

TIME-LAPSE MICROGRAVITY UNTUK MONITORING DEFISIT MASSA RESERVOIR PANASBUMI KAMOJANG

Ahmad Zaenudin

Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Bandar Lampung, Indonesia 35145
E-mail: zae_unila@yahoo.com

Diterima 17 November 2009, disetujui untuk diterbitkan 2 Januari 2010

ABSTRACT

Geothermal field is a dynamic system. The exploitation of geothermal vapour causes change of some physical parameters, such as reservoir mass. Time-lapse microgravity method is one of the methods applied to monitor the mass deficit in Komajang geothermal field. The microgravity measurements have been done three times during 2006-2007 and the elevation change were measured with geodetic GPS. Based on the anomaly map *time-lapse microgravity* analysis, the mass deficit area (dry out) is shown by negative *time-lapse microgravity* (-) and the addition of water mass-reservoir injection (recharge) is represented by positive *time-lapse microgravity* (+). The negative *time-lapse microgravity* anomaly is represented by negative density (-) and vice versa. The big negative anomaly in the period of July 07 - June 06 was in the west of the field, in the area of rim structure and predicted due to the well production in KMJ-22, KMJ-28, KMJ-37, KMJ-41, KMJ-42, KMJ-27 and KMJ-65. The cutlet of 3D inversion map in the depth of 1000m showed the change the negative density mass up to -0.02 - -0.04 g/cm³. This result proved that the number of injection through injection well of KMJ-35 and KMJ-46 was not effective. The positive *time-lapse microgravity* anomaly represents the accumulation of injection water from injection well and/or the meteoric water accumulation which run through the faults. The presence of fluid flow in the reservoir is made clear by the result of analysis of tracer injection and micro earth quake.

Keywords: *time-lapse microgravity, monitoring, mass deficit*

ABSTRAK

Lapangan panasbumi merupakan sistem dinamis. Eksploitasi uap panasbumi menyebabkan perubahan beberapa parameter fisik, diantaranya massa reservoir. Metoda *time-lapse microgravity* merupakan salah satu metoda yang diterapkan untuk monitoring defisit massa pada Lapangan panasbumi Kamojang. Telah dilakukan pengukuran *microgravity* sebanyak 3 kali, selama tahun 2006-2007 dan pengukuran perubahan elevasi menggunakan GPS tipe geodetik. Dari analisis peta anomali *time-lapse microgravity*, area defisit massa (*dry-out*) ditunjukkan oleh anomali *time-lapse microgravity* negatif (-) dan penambahan massa air-injeksi pada reservoir (*recharge*) ditunjukkan oleh anomali *time-lapse microgravity* positif (+). Anomali *time-lapse microgravity* negatif (-) direpresentasikan sebagai anomali perubahan rapat-massa negatif (-) dan anomali *time-lapse microgravity* positif (+) sebagai perubahan rapat-massa positif. Anomali negatif besar periode Juli'07-Juni'06 terletak dibagian Barat lapangan, disekitar struktur rim, diduga terkait dengan aktifitas sumur produksi (KMJ-22, KMJ-28, KMJ-37, KMJ-41, KMJ-42, KMJ-27 dan KMJ-65). Dari sayatan peta inversi 3D pada kedalaman 1100 m (+ 400 m asl) menunjukkan perubahan rapat-massa negatif antara $-0,02$ sampai dengan $-0,04$ gram/cm³. Hal ini membuktikan bahwa jumlah injeksi melalui sumur injeksi KMJ-35, dan KMJ-46 kurang efektif. Anomali *time-lapse microgravity* positif merepresentasikan akumulasi air injeksi dari sumur injeksi dan atau akumulasi air meteorik yang mengalir melalui sesar-sesar. Adanya aliran fluida pada reservoir ini diperjelas dengan hasil analisis *tracer injection* dan gempa-mikro (MEQ).

Kata Kunci: *time-lapse microgravity, monitoring, defisit massa*

1. PENDAHULUAN

Anomali *time-lapse microgravity* pada lapangan panasbumi diakui sebagai alat yang berharga untuk memetakan redistribusi massa bawah permukaan yang berasosiasi dengan eksploitasi panasbumi. Secara umum, Hunt¹⁾ membagi sumber anomali *microgravity* utama di lapangan panasbumi terdiri dari komponen: (a) perubahan massa pada reservoir panasbumi, (b) perubahan muka airtanah (*groundwater level change*) dan (c) pergerakan tanah vertikal (*subsidence*). Penggunaan metoda *time-lapse microgravity* telah cukup lama digunakan tetapi memiliki keterbatasan dalam identifikasi perubahan massa pada reservoir panasbumi. Allis dan Hunt²⁾ menganalisis perubahan *microgravity* pada eksploitasi panasbumi Wairakei, New Zealand akibat aktifitas produksi dan reinjeksi. Allis et al.³⁾ menggunakan anomali *microgravity* untuk memantau zona *dry-out* dan zona saturasi. Allis et al.⁴⁾ menggunakan perubahan anomali *microgravity* untuk mendeliniasi perubahan saturasi pada lapangan The Geysers, dan Hunt⁵⁾ memantau pergerakan fluida air injeksi pada lapangan Wairakei, dimana besar anomali *microgravity* berhubungan dengan jumlah massa yang diinjeksi dan tempat air injeksi dimasukan; pada zona *steam, two-phase* atau *deep-liquid*, Branston and Styles⁶⁾ menggunakan untuk memonitor pergerakan bawah tanah sedangkan Davis et al.⁷⁾ menggunakan untuk penyimpanan air.

