

Jurnal MIPA

Terbit tiga kali setahun pada bulan April, Agustus, dan Desember

Bukti Matematika Menurut Wittgenstein
Hardi Suyitno

Magnetic Anomalies in Equatorial Regions
Eddy Mirnanda dan Supriyadi

Metode Gayaberat Mikro 4D untuk Monitoring Lapangan Panas Bumi
Ahmad Zaenudin, W.G.A Kadir, dan Djoko Santoso

Penumbuhan Film Tipis GaN di atas Substrat Si(111) dengan Metode DC Magnetron Sputtering
Sugianto, Sunarno, dan Didik A.

Pengaruh Waktu Lebur terhadap Parameter Termal dan Sifat Fisik Kaca Zinc-Tellurite
Sulladi

Analisis Perilaku Adsorpsi Cu(II) pada Asam Humat Menggunakan Model Isoterm Adsorpsi Langmuir
Sri Kadarwati

Analisis Ferro Secara Spektrofotometri Menggunakan 1,10-Fenantrolin sebagai Agen Pengompleks
Agung Tri Prasetya dan Kristi Apriliana

Analisis Senyawa Alkaloid dalam Daun Beluntas (*Pluchea indica* [L.] Less.) dengan Metode Spektroskopi
Ersanghono Kusumo, Nanik Wijayati, Linda Santi, dan Asti Ardiani

Pengaruh Jus Lidah Buaya (*Aloe vera*) terhadap Respon Proliferasi Limfosit Limpa Mencit Balb/c yang Diinfeksi *Salmonella typhimurium*
Ari Yuniastuti dan Nugrahaningsih W.H.

Karakteristik Habitat Rayap Tanah *Macrotermes gilvus* Hagen di Taman Nasional Ujung Kulon
Niken Subekti, Dedy Duryadi, Dodi Nandika, Surjono Surjokusumo, dan Syaiful Anwar

Diterbitkan oleh Fakultas MIPA Universitas Negeri Semarang

Jurnal MIPA	Vol. 30	N 3	Halaman	Semarang	Nov
			1-2	Desember 2007	2007

METODE GAYABERAT MIKRO 4D UNTUK MONITORING LAPANGAN PANAS BUMI

Ahmad Zaenudin^(1,2), W.G.A. Kadir⁽²⁾, dan Djoko Santoso⁽²⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung

⁽²⁾Teknik Geofisika Institut Teknologi Bandung

E-mail: zae_unila@yahoo.com

ABSTRAK

Produksi uap-air pada lapangan panas bumi mengakibatkan perubahan temperatur, tekanan, dan pengurangan massa di reservoir. Pengurangan massa sebagai representasi perubahan rapat-massa atau saturasi uap-air pada zona 2-fase dapat dideteksi dengan gayaberat mikro. Anomali negatif menunjukkan pengurangan massa dan sebaliknya anomali positif menunjukkan penambahan massa dan atau *subsidence*. Interpretasi menggunakan anomali gayaberat mikro antar-waktu (4D) dan gradien-vertikal gayaberat mikro 4D dapat mendeliniasi area-area yang mengalami pengurangan massa atau *subsidence* saja atau kombinasi dari keduanya. Pengetahuan ini dapat digunakan untuk mendesain penempatan posisi sumur-sumur produksi dan reinjeksi yang tepat agar produksi uap dapat dipertahankan lama.

Kata kunci: gayaberat mikro 4D, rapat-massa, saturasi, *subsidence*.

PENDAHULUAN

Penerapan metode gayaberat mikro telah mengalami banyak kemajuan dalam dekade terakhir ini. Metode gayaberat semula digunakan untuk memetakan geometri struktur yang relatif besar pada studi geodinamika dan eksplorasi dengan anomali orde besar ($10^3 \mu\text{Gal}$), sekarang sudah digunakan untuk studi *geoenvironment* dan monitoring dengan anomali-anomali kecil ($5 \mu\text{Gal}$). Hal ini disebabkan oleh kemajuan sistem pembacaan digital yang semakin baik dari alat gravimeter dengan akurasi 1-5 Gal.

