

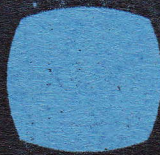
**PROCEEDINGS JOINT CONVENTION BALI 2007**  
**The 32nd HAGI, The 36th IAGI, and The 29th IATMI**  
**Annual Convention and Exhibition**



**JOINT CONVENTION**  
**BALI**

13<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> November 2007

Organized by :



Proceedings sponsored by :



ISBN 978-979-8176-05-5



9 789798 126055

## FOREWORDS

"OPTIMIZATION OF MIXED ENERGY RESOURCES FOR NATIONAL ENERGY SECURITY" is the theme of the Joint Convention Bali 2007, The 32<sup>nd</sup> HAGI, The 36<sup>th</sup> IAGI, and The 29<sup>th</sup> IATMI Annual Convention and Exhibition.

This theme addresses the need for Indonesia to secure national energy supply and to sustain the development of energy resources as energy plays a vital role in Indonesia's economic growth. The theme of mixed energy resources is chosen following the needs of energy diversification prior to the projection of Indonesia becoming net-oil importer country. Indonesia is pursuing a sustainable energy development agenda under the National Energy Mix Policy in 2025. Toward the year, Indonesia is implementing short, medium, and long-term policies to address the broader challenges in national energy supply and sustainability. Indonesia is intensifying cooperation activities among the stakeholder with purpose of:

- Enhancing the production of conventional energy
- Exploration and development the new energy resources and supplies
- Diversification of energy and promoting alternate energy resources
- Facilitate energy efficiency and conservation
- Renewable energy campaign

The Joint Convention Bali 2007 host by HAGI (Indonesian Association of Geophysicist), IAGI (Indonesian Association of Geologist), and IATMI (Indonesian Petroleum Engineering Association). The convention held at Westin, Bali International Convention Center at 13-16 November 2007. This convention provides opportunities among earth scientists and petroleum engineer to share ideas, opinions, and experiences as well as their new concept and current technology development. It is also intended to raise awareness among Indonesian earth scientist and petroleum engineer to anticipate the energy reduction with its implications.

### Topics:

1. Indonesian Natural Resources
2. Mineral and Energy Resources Management
3. Environmental Issues
4. Hazard Mitigation
5. General Issues (Mix Energy Scenario & Policy)
6. Atmosphere Science, Oceanography, and Marine Geology
7. Development in Sedimentology, and Stratigraphy
8. Geodynamics, Seismology, and Volcanology
9. Exploration, Exploitation, and Development G&G
10. G&G Methods, Technology, and Application
11. Engineering Geology
12. Unconventional G&G

Jakarta, 13 November 2007

Chairman JCB2007  
Mohammad Syaiful

No.	REGISTER NUMBER	AUTHOR(S)	TITLE OF PAPER	INSTITUTION(S)	PAGE
68	JCB2007-096	1) Mahap Maha; 2) Basuki Rahmad; 3) Herie Widiyanto	FASIES DAN PETROGRAFI BATUBARA FORMASI NANGGULAN DAERAH KALISONGGO, KECAMATAN GIRIMULYO, KABUPATEN KULON PROGO, DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA	Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta	593-616
69	JCB2007-097	Panuju Rubijanto Kapid	Revisi Biostratigrafi Nanoplankton Miosen Awal Bagian Bawah (Zona NN1-NN2) di Cekungan Jawa Timur Utara		617-628
70	JCB2007-098	Panuju Imam Prayitno Ginanjar Rahmat Iskandar Nur Hasjim	Revision of Late Miocene Nannoplankton Biostratigraphy for Kutai Basin		629-646
71	JCB2007-100	Prajuto	Benchmarking of the Exploration and Production Knowledge Management	Medco E&P Indonesia	647-653
72	JCB2007-101	Supriyati Andreastuti, Sri Subandini, Suryono, Sukarnen, Sartini	SEBARAN GAS CO2 DI DAERAH VULKANIK DALAM KAITANNYA DENGAN SESAR DAN EMISI RADON: STUDI KASUS DI G. DIENG	Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungpian, Jl Cendana 15 Yogyakarta	654-661
73	JCB2007-102	Supriyati D. Andreastuti	KARAKTERISTIK GEOKIMIA AWANPANAS MERAPI 2006	Badan Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Balai Penyelidikan dan Pengembangan Teknologi Kegunungpian, Jl Cendana 15 Yogyakarta	662-668
74	JCB2007-104	Basuki Puspoputro	Career Switch From Employee To Consultant: A Tale From An Old Fox	University of Indonesia / Independent Consulting Geophysicist	669-671
75	JCB2007-105	Minardi, S.1,2, Zaenudin, A.2,3 Sarkowi, M.3, Kadir, W.G.A2, Santoso, D.2	FLUID DYNAMIC RESERVOIR STUDY USING 4D MICRO GRAVITY CASE STUDY: KAMOJANG GEOTHERMAL FIELD	1Program Studi Fisika, Universitas Mataram, NTB 2Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung 3Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Lampung	672-683
76	JCB2007-107	Sri Indarto, Iskandar Zulkarnain, Iwan Setiawan dan Sudarsono	PETROGRAFI DAN MINERALISASI PADA BATUAN VOLKANIK FORMASI HULU SIMPANG, DAERAH LEBONG TANDAI, BENGKULU UTARA, PROPINSI BENGKULU, SUMATERA	Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Komplek LIPI, Jl. Sangkuriang, Bandung, telp. 022-2503654,	684-691
77	JCB2007-110	By : Praptisih , Kamtono and M. Safei Siregar *	The hydrocarbon source rock potential on the Rambatan Formation In the Banjarnegara areas, Central Java	* Puslit Geoteknologi LIPI. Komplek LIPI, Jl. Sangkuriang Gedung 70 Bandung. Telp : (022) 2503654, email : praptisih@geotek.lipi.go.id	692-703
78	JCB2007-112	Oleh: Harry Utoyo*	K/AR AGE OF BUKIT ASAM AND BUKIT KENDI, TANJUNG ENIM, SUMATERA SELATAN	* Geological Survey Centre; Jl. Diponegoro 57 Bandung, Indonesia, Ph (022) 7203205 E mail: harryutoyo@grdc.esdm.go.id	704-713