Pada perkembangan selanjutnya, pemantauan lapangan panasbumi dengan metoda *microgravity* dihubungkan dengan pengaruh fluktuasi muka airtanah (*groundwater level*) akibat curah hujan dan musim, seperti yang ditunjukkan oleh Allis et al.³⁾, Akasaka dan Nakanishi⁸⁾, Fujimitsu et al.⁹⁾, Takemura¹⁰⁾, dan Gettings¹¹⁾. Allis et al.³⁾ menghubungkan anomali *microgravity* akibat fluktuasi muka airtanah sebesar 5-10 $\mu\text{Gal/m}$. Gettings et al.¹¹⁾ mengukur anomali *microgravity* musiman dan tahunan berkaitan dengan kegiatan produksi, efek perubahan muka airtanah dan deformasi permukaan di The Geysers. Perubahan anomali *microgravity* konsisten dengan produksi musiman dan tahunan dan efek perubahan muka airtanah. Eksploitasi pada lapangan panasbumi dapat pula menyebabkan perubahan muka tanah vertikal (*subsidence* dan atau *inflation*). *Subsidence* umumnya terjadi didekat area produksi⁶⁾ dan kadang-kadang terjadi *inflation* (kebalikan *subsidence*) di area reinjeksi seperti pada lapangan Wairakei.

Makalah ini akan membahas penggunaan *time-lapse microgravity* untuk memantau defisit massa reservoir panasbumi. Respon anomali *microgravity* akibat eksploitasi uap pada reservoir telah dapat dipisahkan dari anomali dangkal akibat *subsidence* dan perubahan muka airtanah.

2. METODE PENELITIAN

Implementasi metode *time-lapse microgravity* untuk pemantauan perubahan massa di reservoir panasbumi Kamojang, meliputi :

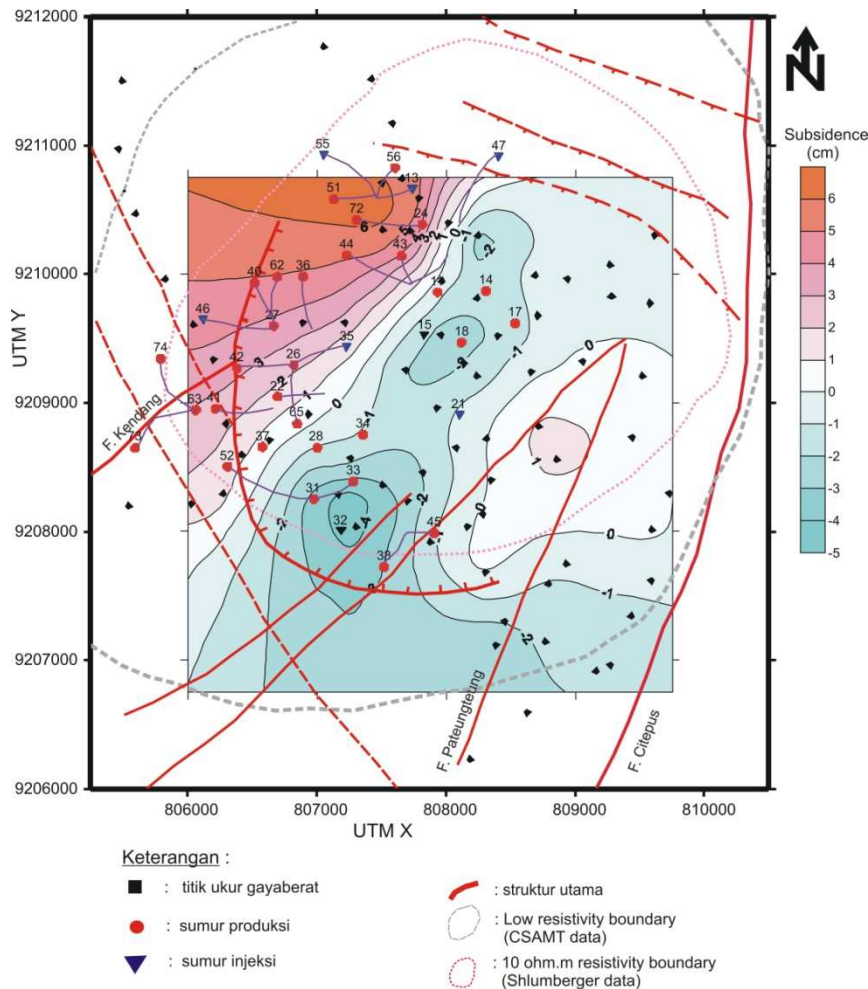
- (i) Pengukuran dan pengambilan data lapangan yang meliputi: data *microgravity*, data ketinggian, dan data kedalaman sumur airtanah.
- (ii) Pengolahan data *microgravity* hingga diperoleh anomali *time-lapse microgravity*.
- (iii) Koreksi anomali *microgravity* akibat pergerakan tanah vertikal (*subsidence* atau *inflation*) terhadap anomali *time-lapse microgravity*.
- (iv) Pemfilteran *stripping* data *time-lapse microgravity* hingga diperoleh anomali *time-lapse microgravity* hasil pemfilteran.
- (v) Pemodelan perubahan massa (rapat-massa) reservoir panasbumi Kamojang periode November'06-Juni'06 dan Juli'07-Juni'06. Analisis dan interpretasi perubahan massa (rapat-massa) reservoir panasbumi Kamojang dilakukan untuk periode pendek, yaitu November'06-Juni'06 dan periode Juli'07-Juni'06. Analisis dan interpretasi diharapkan dapat menggambarkan defisit massa pada reservoir panasbumi Kamojang didukung dengan data-data lainnya, sehingga didapatkan kajian yang lebih komprehensif sebagai bahan rekomendasi manajemen reservoir masa mendatang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari 3 kali pengukuran *microgravity* Juni 2006, November 2006 dan Juli 2007 didapat 2 buah anomali *time-lapse microgravity*, yaitu anomali *time-lapse microgravity* periode November 2006-Juni 2006 dan periode Juli 2007-Juni 2006. Kemudian, anomali *time-lapse microgravity* dikoreksi dengan anomali *microgravity* akibat amblesan. Koreksi amblesan dilakukan pada setiap titik pengukuran *microgravity*. Besar laju amblesan Kamojang pada periode Juni 2006 dan Juli 2007 ditunjukkan pada Gambar 1. Anomali

microgravity setelah dikoreksi dengan anomali gayberat akibat amblesan ini merupakan respon dari sumber bawah permukaan, yaitu anomali *time-lapse microgravity* akibat perubahan muka airtanah dan perubahan massa di reservoir panasbumi.