Fungsi metode gayaberat mikro untuk tujuan monitoring telah dilakukan untuk berbagai kajian; aspek hidrologi (Lambert & Belmont, 1977; Goodkind, 1986), vulkanologi (Barnes, 1996; Rymer & Jones, 2000; Sugihara, 2001), dan pemantauan ladang minyak dan gas (Here dkk., 1999; Gelderen dkk., 1999).

Di Indonesia penggunaan metode gayaberat mikro *time-lapse* telah dilakukan oleh Kadir dkk. (2001), Santoso dkk. (2004) untuk monitoring injeksi uap atau air pada lapangan minyak bumi, dan terus dikembangkan sampai tahun 2007 ini. Selain itu, penggunaan metode gayaberat ini telah digunakan untuk pemantauan penurunan muka airtanah di kota Semarang oleh Kadir dkk. (2004) dan Santoso dkk. (2006).

LAPANGAN PANAS BUMI DAN KEBUTUHAN PEMONITORAN

Energi panas bumi bersifat *renewable*, artinya sepanjang ada sumber panas (magma), ada wadah (reservoir) dan ada suplay air ke reservoir, maka suplay uap ke turbin pembangkit energi akan dapat dipertahankan dalam jangka waktu yang lama. Yang terpenting adalah menyeimbangkan antara uap yang keluar (kegiatan produksi) dibarengi oleh

supalai air yang memadai ke reservoir (reinjeksi). Eksploitasi uap dari reservoir panasbumi secara terus-menerus akan menguras massa reservoir jika tidak dibarengi oleh *recharge* air ke reservoir. Dan biasanya jumlah produksi uap jauh lebih besar dari *recharge*, baik *recharge* alamiah maupun buatan. Untuk itu perlu manajemen monitoring untuk mem-pertahankan suplay uap tersebut.

Kegiatannya meliputi: (a) program monitoring rutin, (b) pengorganisasian sumur dari data-base multidisiplin, dan (c) inter-pretasi dari data fisika dan kimia untuk mendeteksi keadaan sumur dan lapangan pada umumnya. Program monitoring rutin yang biasa menggunakan metoda geokimia dan geofisika. Metoda geokimia yang biasa dilakukan adalah *tracer* isotop. Adapun metoda geofisika yang sering dilakukan adalah: (1) pengukuran gayaberat presisi antar-waktu (4D), (2) *levelling* atau GPS untuk pemantauan perubahan muka tanah (*subsidence*), (3) monitoring perubahan muka airtanah, dan (4) survei mikroseismik (MEQ).

STUDI GAYA BERAT UNTUK PEMONITORAN LAPANGAN PANAS BUMI

Monitoring menggunakan metoda gayaberat pada lapangan panasbumi digunakan untuk menaksir perubahan massa yang terjadi pada reservoir dan/atau pertumbuhan zona 2-fase akibat produksi dan reinjeksi fluida panasbumi. Secara umum perbedaan nilai/harga gayaberat pada suatu titik pada lapangan panasbumi diantara dua survei (terlepas dari kesalahan instrumen dan pembacaan) dapat dihasilkan oleh (Hunt, 2001):

- Perubahan massa pada reservoir panas bumi (yang dicoba untuk dicari);
- Pergerakan tanah vertikal (*subsidence dan inflation*);
- Perubahan muka air tanah (*groundwater level*);
- Perubahan saturasi pada zona aerasi;
- Perubahan topografi lokal;
- Pergerakan tanah horizontal;

• Perubahan gayaberat pada base station.

Efek gayaberat oleh perubahan massa pada reservoir panas bumi (*gravity changes = corrected gravity differences*) dihasilkan dari perbedaan gayaberat hasil observasi yang terkoreksi oleh efek pergerakan tanah, perubahan muka airtanah dan kelembaban tanah, yang dirumuskan sebagai:

$$\Delta g = (g_1 - g_2) + \left(\frac{dg}{dz} \right) \Delta h + \Delta g_w + \Delta g_a + \Delta g_t + b \quad (1)$$

dengan:

Δg : perubahan gayaberat antara t_1 dan t_2
 g_1 dan g_2 : harga gayaberat pada t_1 dan t_2

$\left(\frac{dg}{dz} \right)$: gradien-vertikal gayaberat

Δh : perubahan elevasi

Δg_w : gayaberat akibat perubahan muka airtanah

Δg_a : gayaberat akibat perubahan kelembaban

Δg_t : gayaberat akibat perubahan topografi lokal, dan

b : koreksi base station

Adapun penyebab utama perubahan gayaberat di reservoir panasbumi yang berasosiasi dengan eksploitasi uap air adalah:

- a) Penurunan tekanan liquida pada zona 2-fase;
- b) Perubahan saturasi pada zona 2-fase;
- c) Perubahan rapat-massa liquida karena perubahan temperatur.