**STUDI DINAMIKA FLUIDA RESERVOIR GEOTERMAL  
MENGUNAKAN METODE GAYABERATMIKRO 4D  
(STUDI KASUS : LAPANGAN PANASBUMI KAMOJANG JAWA BARAT)**

**Minardi, S.<sup>1,2</sup>, Zaenudin, A.<sup>2,3</sup> Sarkowi, M.<sup>3</sup>, Kadir, W.G.A.<sup>2</sup>, Santoso, D.<sup>2</sup>, Raharjo, I.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Universitas Mataram, NTB

<sup>2</sup>Teknik Geofisika, Institut Teknologi Bandung

<sup>3</sup>Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Lampung

<sup>4</sup>PT. Pertamina Geothermal Energy

**ABSTRACT**

Application of microgravity survey by measuring gravity change in time had been used extensively in many fields. The major causes of gravity change are mass change in reservoir (subsurface) and vertical ground movement (subsidence). While the observed gravity change, called as time-lapse microgravity anomaly, is as superposition of all the causes, hence how to identify each source is very important because some of causes could have similar response. As example is increase of subsurface density (mass) and subsidence. In order to minimize this uncertainty, time-lapse vertical gradient microgravity associated with its time-lapse microgravity is analyzed. Theoretical background of this analysis is that vertical gradient microgravity value at the surface will be constant if there is only subsidence (no subsurface mass change). Therefore, response of its time-lapse vertical gradient microgravity for subsidence will be zero. In contrast, subsurface density change is indicated by anomaly values that direct proportional with its subsurface. Microgravity and vertical gradient measurement has been conducted at 87 stations which distributed in geothermal field of Kamojang and analyzed to identify subsurface source. Microgravity inversion was also figure subsurface density anomaly as representation of reservoir dynamic. Result of the research is map of density change that relates with fluid movement in the reservoir. In order to support interpretation result, 3D inversion is also applied.

**PENDAHULUAN**

Perubahan gayaberat negatif berasosiasi dengan adanya pengurangan massa pada reservoir akibat dari ekstraksi fluida panas ke permukaan. Perubahan gayaberat ini sangat kecil sehingga diperlukan metoda gayaberat mikro untuk pemantauannya (Mariita, 2000). Metoda gayaberat mikro memiliki prinsip yang sama dengan metoda gayaberat biasa, namun orde magnitudonya 10 – 100 kali lebih kecil daripada metoda gayaberat yang biasa digunakan dalam survey geofisika. Pemantauan perubahan massa pada reservoir dengan metoda gayaberat mikro harus dilakukan secara berkesinambungan dengan periode tertentu (Hunt, 2001).

Lapangan panasbumi Kamojang telah dikembangkan dan dioperasikan selama 25 tahun

mulai dari tahapan eksplorasi hingga produksi listrik 140 MWe saat ini dari cadangan potensial Kamojang 300 MWe. Sekarang sedang dipersiapkan Unit IV (60 MWe) bahkan dimungkinkan untuk ditambah dengan Unit V (Sudarman, dkk., 2003). Selama 16 tahun, total produksi Lapangan Panasbumi Kamojang sebesar 116.78 juta ton. Sedangkan total air dingin yang diinjeksikan sebesar 19,59 juta ton. Dari data curah hujan, terjadi penambahan volume air hujan sebesar 53.34 juta ton selama 15 tahun. Terjadi pengurangan massa sebesar 43.85 juta ton selama 16 tahun dan berdasarkan perhitungan terjadi pengurangan massa sebesar 53.78 juta ton.

Penelitian ini bertujuan untuk memonitor dinamika fluida reservoir Lapangan panasbumi Kamojang akibat eksploitasi tersebut untuk periode pendek (tahunan) berdasarkan metoda

gayaberatmikro. Kelebihan metode gayaberatmikro selain dapat menduga arah pergerakan fluida juga dapat menduga pengurangan massa akibat produksi dan reinjeksi yang tidak bisa dideteksi dengan metoda monitoring lainnya, seperti tracer reinjeksi dan mikro seismik (MEQ).

## DASAR TEORI

Penggunaan metode gayaberat mikro untuk pemantau telah dilakukan oleh beberapa orang peneliti dengan berbagai tujuan, seperti : Allis and Hunt (1986) menerapkan pemantauan gayaberat pada eksploitasi panasbumi Wairakei, New Zealand. Perubahan gayaberat (setelah dikoreksi *subsidence*) adalah sebesar -1000 ( $\pm 300$ )  $\mu$ Gal terjadi pada area bor produksi seluas 1 km<sup>2</sup>, dan penurunan kecil pada area luar seluas 50 km<sup>2</sup>. Dari model gayaberat memberi kesan perubahan saturasi pada 'steam zone' sebesar 0.7 ( $\pm 0.1$ ) pada 1962 dan menurun menjadi 0.6 pada 1972. Perubahan positif anomali gayaberat dihubungkan dengan masuknya air dingin pada 'steam zone'.

Hare, et.al.,(1999) menerapkan metoda gayaberat 4D dalam proses *Enhancement Oil Recovery* (EOR). Metode gayaberat 4D digunakan untuk pemantauan gerakan air yang diinjeksi ke dalam reservoir. Pemodelan kedepan gayaberat memprediksi variasi pengukuran dipermukaan 100  $\mu$ Gal setelah 5 tahun injeksi, dan 180-250  $\mu$ Gal setelah 15 tahun. Kemudian untuk estimasi distribusi rapat-massa bawah pergunakan digunakan metoda 'constrained least-square'. Hasil modeling mengindikasikan bahwa inversi data gayaberat *time-lapse* adalah teknik yang dapat diteruskan untuk monitoring reservoir *gas cap waterflood*.