Anomali *time-lapse microgravity* negatif mengindikasikan adanya pengurangan airtanah (penurunan muka airtanah) dan atau pengambilan uap pada reservoir panasbumi. Anomali positif menunjukkan adanya imbuhan airtanah atau injeksi air pada sumur reinjeksi. Anomali total adalah gabungan anomali perubahan muka airtanah dan anomali pengurangan massa reservoir panasbumi. Untuk meminimalkan anomali *time-lapse microgravity* akibat perubahan muka airtanah, maka dilakukan pemfilteran *stripping* terhadap anomali *time-lapse microgravity* totalnya, sehingga anomali sisanya adalah anomali *time-lapse microgravity* akibat perubahan massa pada reservoir panasbumi. Berdasarkan kajian pustaka dan pengukuran sumur penduduk, kedalaman muka airtanah tak tertekan rata-rata lapangan Kamojang adalah 5-10 m. Berdasarkan perhitungan hubungan antara curah hujan dan penurunan muka airtanah didapatkan bahwa perubahan muka airtanah untuk setiap periode : November 2006-Juni 2006 sebesar -1,5 m; Juli 2007-November 2006 sebesar +1,9 m dan Juli 2007-Juni 2006 sebesar +0,4 m. Perubahan rapat-massa akuifer dangkal ($\Delta\rho_s$) akibat pengurangan massa airtanah ini adalah perkalian antara rapat massa fluida pengisi batuan (air) dikalikan dengan porositas batuan lapisan ini.



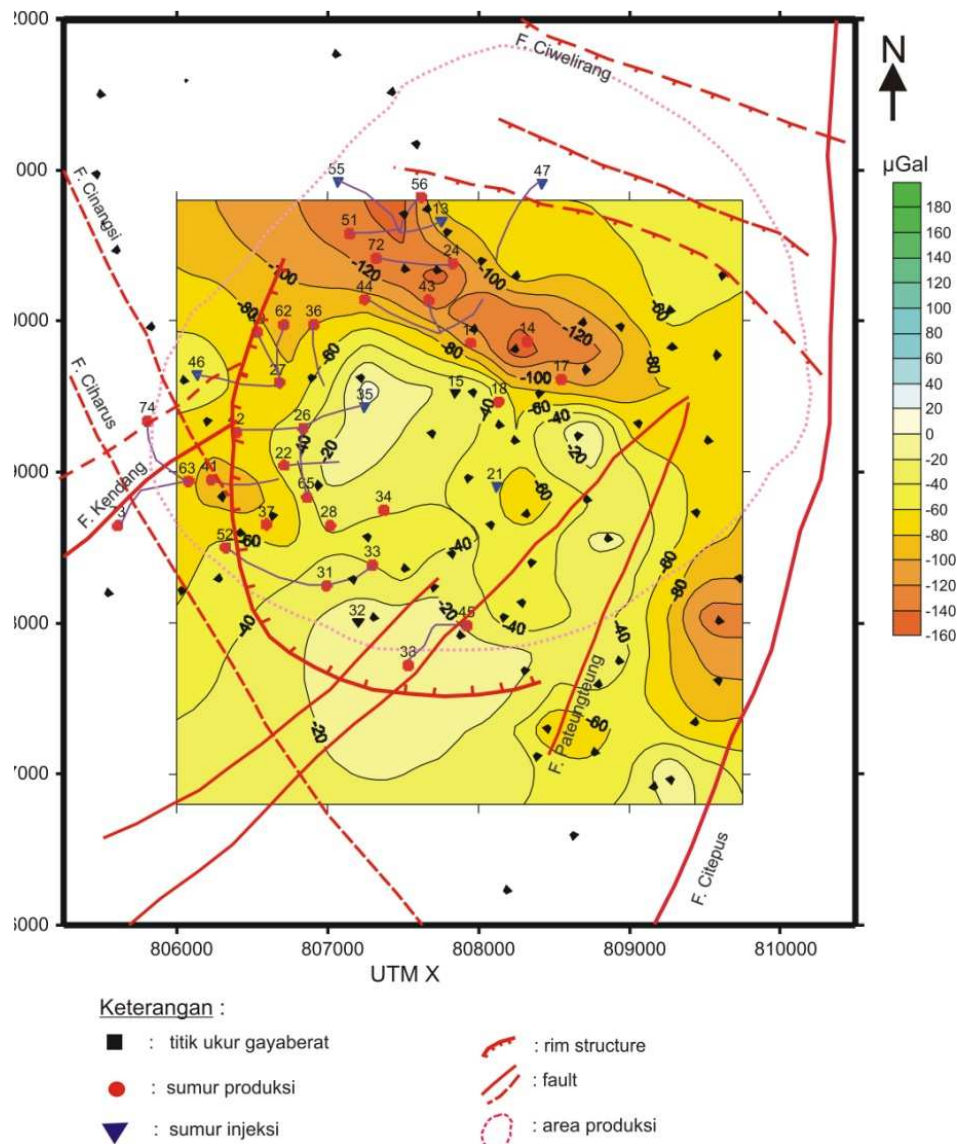
Gambar 1. Peta distribusi amblesan area panasbumi Kamojang berdasarkan data pengukuran periode 2006-2007

