massa produksi dan reinjeksi secara langsung
Model perubahan densitas	6,57	Perhitungan menggunakan model pada gambar 4.19 dengan asumsi bahwa perubahan nilai gravitasi yang terjadi akibat perubahan massa pada reservoir
Teori Potensial Gauss	6,2927	Perhitungan dengan menggunakan asumsi bahwa perubahan nilai gravitasi yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa di reservoir.

Defisit massa yang dihitung berdasarkan selisih produksi dan reinjeksi tidak dapat menggambarkan perubahan massa seutuhnya karena perubahan massa di reservoir tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah massa yang diproduksi

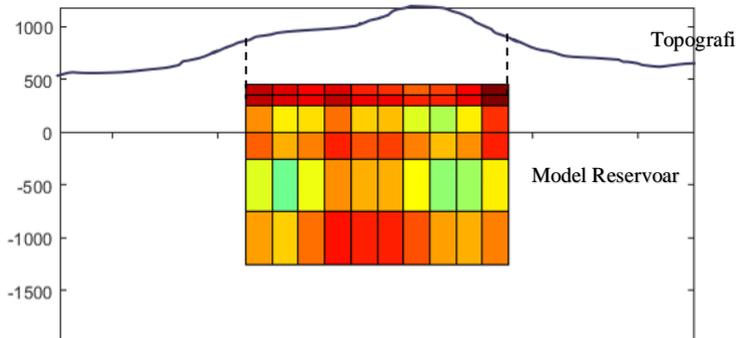
dan direinjeksikan (gambar 4.17). Jumlah perubahan massa yang terjadi pada reservoir dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor tersebut dapat meningkatkan massa fluida di reservoir yaitu fluida yang direinjeksikan melalui sumur reinjeksi dan air meteorik dari *recharge area* yang kemudian masuk ke reservoir. Ada juga faktor yang dapat mengurangi massa fluida di reservoir yaitu fluida yang diproduksi untuk memutar turbin dan massa yang keluar dari reservoir ke permukaan melalui celah atau zona lemah sehingga muncul sebagai manifestasi panas bumi, dikenal dengan istilah *surface discharge*.

Defisit massa yang diperoleh dengan pendekatan model perubahan densitas (gambar 4.17) menggambarkan perubahan massa pada reservoir. Jika menggunakan persamaan 2.12, maka dapat diperoleh

$$\begin{aligned} \Delta M &= (M_w + M_t) - (R + I) \\ -6,57 \text{ Mton} &= (8,61 \text{ Mton} + D_s) - (R + 2,55 \text{ Mton}) \\ (D_s - R) &= 0,51 \text{ Mton} \end{aligned}$$

Nilai 0,51 Mton menunjukkan adanya perubahan massa yang disebabkan oleh *natural recharge* dan *surface discharge*.

Hasil defisit massa dengan menggunakan pendekatan model perubahan densitas pada zona reservoir jika dibandingkan dengan hasil perhitungan defisit massa menggunakan teori Potensial Gauss terdapat perbedaan (tabel 4.3). Perbedaan ini disebabkan prinsip perhitungannya. Model perubahan densitas mengasumsikan bahwa perubahan nilai gravitasi diakibatkan oleh perubahan massa pada reservoir seutuhnya, sedangkan teori Potensial Gauss menghitung dengan asumsi bahwa perubahan nilai gravitasi yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa pada reservoir.



Gambar 4.20 Letak *mesh* reservoir terhadap reservoir. Teori Potensial Gauss yang digunakan mengasumsikan bahwa perubahan nilai gravitasi

yang terjadi tidak hanya disebabkan oleh perubahan massa pada reservoir.

Teori Potential Gauss menghitung perubahan massa yang terjadi di bawah permukaan secara keseluruhan mulai dari permukaan hingga reservoir bahkan daerah di bawah reservoir sedangkan model perubahan densitas yang dibuat fokus pada perubahan massa yang terjadi di zona reservoir (gambar 4.20).