Kemudian Mariita (2000) untuk mengamati reservoir panasbumi Olkaria, Kenya. Perubahan gayaberat akibat eksploitasi dalam orde 180  $\mu$ gal pada periode 1988-1996. Besaran nilai gayaberat negatif berhubungan dengan defisit massa pada batuan reservoir. Variasi gayaberat tersebut belum dikoreksi efek pergerakan tanah-vertikal (*subsidence*), karena tidak ada data perubahan elevasi.

Eystensson (2000) memantauan perubahan gayaberat di Reykjanes Peninsula, SW Iceland. Pemantauan gayaberat dan elevasi telah dilakukan sejak 1976. Laju *subsidence* bervariasi,

14 mm/tahun pada awal eksploitasi 1975, kemudian turun 7 mm/tahun pada periode 1987-1992, dan meningkat lagi menjadi 14 mm/tahun pada periode 1992-1999. *Subsidence* bervariasi secara linier dengan penurunan tekanan yang diukur pada borehole pada kedalaman 900 m, mengindikasikan bahwa *subsidence* tersebut terutama disebabkan kompaksi pada pori-pori matrik batuan. Perubahan gayaberatnya relatif kecil. Efek *subsidence* dikoreksi sebesar 5 mm/tahun pada data gayaberat. Perhitungan dengan menggunakan hukum Gauss mengindikasikan bahwa 70% adalah *recharge* alamiah.

Eksplorasi pada lapangan panasbumi dapat menyebabkan *subsidence*, umumnya *subsidence* terjadi didekat area produksi, dan kadang-kadang terjadi *inflation* (kebalikan *subsidence*) di area reinjeksi. Secara umum *subsidence* menyebabkan harga gayaberat bertambah dan *inflation* menyebabkan harga gayaberat berkurang. Ukuran pertambahan dan pengurangan gayaberat tersebut ditentukan oleh gradien vertikal gayaberat ( $dg/dz$ ). Allis, dkk., (2000) menghubungkan anomali gayaberat akibat perubahan variasi elevasi benchmark sebesar 3  $\mu$ Gal/cm

Geologi lapangan Kamojang (+1500 m dpl) memiliki kriteria sebagai berikut: (1) dikontrol oleh *rim structure* sebagai hasil depresi D. Pangkalan dan *graben like NE-SW*, (2) ditutupi oleh lava andesit Gn. Gandapura berumur 300.000 tahun, (3) mempunyai manifestasi aktif di daerah tinggian seperti fumarola, *boiling spring*, intensif *steam heated alteration*. Struktur geologi mempunyai arah sesuai dengan kerapatan sesarnya berarah NE-SW dan NW-SE. Struktur berarah NW-SE merupakan struktur yang berumur lebih tua dibandingkan dengan struktur berarah NE-SW. Pertemuan kedua pola distribusi struktur ini menyebabkan terbentuknya zona geologi bawah permukaan sangat lemah, sehingga muncul manifestasi-manifestasi seperti diatas (Sudarman, dkk., 2003).

Di dalam area produksi, satuan batuan penyusun terdiri dari produk Gn. Cakra disebelah Timur menyebar ke utara, andesitik lava Pasir Jawa disebelah Barat menyebar ke Utara dan pyroxene andesite Gn. Cibatuipis menempati sebelah Tenggara. Pola distribusi batuan dan formasi agaknya mengikuti pola distribusi geologi regional Area Kamojang (Kamah, dkk, 2003).

Anomali gayaberat yang terukur di lapangan merupakan gabungan (superposisi) dari berbagai sumber anomali tersebut diatas. Tetapi belum ada peneliti yang menyatakan secara tegas, pola masing-masing anomali gayaberat tersebut. Identifikasi pola anomali gayaberat sangat penting, karena ada dua atau lebih sumber anomali yang memberikan respon yang sama/serupa. Misalnya penurunan *groundwater level change* dan produksi sama-sama memberikan anomali gayaberat *time-lapse* yang positif. Demikian juga antara *subsidence* dan reinjeksi memberikan anomali negatif.

### METODE PENGUKURAN

Secara garis besar metodologi yang digunakan adalah seperti pada gambar di bawah ini (gambar 1): Kegiatan penelitian pendahuluan yang dilakukan adalah *desk study*, meliputi perumusan model ideal, parameterisasi model, dan forward modeling untuk menampilkan model anomali sintetik. Model anomali sintetik ini sebagai bahan prediksi anomali, jenis dan amplitudo anomali yang akan muncul dilapangan. Hasil prediksi ini kemudian dibandingkan dengan data anomali lapangan hasil pengukuran langsung. Jika telah cocok maka dilanjutkan untuk memodelkan benda anomali bawah permukaan melalui inversi modeling. Pemetaan model dinamika reservoir didelineasi dari anomali gayaberatmikro 4D, gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dan perubahan rapat-massa hasil inversi.

Pemodelan ke depan atau *forward modeling* dilakukan dengan membuat model geometri dari benda anomali dengan rapat massa tertentu. Respon gayaberat dihitung pada titik amat yang telah ditentukan sebagai akibat dari anomali benda dengan rapat massa tertentu. Nilai gayaberat perhitungan ini dibandingkan dengan nilai gayaberat observasi. Jika kedua nilai tersebut berbeda jauh, maka perlu dilakukan modifikasi model benda anomali tersebut (geometri atau rapat massa).

Untuk menghitung nilai respon gayaberat dari benda berbentuk prisma digunakan persamaan yang telah diturunkan oleh Plouff (1976) sebagai berikut:

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[ z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right]$$

dimana

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

$$R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$$

Model prisma tersebut memiliki perubahan rapat massa  $\Delta\rho$  dengan geometri yang tetap. Untuk menghitung nilai respon dari sekumpulan prisma digunakan *subroutine* gbox yang dibuat Blakely (1995) (gambar 2).