Perubahan rapat-massa reservoir merupakan perkalian rapat-massa fluida dalam reservoir dikalikan dengan porositas. Dengan rapat-massa fluida reservoir 0,26 gram/cm³ dan porositas reservoir rata-rata 7%, maka perubahan rapat-massa pada reservoir 0,02 gram/cm³. Pemfilteran pada anomali *time-lapse microgravity* periode November 2006-Juni 2006 diduga dengan parameter-parameter model dari benda

anomali sebagai berikut: $\Delta\rho_d = -0,02 \text{ gr/cm}^3$; $\Delta\rho_s = -0,30 \text{ gr/cm}^3$; $hd = 700 \text{ m}$; $hs = 5 \text{ m}$; $td = -200 \text{ m}$; dan $ts = -1,5 \text{ m}$. Berdasarkan pola anomali ini, maka digunakan faktor pembobot, $\Omega = 0,6$. Dari parameter-parameter ini dibuat spektrum amplitudo filter *stripping*.

Gambar 2 menunjukkan anomali *microgravity* pada reservoir panasbumi yang merefleksikan respon *microgravity* akibat perubahan massa reservoir dalam periode November 2006-Juni 2006. Secara umum, area produksi menunjukkan anomali negatif. Anomali negatif kecil sampai sedang ($< -80 \mu\text{Gal}$) muncul di sekitar area Tengah, Selatan dan Barat lapangan. Anomali nol pada area tersebut menunjukkan terjadi kesetimbangan antara jumlah produksi dan injeksi terlihat sebelah Selatan KMJ-44 dan KMJ-43. Keberadaan sumur injeksi KMJ-35 dapat mempertahankan kesetimbangan massa di reservoir. Terlihat pula keberadaan sumur injeksi KMJ-21 belum efektif dalam menambah jumlah massa.

Anomali negatif besar ($> -80 \mu\text{Gal}$) mendominasi di bagian Utara lapangan. Pada periode ini KMJ-13 belum diaktifkan sebagai sumur injeksi (diaktifkan awal 2007). Sumur-sumur injeksi KMJ-55 dan KMJ-47 belum dapat mempertahankan kesetimbangan massa di area reservoir bagian Utara ini.



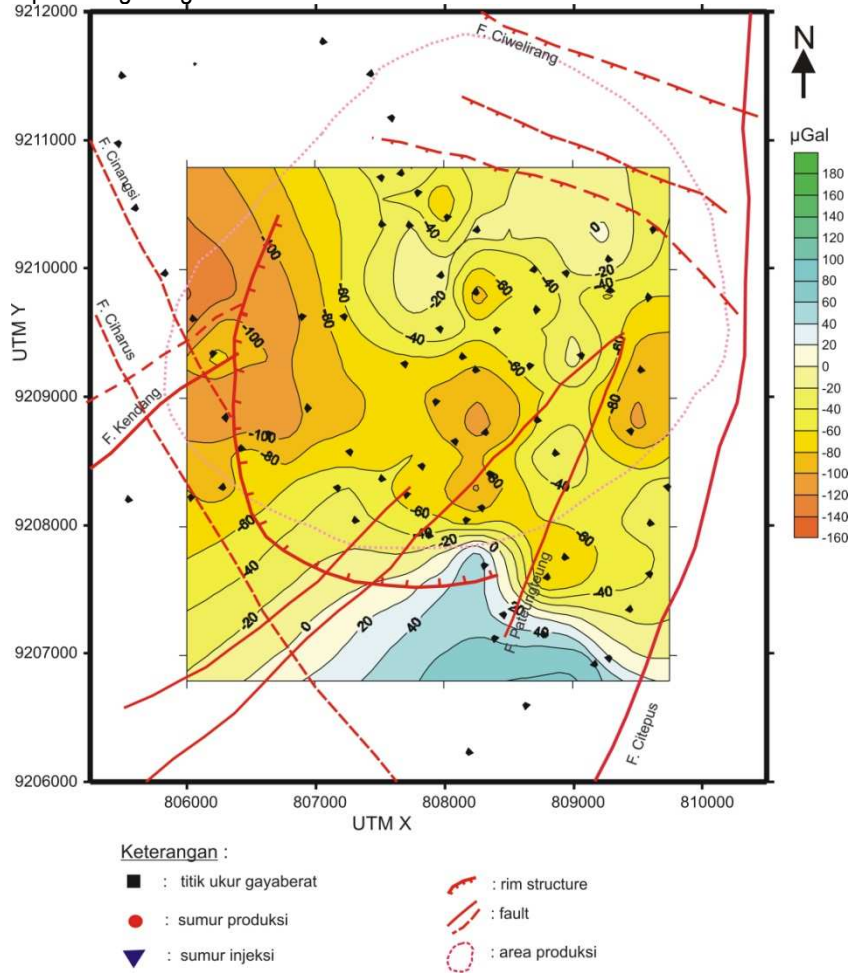
Gambar 2. Peta anomali *time-lapse microgravity* reservoir panasbumi Kamojang periode November 2006-Juni 2006 hasil pemfilteran

Anomali negatif besar diduga juga berhubungan kehilangan airtanah pada daerah lereng di bagian Utara ini karena kemiringan lereng yang lebih curam, dimana bagian Utara ini merupakan

bagian Daerah Aliran Sungai (DAS) Ciwelirang. Kehilangan yang besar dimungkinkan karena periode ini berlangsung dari awal kemarau (Juni) sampai akhir kemarau (November). Asumsi pengurangan airtanah yang merata diduga tidak terlalu tepat untuk area ini.