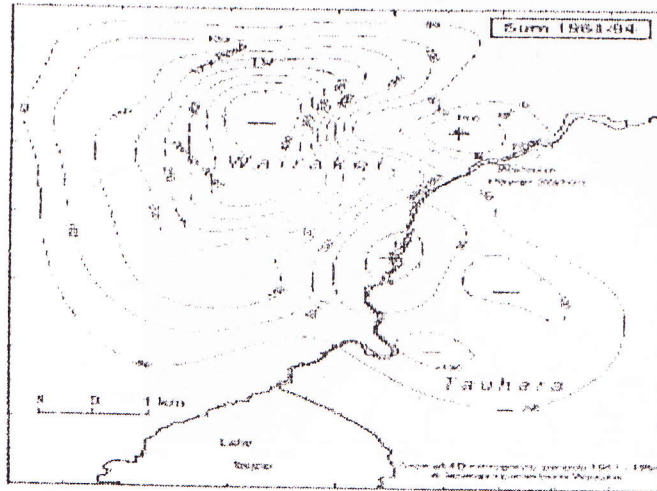
Ketiga penyebab fisis perubahan massa tersebut yang saling berkombinasi untuk menghasilkan sebagian terbesar dari perubahan gayaberat teramati di permukaan bumi. Sehingga untuk memunculkan efek perubahan gayaberat yang terjadi di reservoir, maka perlu dikembangkan teknik-teknik pengukuran gayaberat yang optimal dan teknik reduksi 'noise' lingkungan reservoir.

Metode gayaberat untuk pertama kalinya digunakan untuk memantau produksi uap di lapangan panasbumi Wairakei, New Zeland.

Anomali gayaberat (setelah dikoreksi *subsidence*) untuk periode 1961-1994 ditunjukkan pada Gambar 1. Pada periode ini menunjukkan anomali gayaberat -400 mikroGal dan melebar ke arah barat pada area bor produksi seluas 1 km².

Ini mengindikasikan adanya kehilangan

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



Gambar 1. Perubahan gayaberat lapangan panas bumi Wairakei, New Zeland (Hunt, 2001)

massa atau penurunan kandungan uap air pada reservoir. Sedangkan disekitar pembangkit listrik dan sumur injeksi memiliki anomali +100 mikrogal yang mengindikasikan penambahan massa di daerah tersebut. Jadi anomali negatif menunjukkan bahwa selama periode tersebut terjadi pengurangan massa yang cukup besar disekitar sumur produksi.

Kemudian Mariita (2000) untuk mengamati reservoir panasbumi Olkaria, Kenya. Perubahan gayaberat akibat eksploitasi dalam orde -180 mikrogal pada periode 1988-1996 (Gambar 2). 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*

bahwa *subsidence* tersebut terutama disebabkan kompaksi pada pori-pori matrik batuan. Perubahan gayaberatnya relatif kecil. Efek *subsidence* dikoreksikan sebesar 5 mm/tahun pada data gayaberat. Perhitungan perubahan massa dengan menggunakan hukum Gauss mengindikasikan bahwa 70% adalah *recharge* alamiah.