Metoda inversi yang digunakan adalah metoda linier dengan asumsi geometri benda anomali tetap, sedangkan yang mengalami perubahan adalah rapat massa. Dengan demikian hubungan perubahan gayaberat faktor geometri, dan perubahan rapat massa dapat dinyatakan secara linier oleh persamaan :

$$\mathbf{d} = \mathbf{G} \mathbf{m}$$

di mana

$$\mathbf{d} = \Delta g$$

$$\mathbf{G} = \gamma \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[ z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right]$$

$$\mathbf{m} = \Delta\rho$$

Selisih gayaberat yang terukur di permukaan adalah representasi dari perubahan massa pada lapisan reservoir saja, lapisan *basement* dan lapisan penutup (*caprock*) diasumsikan tidak mengalami perubahan. Dalam penelitian ini, lapisan reservoir panasbumi dimodelkan sebagai kumpulan prisma yang membentuk suatu lapisan. Dengan asumsi lapisan reservoir hanya terdiri dari satu lapis, variasi perubahan rapat massa secara lateral dapat diketahui.

Masalah inversi linier tidak menghasilkan solusi yang tepat (model dengan kesalahan prediksi data sama dengan nol,  $E=0$ ) sehingga dioptimasi dengan metoda kuadrat terkecil untuk mencari model yang merupakan representasi solusi terbaik. Kriteria solusi terbaik didasarkan pada kesalahan prediksi data yang minimum. Solusi inversi linier pada dasarnya diperoleh dengan cara mencari minimum suatu fungsi objektif yang menyatakan selisih kuadratik antara

data pengamatan dengan data perhitungan untuk suatu model tertentu. Solusi permasalahan ini diberikan oleh:

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^T [\mathbf{G} \cdot \mathbf{G}^T]^{-1} \mathbf{d}$$

Solusi ini sering disebut sebagai solusi inversi liner dengan model minimum karena diperoleh dengan meminimumkan "panjang" vektor model  $\mathbf{m}$ . Dalam hal ini matriks  $\mathbf{G} \cdot \mathbf{G}^T$  adalah matriks bujur sangkar ( $N \times N$ ) yang diasumsikan inversinya dapat dihitung (bukan matriks singular).

### HASIL DAN DISKUSI

Perhitungan perubahan gayaberatmikro  $\Delta g$  pada suatu titik amat akibat dari model prisma dapat dilakukan dengan analogi persamaan (1), di mana model prisma memiliki perubahan rapat massa  $\Delta\rho$  dengan geometri yang tetap. Beberapa hasil forward modeling ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Model berupa prisma dengan ukuran 500 x 500 x 400 m, kedalaman atas reservoir 800 m, perubahan rapat-massa akibat produksi dan reinjeksi 0.02 gram/cc. Anomali maksimum yang diperoleh sebesar 20 mikroGal dan anomali minimum -20 mikroGal (gambar 4).

Data yang dianalisis dalam penelitian ini adalah data hasil pengukuran pada bulan Juni dan Nopember 2006. Metode pengukuran yang dilakukan adalah metode gradien verikal dengan beda tinggi 80 cm. Dari kedua pengukuran gayaberatmikro ini didapatkan anomali gayaberatmikro 4D periode Juni - November 2006 dan anomali gradien-vertikal gayaberatmikro 4D periode Juni-November 2006 yang akan dijadikan bahan analisa dinamika fluida reservoir panasbumi Kamojang. Hasil pengukuran gayaberat kedua perioda tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.

Nilai gayaberat pada kedua periode tersebut berkisar antara 977830 mGal hingga 977940 mGal. Nilai tersebut secara gradasional semakin mengecil dengan bertambahnya topografi, atau berkorelasi negatif dengan topografinya. Dengan asumsi tidak ada perubahan topografi akibat pemangkasan bukit yang besar dan penambahan bangunan disekitar titik pengamatan maka yang akan dibandingkan adalah nilai gayaberat observasi ini. Jadi sumber anomali gayaberatnya diasumsikan disebabkan oleh perubahan bawah permukaan, yaitu perubahan

reservoir panasbumi akibat produksi dan reinjeksi dan airtanah juga oleh *subsidence*.

Anomali Gayaberatmikro 4D adalah selisih gayaberatmikro ke-2 dengan gayaberatmikro ke-1, yang kemudian disebut sebagai Anomali Gayaberatmikro 4D Periode Juni - November 2006, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dibawah ini. Anomali gayaberatmikro ini menunjukkan perubahan nilai gayaberatmikro yang terjadi selama periode pengukuran, yaitu antara bulan Juni hingga November 2006. Nilainya berkisar antara 160 sampai -240 mikroGal. Nilai anomali ini masih merupakan gabungan beberapa sumber anomali permukaan (akibat *subsidence*) dan bawah permukaan (dinamika fluida bawah permukaan) (gambar 6).

Gradien-vertikal gayaberatmikro hasil pengamatan ke-1 (Juni 2006) dan ke-2 (November 2006) masing-masing ditunjukkan pada Gambar 7 dibawah ini.

Nilai gradien-vertikal gayaberatmikro merupakan hasil pengukuran gayaberat pada ketinggian tertentu, sehingga nilainya merupakan nilai insitu gradien-vertikal yang diukur langsung di lapangan. Anomali Gradien-Vertikal Gayaberatmikro 4D Periode Juni - November 2006 yang merupakan selisih antara pengamatan 2 terhadap ke-1 ditunjukkan pada Gambar 8. Karena anomali gayaberat merupakan superposisi dari beberapa sumber anomali maka untuk mengetahui perubahan yang terjadi akan dianalisa berdasarkan peta anomlai gayaberatmikro 4D dan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D (gambar 8).

Hubungan antara anomali gayaberatmikro 4D dan anomali gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dengan berbagai sumber anomalnya ditunjukkan pada Tabel 1. Hubungan ini merupakan hasil simulasi data sintetik yang diungkapkan Kadir (2004). Tabel 1 menunjukkan hasil identifikasi beberapa variasi hubungan gayaberatmikro 4D dan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dan hubungannya dengan sumber anomali, yaitu penambahan dan atau pengurangan massa bawah permukaan dan perubahan permukaan akibat *subsidence*.