Jika perhitungan berdasarkan model perubahan densitas merepresentasikan perubahan massa pada zona reservoir maka dapat diketahui perubahan massa yang terjadi pada daerah di atas dan bawah zona reservoir hingga permukaan, yaitu dengan menghitung selisih antara perhitungan perubahan massa berdasarkan model perubahan densitas dengan perhitungan massa berdasarkan teori Potensial Gauss. Perhitungan perubahan massa menggunakan teori Potensial Gauss juga perlu sebagai kontrol perubahan massa yang dihitung menggunakan pendekatan model perubahan massa. Jika nilai dari perhitungan memiliki perbedaan yang jauh akan timbul asumsi bahwa terdapat kesalahan dalam proses pemodelan. Karena pengukuran yang dilakukan adalah pada rentang waktu yang sama pada tiap tahunnya sehingga perubahan nilai gravitasi yang terukur hanya mengalami sedikit pengaruh oleh faktor lain di luar proses produksi dan reinjeksi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa

1. Dari data *microgravity* daerah lapangan panas bumi X tahun 2015-2016 diperoleh model perubahan densitas ($\Delta\rho$) reservoir dengan rentang nilai 2,4 kg/m³ hingga -3,1 kg/m³. Penambahan massa digambarkan pada daerah yang mengalami perubahan densitas positif sedangkan pengurangan massa digambarkan pada daerah yang mengalami perubahan densitas negatif.
2. Fluida yang diinjeksikan pada daerah penelitian melalui sumur reinjeksi mengalir ke zona reservoir melalui *inferred fault* sehingga meningkatkan nilai densitas terbukti dari nilai perubahan densitas positif. Penambahan massa akibat proses reinjeksi berada di daerah kaldera yang menjadi penyusun daerah timur reservoir.
3. Perubahan massa yang terjadi pada lapangan panas bumi X berdasarkan pendekatan model perubahan densitas adalah defisit 6,57 Mton sedangkan berdasarkan teori Potensial Gauss diperoleh defisit 6,2927 Mton. Model perubahan densitas dapat menggambarkan perubahan massa pada zona reservoir dengan lebih representatif sedangkan perhitungan menggunakan teori Potensial Gauss dapat memberikan gambaran perubahan massa yang terjadi di atas dan bawah zona reservoir.

5.2 Saran

1. Lapangan panas bumi X perlu dilakukan reinjeksi di daerah zona reservoir dengan pengurangan massa terbesar yaitu bagian tengah reservoir atau mengurangi produksi sumur produksi yang aktif pada tahun 2015-2016 dan mengalihkannya ke sumur produksi lain untuk tahun berikutnya.
2. Perlu dilakukan *tracer test* sebagai input untuk mengetahui kondisi fluida pada daerah sumur reinjeksi guna mendapatkan parameter yang tepat untuk melakukan *forward modelling* sehingga dapat diperoleh model data sintetik yang mendekati keadaan riil.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Dezulfakar, H., Syaifuddin, F. dan Utama, W. (2015), "Inversi Bersama Gelombang PP dan PS (Joint PP And PS Inversion) untuk Menganalisa Litologi Reservoir", *Jurnal Geosaintek*, Vol.1.
- DiPippo, R. (2012), *Geothermal Power Plants : Principles , Applications , Case Studies and Environmental Impact Third Edition*, Third., Butterworth-Heinemann, Waltham.
- La Fehr, T.R. (1965), "The estimation of the total amount of anomalous mass by Gauss's theorem, Jour", *Geophys. Res.*, Vol.70, hal. 1911–1919.
- Fiyah, A.F. dan Bahri, A.S. (2012), "Pemodelan Dinamika Massa Reservoir Panas Bumi Menggunakan Metode 4D Microgravity", *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, Vol.1, No.1, hal. 1–4.
- Grandis, H. (2009), *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.
- Hammer, S. (1945), "Estimating ore masses in gravity prospecting", *Geophysics*, Vol.10, hal. 50–62.
- Hendar Gunawan (1985), *Analisa Kuantitatif Data Gravitasi Untuk Melokalisir Jebakan Timah Primer*, Universitas Indonesia.
- Hochstein, P; Browne, L. (2000), *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources Encyclopedia of Volcanoes*, H. Sigurdsson, B.F., Houghton, S.R., McNutt, H., Rymer dan J. Stix (eds.), Academic Press, USA.
- Hunt, T.. (2000), *Five Lectures on Environmental Effect of Geothermal Utilization*, The United Nations University.
- Hunt, T.M. (1970), "Gravity Changes at Wairakei Geothermal Field, New Zealand", *Geol.Soc.America Bull*, Vol.81, hal. 529–536.
- Jati, S., Rosid, S. dan Zaenudin, A. (2009), *Monitoring Lapangan Panas Bumi Kamojang Menggunakan Pengukuran Gravitasi Berulang*, Universitas Indonesia.
- Jun Nishijima, Hakim Saibi, Yayan Sofyan, Sachio Shimose, Yasuhiro Fujimitsu, Sachio Ehara, Y.F. dan Takashi Hasegawa, M.T. (2010), "Reservoir Monitoring Using Hybrid Micro-Gravity Measurements in the Takigami", *World Geothermal Congress 2010*,.
- Kadir, W.G.A. (1999), "Survey Gayaberat 4Dimensi dan Dinamika Sumber Bawah Permukaan", *HAGI XXIV*,.