Pemfilteran anomali *time-lapse microgravity* periode Juli 2007-Juni 2006 diduga dengan parameter-parameter filter *stripping* sebagai berikut: $\Delta\rho_d = -0,02 \text{ gr/cm}^3$; $\Delta\rho_s = +0,30 \text{ gr/cm}^3$; $h_d = 700 \text{ m}$; $h_s = 5 \text{ m}$; $t_d = 200 \text{ m}$; $t_s = +0,4 \text{ m}$. Dari parameter-parameter ini dibuat spektrum amplitudo filter *stripping*. Dan hasil pemfilterannya ditunjukkan pada Gambar 3. Fak-tor pembobot (Ω) yang digunakan pada bagian Utara 0,4 dan bagian Selatan 0,6. Gambar 3 menunjukkan anomali *time-lapse microgravity* periode Juli 2007-Juni 2006 hasil pemfilteran *stripping*. Anomali negatif mencakup sebagian besar area, anomali positif ada bagian Selatan lapangan saja.

Anomali *time-lapse microgravity* periode Juli 2007- Juni 2006 memiliki nilai negatif lebih besar dari periode-periode sebelumnya, diduga karena periode ini memiliki rentang waktu paling panjang (12 bulan). Anomali negatif yang lebih besar ini menggambarkan pengurangan massa yang lebih banyak untuk jangka waktu yang lebih panjang. Penambahan massa melalui reinjeksi air melalui sumur injeksi KMJ-35 dan KMJ-46 di bagian Barat lapangan belum efektif mengimbangi pengurangan massa di bagian ini. Demikian juga dengan aktifitas penambahan massa di bagian Utara lapangan melalui sumur injeksi KMJ-13, KMJ-47 dan KMJ-55 belum dapat mengurangi defisit massa.

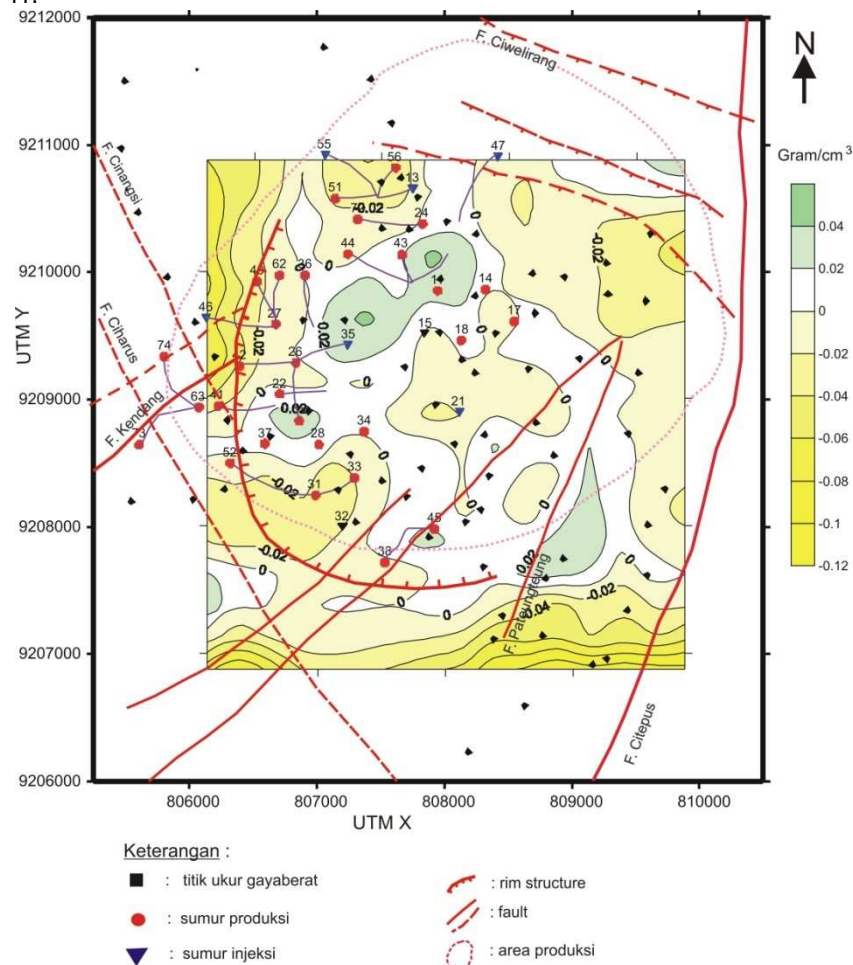


Gambar 3. Peta anomali *time-lapse microgravity* reservoir panasbumi Kamojang periode Juli 2007-Juni 2006 hasil pemfilteran

Di bagian tengah lapangan aktifitas penambahan massa melalui sumur injeksi KMJ-21 belum efektif mengurangi defisit massa sehingga menyebabkan anomali negatif -70 μGal . Anomali negatif ini diduga akibat sumur injeksi air pada KMJ-21 di kedalaman yang dalam, sehingga menambah massa terukur kecil terukur dipermukaan.

Metode interpretasi 3D ini dilakukan dengan menggunakan metoda inversi 3D dengan software Grav3D version 2.0 dari UBC-Geophysical Inversion Facility, University of British Columbia. Model lapisan disesuaikan dengan lapisan reservoir lapangan panasbumi Kamojang, dimana menurut Kamah, dkk (2003) lapisan reservoir terdiri dari dua zona produktif (*feed zones*) utama, *feed zone* atas (FZ I) berada pada +700 sampai dengan +800 m asl (*asl; above sea level*) dan *feed zone* bawah (FZ II) berada pada +100 sampai dengan +600 m asl. Produktifitas FZ II lebih besar daripada FZ I, yaitu 12 sampai 60 ton/jam @ WHP 15 Ksc untuk FZ I dan 30 sampai 87 ton/jam @ WHP 15 Ksc untuk FZ II.