Pendugaan dinamika fluida bawah permukaan akan analisa berdasarkan anomali gayaberatmikro 4D dan anomali gradien-vertikal gayaberatmikro 4D, yang ditunjukkan oleh Gambar 6 dan Gambar 8 dengan mengacu pada Tabel 1. Respon anomali gayaberatmikro 4D positif berhubungan dengan penambahan massa

(*increase mass*) dan *subsidence*. Nilai positif ini berhubungan dengan perubahan rapat-massa bawah permukaan positif dan *subsidence*. Dari gradien-vertikal gayabermikro 4D, nilai positifnya berhubungan dengan penambahan massa (*increase mass*) dan *subsidence* yang relatif nol. Hal yang sama juga terjadi pada pengurangan massa (*decrease mass*).

Hasil analisa digambarkan pada Gambar 9 berikut ini. Dalam gambar ini ditunjukkan area-area yang *subsidence*, penambahan massa dan pengurangan massa dimana kesemuanya berhubungan dengan perubahan massa atau rapat-massa akibat aktifitas produksi dan reinjeksi baik secara alamiah maupun buatan.

Area yang ditandai dengan warna merah menunjukkan area dengan pengurangan massa akibat produksi sumur-sumur di area ini. Area ini berhubungan dengan Kluster Kamojang bagian tengah sebagai pusat produksi disekitar Danau Pangkalan dan sumur-sumur produksi bagian utara sampai ke area Cikaleang. Area ini dikontrol oleh rim struktur sebagai batas dengan area lainnya. Area dengan warna biru berhubungan dengan pengurangan massa bawah permukaan dan *subsidence* yang dominan. Area ini termasuk area selatan Lapangan Kamojang. Diduga penambahan massa di sumur injeksi KMJ 32 bergerak menuju selatan. Hal ini sesuai dengan hasil tracer isotop.

Sedangkan warna hijau berhubungan juga dengan *subsidence* dan penambahan massa atau hanya penambahan massa bawah permukaan. Area ini mencakup area timur dan barat Lapangan Panasbumi Kamojang.

Pemodelan inversi dilakukan secara langsung dari data gayabermikro 4D periode Juni- November 2006. dengan input parameter grid 300 x 300 m x 300 m, pada kedalaman reservoir dari 800 – 1100 m. Hasil inversi dari data lapangan tersebut ditunjukkan pada Gambar 10, sebelah kiri menunjukkan anomali gayabermikro 4D hasil observasi periode November – Juni 2006 dan sebelah kanan adalah hasil inversinya. Model bawah permukaan hasil inversi juga ditunjukkan dalam bentuk prisma-prisma segi empat, seperti terlihat pada Gambar 11 bagian kanan.

Warna-warna tersebut menunjukkan perubahan rapat-massa reservoir dalam periode tersebut. Perubahan rapat-massa berkisar antara - 0.59 sampai 0.67 gram/cc. Perubahan rapat-massa positif besar (0.5 gram/cc) terjadi di area

selatan dan sebagian timur lapangan Kamojang. Hal berhubungan dengan pengurangan massa dan *subsidence* yang dominan seperti juga ditunjukkan oleh Gambar 9.

Anomali perubahan rapat-massa positif kecil (0.2 gram/cc) disekitar bagian tengah lapangan berhubungan dengan *subsidence* dan penambahan massa bawah permukaan atau penambahan massa saja seperti sudah digambarkan dengan area hijau pada Gambar 9. Anomali rapat-massa negatif besar (0.4 gram/cc) dengan area yang luas di bagian utara lapangan berhubungan dengan pengurangan massa yang relatif besar.

Anomali gayabermikro 4D yang diukur dilapangan menunjukkan perubahan bawah permukaan sebagai representasi perubahan rapat-massa. Perubahan rapat-massa ini juga representasi dari perubahan saturasi fluida dalam hal ini menunjukkan perubahan jumlah kandungan uap-air panas dan air yang terkandung dalam uap panas. Perubahan saturasi ini berhubungan dengan jumlah produksi dan reinjeksi dan keseimbangan dari keduanya. Dari hasil inversi diatas dapat terlihat jelas perubahan rapat-massa pada reservoir di kedalaman 800 – 1100 m dibawah permukaan dimana uap panas diambil melalui sumur-sumur produksi. Perubahan rapat-massa menunjukkan dinamika fluida bawah permukaan.

## KESIMPULAN

Dari hasil analisa diatas dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini :

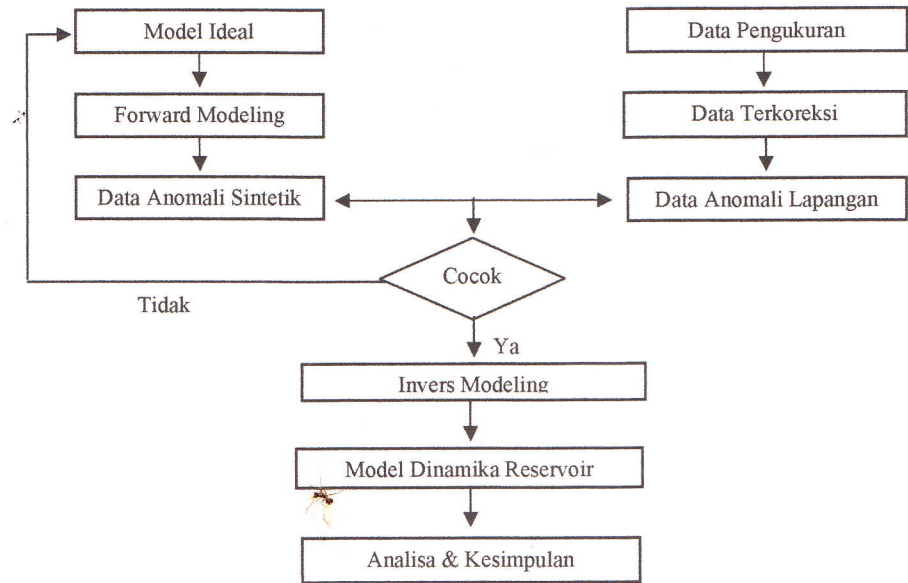
1. Anomali gayabermikro 4D yang terdeteksi dilapangan jauh lebih besar dari anomali yang teridentifikasi dengan forward modeling. Hal ini disebabkan idealisasi sumber anomali pada forward modeling dan superposisi sumber anomali lain belum dapat dipisahkan dari anomali reservoir.
2. Analisa dengan menggunakan anomali gayabermikro 4D dan anomali gradien-vertikal gayabermikro 4D dapat menduga zona-zona yang mengalami pengurangan massa dan penambahan massa dan juga zona *subsidence*. Analisa zonasi ini diperkuat dari hasil analisa perubahan rapat massa hasil inversi.
3. Anomali gayabermikro 4D berkisar antara - 240 sampai 120 mikroGal berhubungan dengan perubahan rapat-massa antara -0.59