- Oka, D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Fukuda, Y. dan Taniguchi, M. (2011), "Geothermal Reservoir Monitoring by the Repeat Gravity Measurement at the Takigami Geothermal Field , Japan -Application of Hybrid Gravity Measurement using Absolute and Relative Gravimeters-", *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Vol.13, 2008, hal. 5268.
- Parapat, J., Hilyah, A. dan Utama, W. (2018), "Analisis dan Pemodelan Inversi 3D Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Sipoholon Berdasarkan Data Gaya Berat", *JURNAL TEKNIK ITS*, Vol.7, No.1, hal. 3–7.
- Rempher, T. (2013), "Geothermal Injection Well Monitoring", *California Polytechnic State University, San Luis Obispo.*,
- Sarkowi, M., Kadir, W.G.A. dan Santoso, D. (2005), "Strategy of 4D Microgravity Survey for the Monitoring of Fluid Dynamics in the Subsurface", *World Geothermal Congress 2005*, No.1, hal. 1–5.
- Sumardi, Y. (2005), *Model Numerik Aliran Fluida dalam Sistem Hidrotermal di Lapangan Panas Bumi Kamojang, Jawa Barat*, Institut Teknologi Bandung.
- White, D.E., Buffler, L.J.P., and Truesdell, A.. (1971), "Vapor-Dominated Hydrothermal Systems Compared with Hot Water Systems", *Economic Geology*, Vol.66, hal. 75–97.

BIOGRAFI PENULIS



After Helfert Pasaribu lahir di Kuala Kapuas, 13 April 1996 merupakan anak kedua pasangan Bapak Josafat Pasaribu dan Ibu Roma Eden Sertama Purba. Penulis menempuh pendidikan di SDS St. Maria Tarutung (2002-2008), SMP Negeri 3 Tarutung (2008-2011), dan SMA Negeri 2 Balige (2011-2014). Penulis masuk di Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SNMPTN tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 0341144000022. Selama menempuh pendidikan S-I, penulis aktif dalam organisasi dan panitia kemahasiswaan antara lain menjadi staf departemen

Kesejahteraan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS (HMTG ITS) tahun 2015-2016 dan *Officer of Research and Development Department* di *Society of Exploration Geophysics ITS* (SEG ITS) tahun 2016-2017. Penulis juga aktif dalam menulis karya ilmiah dan berhasil menjadi *Best Poster Presentation* bersama tim pada *Joint Event* Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI) – *European Association of Geoscientists & Engineers* (EAGE) April 2018 di Jogjakarta. Apabila ingin hendak memberi kritik dan saran serta berdiskusi lebih lanjut terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui after.pasaribu@gmail.com.