Model perubahan rapat-massa periode November 2006- Juni 2006 dibuat pada FZ II berada, yaitu model perubahan rapat-massa pada elevasi +400 m asl (kedalaman 1100 m). Gambar 4 menunjukkan peta perubahan rapat-massa November 2006-Juni 2006. Peta perubahan rapat-massa ini sebagai menunjukkan perubahan massa reservoir pada kedalaman tertentu. Dari ketiga gambar ini, perubahan rapat-massa di area produksi uap berkisar antara -0,02 sampai dengan +0,02 gram/cm³. Perubahan rapat-massa negatif pada elevasi +400 m asl berada di sekitar sumur produksi KMJ-31, KMJ-33 dan KMJ-52 di bagian Barat-Daya dan di sekitar KMJ-51 dan KMJ-56 di bagian Utara lapangan. Sedangkan anomali positif perubahan rapat-massa di sekitar KMJ-11.



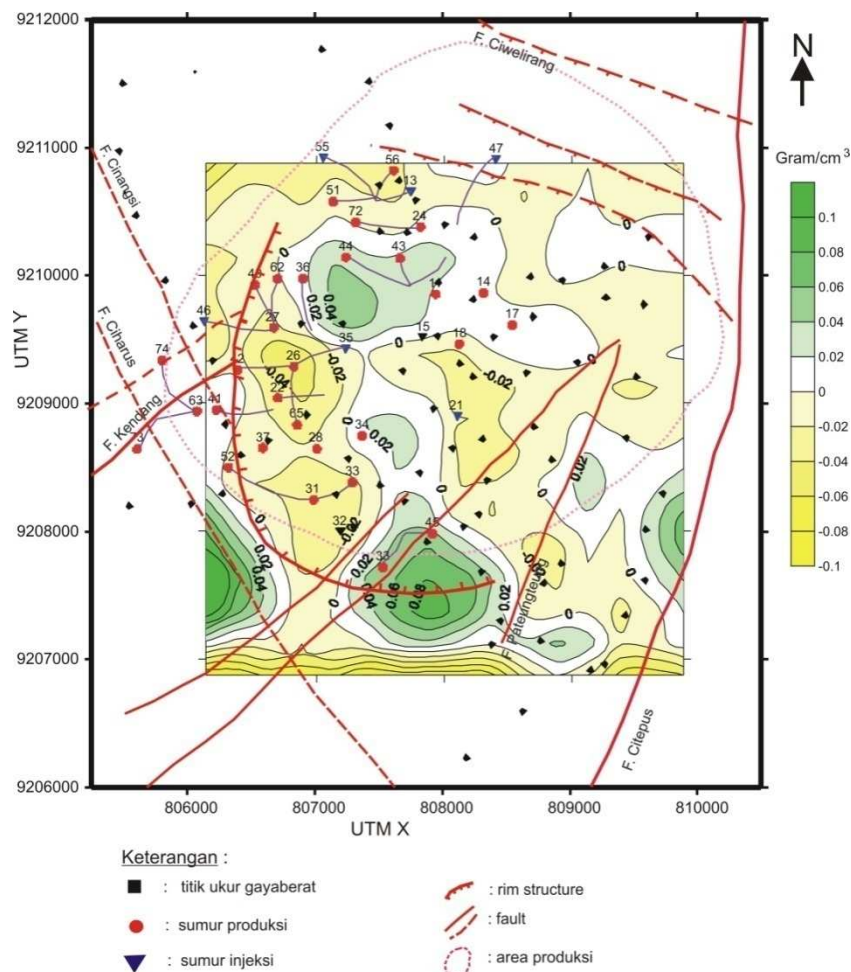
Gambar 4. Peta perubahan rapat-massa reservoir panasbumi Kamojang pada elevasi +400 m asl periode November 2006-Juni 2006.

Secara umum, perubahan anomali negatif pada FZ II yang di indikasikan sebagai perubahan rapat-massa akibat kegiatan produksi tersebar di tengah-tengah pusat produksi dimana sebarannya dikontrol oleh *rim-structure* di sebelah Barat, sesar Citepus di sebelah Timur dan struktur runtunan di sebelah Utara. Perubahan anomali di bagian Timur lapangan tidak banyak berubah sepanjang periode ini.

Perubahan rapat-massa pada periode Juli 2007-Juni 2006 ditunjukkan untuk FZ II oleh Gambar 5. Periode ini ditandai dengan meluasnya perubahan rapat-massa negatif di bagian Barat lapangan di sekitar

KMJ-22, KMJ-26, KMJ-27, KMJ-28, KMJ-65, hingga ke KMJ-31, KMJ-32 dan KMJ-33, dan di sekitar sumur injeksi KMJ-21. Dimana perubahan rapat-massa negatif tetap mendominasi di bagian Barat lapangan pusat produksi. Periode ini merupakan periode dengan jangka waktu yang lebih panjang sehingga pengambilan massa dalam rentang waktu ini juga lebih banyak. Hal ini diindikasikan oleh perubahan rapat-massa negatif yang lebih besar.

Dari Gambar 4 dan Gambar 5 nampak bahwa kontrol *rim-structure* di sebelah Barat lapangan sangat jelas terlihat, seolah-olah sebagai pembatas perubahan rapat-massa bagian ini. Di bagian Utara lapangan nampak bahwa aktifitas sumur injeksi KMJ-13 dan KMJ-55 berhasil membantu menyeimbangkan defisit massa. Perubahan rapat-massa positif di bagian Barat-laut lapangan lebih terkonsentrasi untuk kedalaman yang lebih dangkal (FZ I) di sebelah Timur KMJ-36. Sedangkan aktifitas sumur injeksi KMJ-13 dan KMJ-47 berhasil mempertahankan keseimbangan massa di bagian Utara lapangan pada kedalaman ini, dan perubahan rapat-massa di bagian tengah relatif stabil.