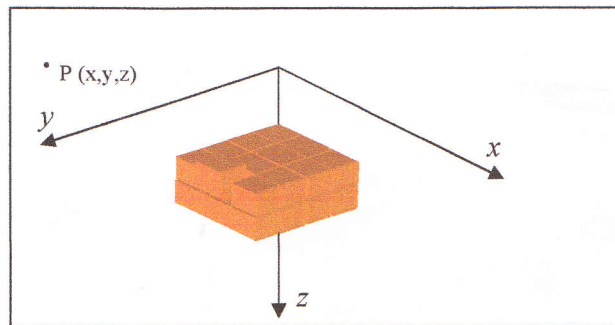
sampai 0.67 hasil inversi. Peta perubahan rapat-massa berhubungan dengan pergerakan fluida di dalam reservoir.

#### DAFTAR PUSTAKA

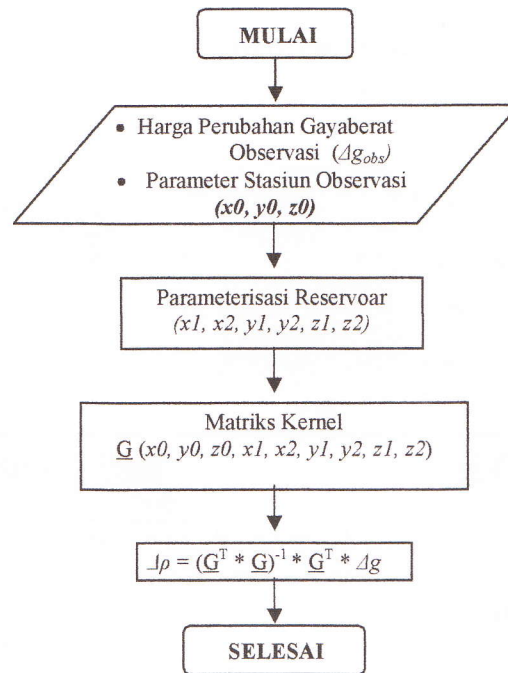
- Allis, R.G., Gettings, P., and Chapman, D.S., 2000, *Precise gravimetry and geothermal reservoir management*, Proceeding World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan.
- Allis, R.G, and Hunt, T.M, 1986, *Analisis of exploration-induced gravity changes at Wairakei geothermal field*, Geophysics 51, p. 1647-1660
- Blakely, R.J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Eysteinnsson, H., 2000, *Elevation and gravity changes at geothermal fields on The Reykjanes Peninsula, SW Iceland*, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan
- Hare, J.L., Ferguson, J.F., Aiken, C.L.V., and Braddy, 1999, *The 4D microgravity method for waterflood surveillance : A model study for Prodhoe Bay Reservoir, Alaska*, Geophysics, V.64, No.1, p. 76-87.
- Hunt, T.M. 2001. *Five Lectures on Environmental Effects of Geothermal Utilization*. Geothermal Training Programme. United Nations University.
- Kadir, W.G.A., Santoso, D., and Sarkowi, M., 2004, *Time Lapse Vertical Gradient Microgravity Measurement for Subsurface Mass Change and Vertical Ground Movement (Subsidence) Identification, Case Study : Semarang Alluvial Plain, Central Java, Indonesia*, SEGJ International Symposium, Japan.
- Kamah, Y., Tavip, D., Zuhro, A.A., 2003, *Penanggulangan problem geologi dalam operasi pemboran sumur di blok Timur area geotermal Kamojang Jawa Barat Indonesia*, Proceeding of The 6<sup>th</sup> Indonesian Geothermal Association-Annual Meeting & Conference, Bandung.
- Mariita, N.O. 2000. *Application of Precision Gravity Measurement to Reservoir Monitoring of Olkaria Geothermal Field, Kenya*. Proceedings World Geothermal Congress 2000, p2719-2724.
- Plouff, D. 1976. *Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections*. Geophysics 41, p727-741
- Rahman, F., *Pemodelan Gayaberat Mikro untuk Monitoring Reservoir Lapangan Panasbumi Kamojang*, Skripsi ITB.
- Sudarman, S., Mulyadi, Budiarjo, B., Silitonga, T., dan Masdjuk, M., 2003, *Penerapan Metoda Geofisika Di Kamojang : "A Lesson Learn"*, Proceeding of The 6<sup>th</sup> Indonesian Geothermal Association-Annual Meeting & Conference, Bandung.



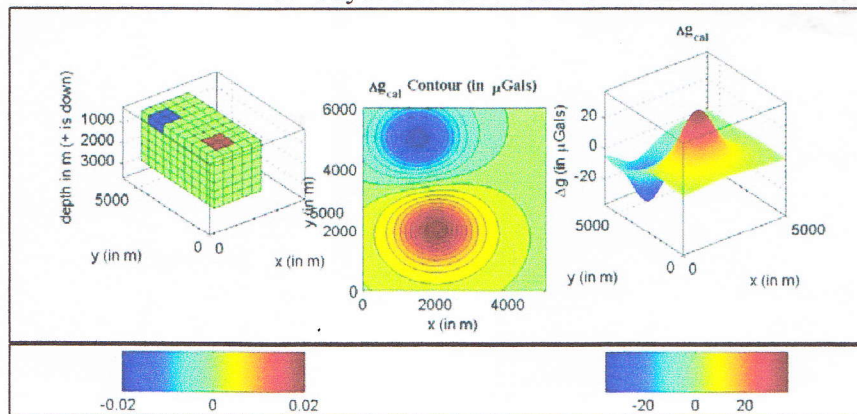
Gambar 1. Skema metodologi penelitian



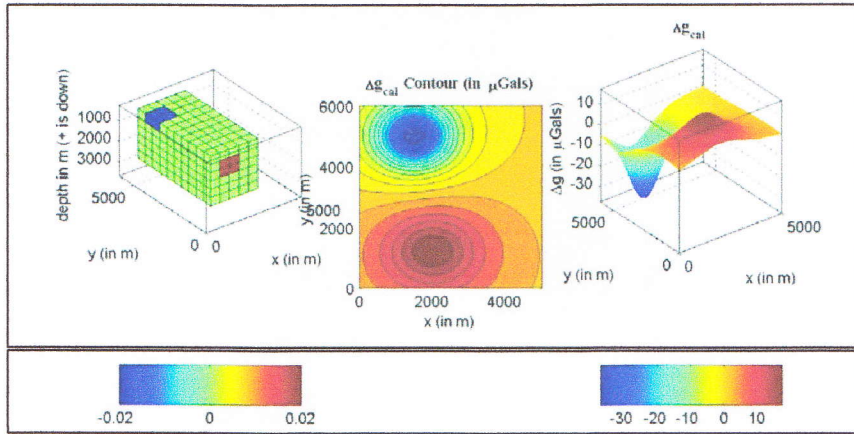
Gambar 2. Pendekatan geometri suatu massa dengan kumpulan prisma dalam bentuk grid  
(Sumber: Rahman, 2006)



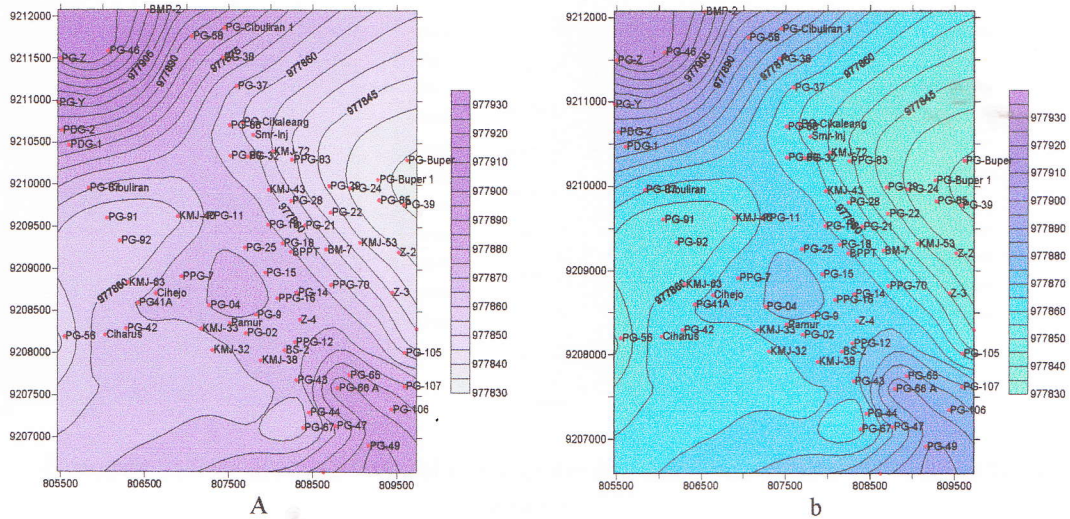
**Gambar 3.** Diagram Alir Metoda Inversi Linier Perubahan Rapat Massa Anomali Gayaberat dari Model Sintetik



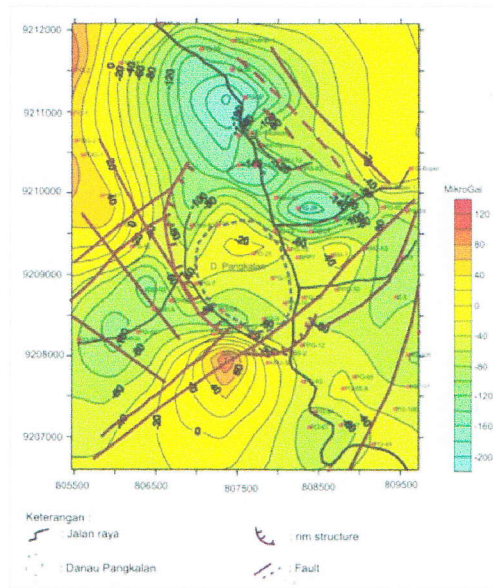
Anomali Gayaberat dari Model Sintetik



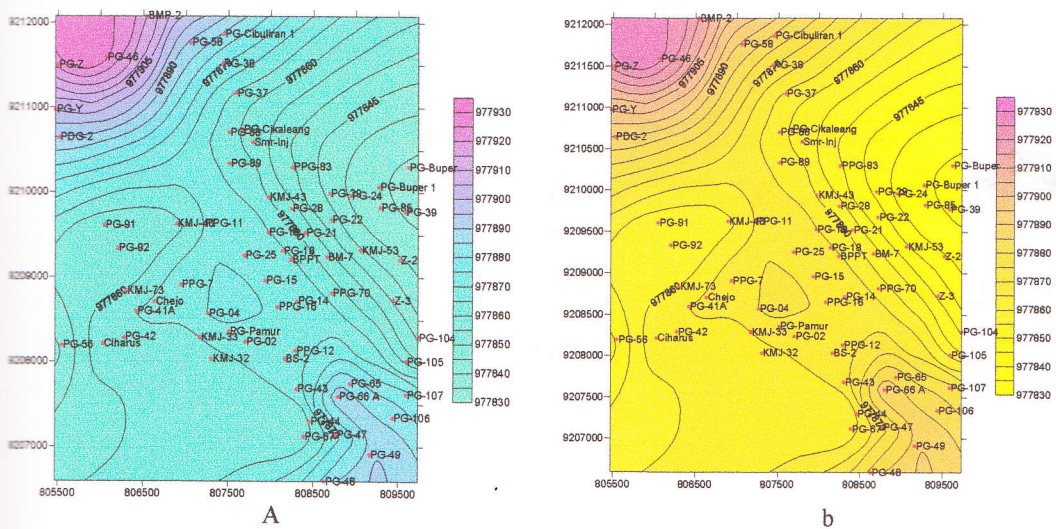
**Gambar 4.** Contoh hasil *forward modeling* untuk menunjukkan efek gayaberatmikro akibat perubahan saturasi fluida (rapat massa) reservoir panasbumi. Kontras rapat-massa positif dan negatif, masing-masing ditunjukkan oleh warna merah dan biru, dapat dipisahkan dengan jelas.