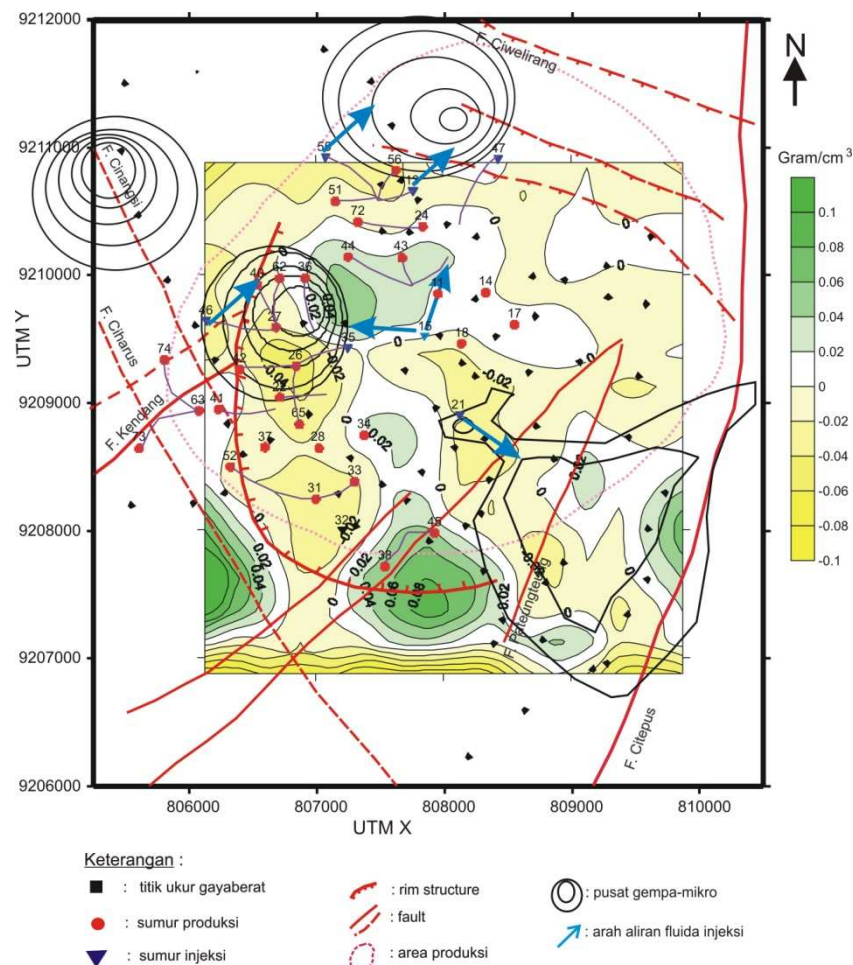


Gambar 5. Peta perubahan rapat-massa reservoir panasbumi Kamojang pada elevasi +400 m asl periode Juli 2007- Juni 2006

Sumur injeksi KMJ-21 tidak menunjukkan pengaruh yang berarti di bagian tengah lapangan pada kedalaman ini. Hal ini dimungkinkan karena pada KMJ-21 air diinjeksikan pada kedalaman yang lebih dalam, yaitu -238 m asl, dan menurut peta permeabilitas, sumur ini berada pada permeabilitas rendah, air injeksi tidak mudah bergerak ke bagian lain lapangan. Anomali perubahan rapat-massa positif di bagian Selatan lapangan diduga berhubungan dengan masuknya air melalui bidang pertemuan antara sesar mendatar (N 60°) dengan *rim-structure* hingga kedalaman reservoir. Air mungkin bergerak ke arah Selatan karena kemiringan lapisan semakin dalam ke arah Selatan. Akumulasi air ke arah Selatan ini juga terbukti dari kenyataan bahwa air injeksi dari sumur injeksi KMJ-32 yang mengalir ke Selatan, sehingga sumur injeksi ini

dihentikan pada tahun 2004, karena tadinya diharapkan aktifitas sumur injeksi ini dapat mengurangi defisit massa di area tengah.

Dari pembahasan sebelumnya dapat dianalisis bahwa perubahan *microgravity* (rapat-massa) berhubungan dengan aliran fluida, yang dapat diakibatkan oleh kegiatan ekstraksi fluida (produksi) dan *out-flow* alamiah atau akumulasi fluida dari sumur reinjeksi atau aliran air meteorik melalui sesar-sesar secara alamiah. Dari gambar-gambar sebelumnya dapat dilihat pula bahwa anomali *microgravity* atau perubahan rapat-massa negatif pada kedalaman tertentu berhubungan dengan sumur produksi dengan kapasitas besar. Analisis arah aliran fluida ini dapat dilihat dari pola aliran fluida yang diduga melalui *tracer injection*. Dari penginjeksian *tracer tritium* pada KMJ-15 tahun 1983 dan 1992 menunjukkan bahwa pola aliran fluida mengarah ke KMJ-26 dengan waktu tempuh 7-8 tahun dan mengarah ke KMJ-14 dengan waktu tempuh 3-4 tahun. Selain itu *tracer tritium* mengarah ke Barat memerlukan waktu 5-6 tahun melalui sesar normal berarah NW-SE dan sesar-mendatar SW-NE¹²⁾.



Gambar 6. Peta perubahan rapat-massa reservoir periode Juli 2007- Juni 2006 pada elevasi +400m asl diplot dengan MEQ dan arah aliran fluida injeksi dan hubungannya dengan struktur utama lapangan Kamojang^{12,13)}

Untuk menyeimbangkan defisit massa pada bagian Barat lapangan ditambahkan sumur injeksi KMJ-35 dan KMJ-46 agar waktu tempuh fluida yang relatif lama (7-8 tahun) dapat di atasi. Akan tetapi aliran fluida kedua sumur injeksi ini belum dapat mengatasi defisit massa area ini. Kemudian, aliran fluida juga dianalisis dari metoda gempa-mikro (MEQ), bahwa kemungkinan fluida dari reinjeksi di pusat reservoir cenderung mengarah ke Timur-Laut (NE) dan Barat-Laut (NW) seperti dikemukakan hasil penelitian lain^{12,13)}. Aktifitas gempa diakibatkan oleh bertemunya air bertemperatur rendah dengan batuan bertemperatur tinggi sehingga menyebabkan letupan-letupan sebagai sumber gempa, sehingga adanya gempa dapat dipakai untuk

menganalisis arah aliran fluida injeksi. Gambaran situasi di atas ditunjukkan pada Gambar 6.