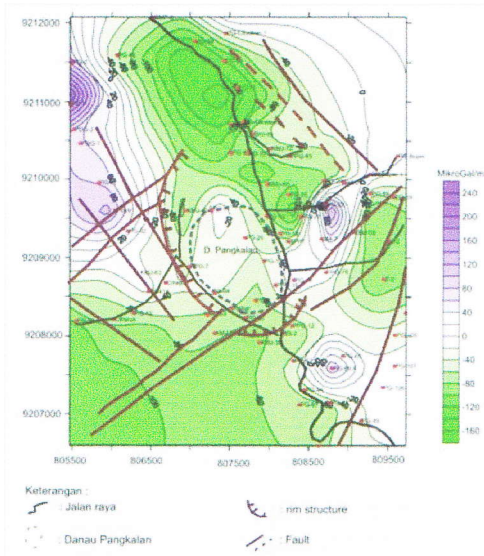
**Gambar 5.** Peta gayaberat Kamojang (a) Pengukuran Juni 2006; (b) Pengukuran Nopember 2006



Gambar 6. Peta Anomali Gayaberatmikro 4D Periode Juni – November 2006



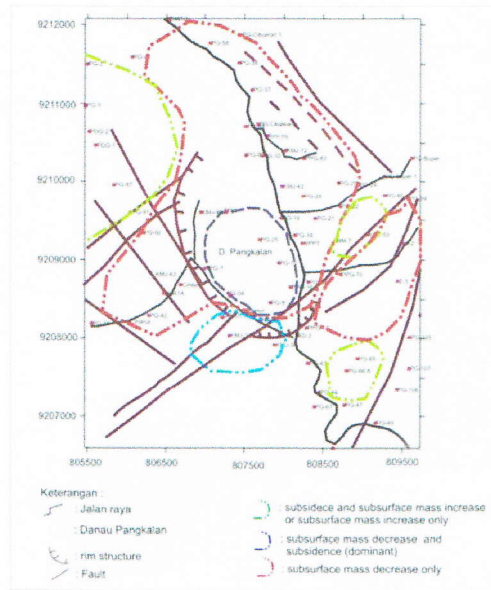
Gambar 7. Peta gradien-vertikal gayaberatmikro hasil pengamatan (a) Juni 2006; (b) Nopember 2006



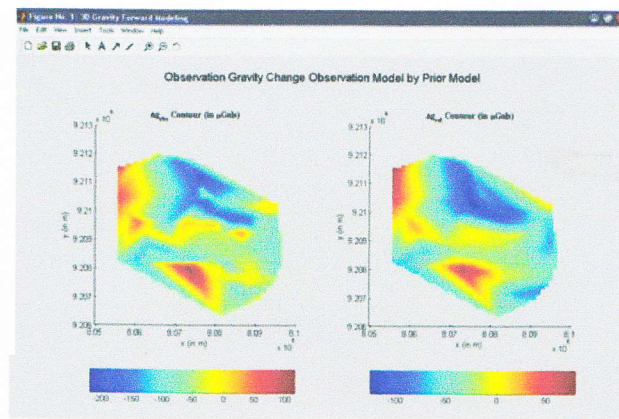
**Gambar 8.** Peta Gradien -Vertikal Gayaberatmikro 4D Periode Juni - November 2006

**Tabel 1.** Hubungan anomali gayaberat 4D dengan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dengan berbagai sumber anomalnya

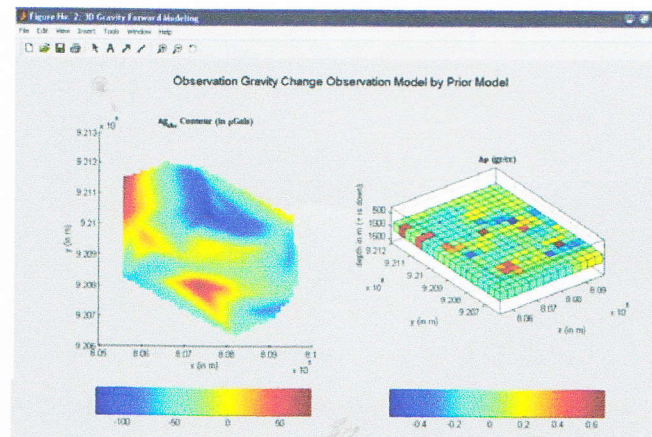
Time lapse value (µGal)	Time lapse vertical gradien value (µGal)	Anomaly Sources
+	+	Subsidence and sub-surface mass increase or sub-surface mass increase only
+	0	Subsidence only
+	-	Sub-surface mass decrease and subsidence (dominant)
-	-	Sub-surface mass decrease only
0	-	Sub-surface mass decrease = subsidence



**Gambar 9.** Hasil analisa zonasi subsidence, pengurangan dan penambahan massa dari anomali gayaberatmikro 4D dan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D



**Gambar 10.** Anomali gayaberatmikro 4D periode Juni – Nopember 2006 dan hasil inversinya



**Gambar 11.** Anomali gayaberatmikro 4D hasil inversi dan perubahan rapat-massa 3D