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa gempa-mikro di daerah prospek berhubungan erat dengan adanya sumur injeksi, KMJ-35 dan KMJ-46 di bagian Barat, KMJ-21 di bagian Tenggara, dan KMJ-13 dan KMJ-55 di bagian Utara lapangan. Sedangkan gempa-mikro di bagian Barat-Laut disebabkan aliran fluida yang melalui sesar-normal berarah NW-SE (sesar Ciharus dan Cinangsi). Dari keadaan di atas, anomali *microgravity* positif (rapat-massa positif) di Barat-Laut diduga berhubungan dengan akumulasi fluida dari sumur injeksi KMJ-46 dan sisa fluida dari KMJ-15. Arah aliran fluida dari peta rapat-massa ditunjukkan oleh panah warna biru bersama arahnya. Sedangkan anomali *microgravity* positif (rapat-massa positif) di bagian Selatan diduga berhubungan dengan akumulasi fluida dari sesar *strike-slip* berarah N 60°.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pengoperasian sumur produksi secara kontinu akan mengakibatkan terkurasnya uap panasbumi sehingga terjadi penurunan produksi. Penurunan ini sangat bergantung pada permeabilitas dan teknik memproduksi uap. Permeabilitas yang tinggi menjamin mudahnya uap yang diproduksi terganti dengan massa air injeksi ke reservoir sehingga keseimbangan massa terjaga. Oleh karena itu pemantauan keseimbangan massa menjadi sangat penting untuk dilakukan secara kontinu. Metoda yang cukup baik untuk pemantauan keseimbangan massa adalah metoda *microgravity*. Namun demikian, metoda *microgravity* hanya merupakan salah satu alat yang dapat digunakan dalam pemantauan kesetimbangan massa reservoir panasbumi, selain *tracer injection*, gempamikro dan yang lainnya. Pemantauan dengan metoda *microgravity* dapat menunjukkan area defisit massa yang ditunjukkan oleh anomali *time-lapse microgravity* negatif atau anomali perubahan rapat-massa negatif. Anomali *microgravity* negatif yang signifikan terjadi disekitar sumur produksi KMJ-26 dengan perluasan kearah Utara dan Selatan. Hasil penentuan area defisit massa pada reservoir panasbumi Kamojang ini selanjutnya dapat dijadikan acuan dalam manajemen reservoir Kamojang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hunt, T.M., 2001. *Microgravity monitoring. Five lecture on environmental effect of geothermal utilization*. The United Nations University, Iceland 73 - 103
2. Allis, R.G. and Hunt, T.M., 1986. Analisis of exploration induced gravity changes at Wairakei geothermal field, *Geophysics*, **51**:1647-1660.
3. Allis, R.G., Gettings, P. and Chapman, D.S., 2000. Precise gravimetry and geothermal reservoir management, *Proceedings Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford California.
4. Allis, R.G., Gettings, P., Isherwood, W.F. and Chapman, D.S., 2001. Precision gravity change at The Geysers geothermal reservoir, 1975-2000, *Proceedings Twenty-sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, SGP-TR-168.
5. Hunt, T.M. ,2005. Using repeat microgravity measurements to track reinjection in liquid-dominated Fields, *Proceedings Word Geothermal Congress*, Antalya, Turkey.
6. Branston, M.W. and Styles, P., 2003. The application of Time-Lapse Microgravity for the Investigation and Monitoring of Subsidence at Northwich, Cheshire. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology* **36** (3): 231-244.
7. Davis, K., Li, Y. and Batzle, M., 2008. Time-lapse gravity monitoring: A systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery. *Geophysics*, **73** (6): WA61-69.
8. Akasaka, C., dan Nakanishi, S. 2000. A evaluation of the background noise for microgravity monitoring in the Oguni field, Japan, *Proceeding of 25th Stanford Geothermal Workshop*, 24-26 January 2000.

9. Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Shimosako, N., Ehara, S., and Ikeda, K., 000. Reservoir monitoring by repeat gravity measurements at The Takigami Geothermal Field, Central Kyushu, Japan, *Proceeding World Geothermal Congress*, Kyushu-Tohoku, Japan :573 – 577.
10. Takemura, T., Shiga, N., Yokomoto, S., Saeki, K., dan Yamanobe, H., 2000. Gravity monitoring in Yanaizu-Nishiyama Geothermal Field, Japan, *Proceeding World Geothermal Congress*, Kyushu-Tohoku, Japan, 2937 – 2941.
11. Gettings, P., Harris, R.N., Allis, R.G., dan Chapman, D.S., 2002 Gravity signal at The Geysers Geothermal Field, *Proceedings Twenty-seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, SGP-TR-171.
12. Budiarjo, B., Thamrin, M.H., Nugroho, dan Abidin, Z., 2002. Reijection wellsetting study at The Kamojang Geothermal Field based on geochemical Tracer and Microseismic, *Proceeding IAGI 31th Annual Conference*, Surabaya.
13. Sopyan, Y. 2006. *Monitoring pengaruh produksi dan reinjeksi terhadap reservoar geothermal dengan menggunakan metoda microgravity dan microearthquake (MEQ)*, Thesis, Universitas Indonesia.
14. Zaenudin, A., Kadir, W.G.A., Santoso, D., Abdassah, D. and Kamah, Y., 2010. Determination of Negative Density Changes in the Kamojang Geothermal Field Using Time-Lapse Microgravity Analysis. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*, 25-29 April.