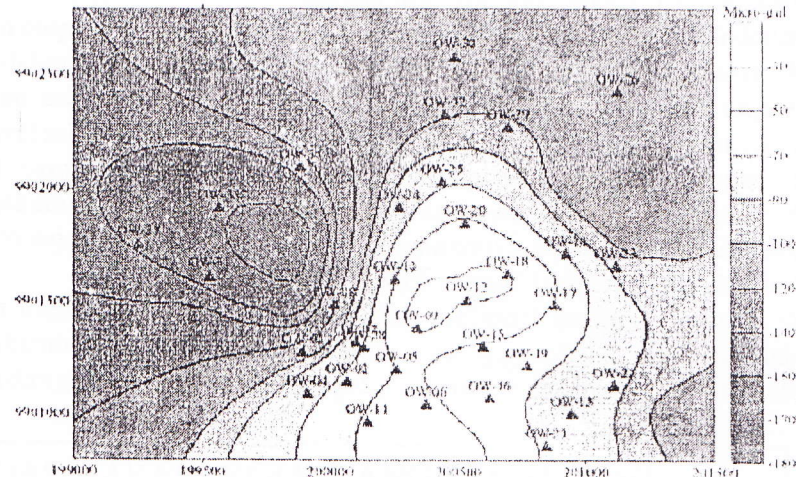
Hunt (2001) merumuskan bahwa trend penelitian gayaberat untuk monitoring panasbumi pada adalah pada: (1) penentuan efek perubahan muka airtanah dan kelembaban, (2) perbaikan dalam mengukur dan menentukan efek dari *subsidence*, dan (3) *Borehole gravimetry*.

Hunt (2005) dapat menunjukkan bahwa efek gayaberat dari reinjeksi bergantung pada jumlah massa yang diinjeksikan dan kondisi reservoir terdekat tempat air injeksi tersebut dimasukkan (pada *steam, two-phase* atau *deep liquid zone*). Efek dari reinjeksi dimodelkan 2D sebagai perubahan rapat-massa dan

interpretasi 2D sederhana gayaberat akibat reinjeksi. Magnitudo gayaberat terbesar terjadi ketika air injeksi men saturasi *steam* atau *two-phase zone*, dan dilokasi yang tak jauh dari titik reinjeksi.

Perkembangan berikutnya pada monitoring

perubahan gayaberat dengan perubahan muka airtanah didekati dengan analisis regresi multivariable (*multivariate regression model*). Ternyata korelasi antara pengukuran perubahan muka airtanah dangkal dengan perubahan gayaberat tidak didapatkan.



Gambar 2. Anomali gayaberatmikro lapangan Olgaria-Kenya periode 1988-1996 (Mariita, 2000)

gayaberat panasbumi adalah pengembangan perhitungan efek hidrologi dekat permukaan, dan perubahan elevasi (*subsidence*), karena anomali gayaberatnya cukup besar seperti dijelaskan sebelumnya.

Akasaka & Nakanishi (2000) mengkalibrasikan efek gayaberat akibat perubahan musim dan fluktuasi airtanah dangkal dengan mengukur gayaberat pada suatu *benchmark* yang perubahan muka airtanahnya juga terukur. Estimasi perubahan muka airtanah didekati dengan persamaan empiris data *precipitation*. Perubahan gayaberat yang diestimasi dari data *precipitation* dibandingkan dengan data pengukuran gayaberat lapangan aktual. Akan tetapi, tidak ada hubungan yang nyata antara *precipitation* dengan perubahan gayaberat yang dihasilkan.

Fujimitsu dkk. (2000) mencoba mengkoreksikan pengaruh gayaberat akibat fluktuasi airtanah dengan teknik statistik untuk mengisolasi perubahan gayaberat di reservoir akibat produksi dan reinjeksi. Korelasi antara

Kemudian analisis regresi multivariable diaplikasikan untuk menghubungkan antara perubahan gayaberat dan *precipitation*, dan didapatkan korelasi yang baik diantara keduanya. Sehingga estimasi perubahan gayaberat akibat perubahan muka airtanah dimungkinkan jika tersedia data *precipitation*.

Takemura dkk. (2000) menghubungkan variasi gayaberat periode pendek dengan variasi tekanan barometrik dan temperatur udara dan perubahan muka airtanah setempat. Dari korelasi antara perubahan gayaberat, perubahan tekanan dan temperatur, juga perubahan muka airtanah dapat direduksi 'noise' gayaberat akibat periode sesaat tersebut.

Gettings *et al.* (2002) melakukan pemantauan gayaberat presisi dan survey GPS. Pengukuran dilakukan 3 kali dalam setahun, bertujuan untuk mengetahui perubahan musiman dan tahunan gayaberat dan signal deformasi di The Geysers. Perubahan gayaberat ternyata besarnya

konsisten terhadap musim dan produksi tahunan dan efek airtanah. Variasi spasial pada perubahan gayaberat dapat merefleksikan injeksi dan respon airtanah lokal.

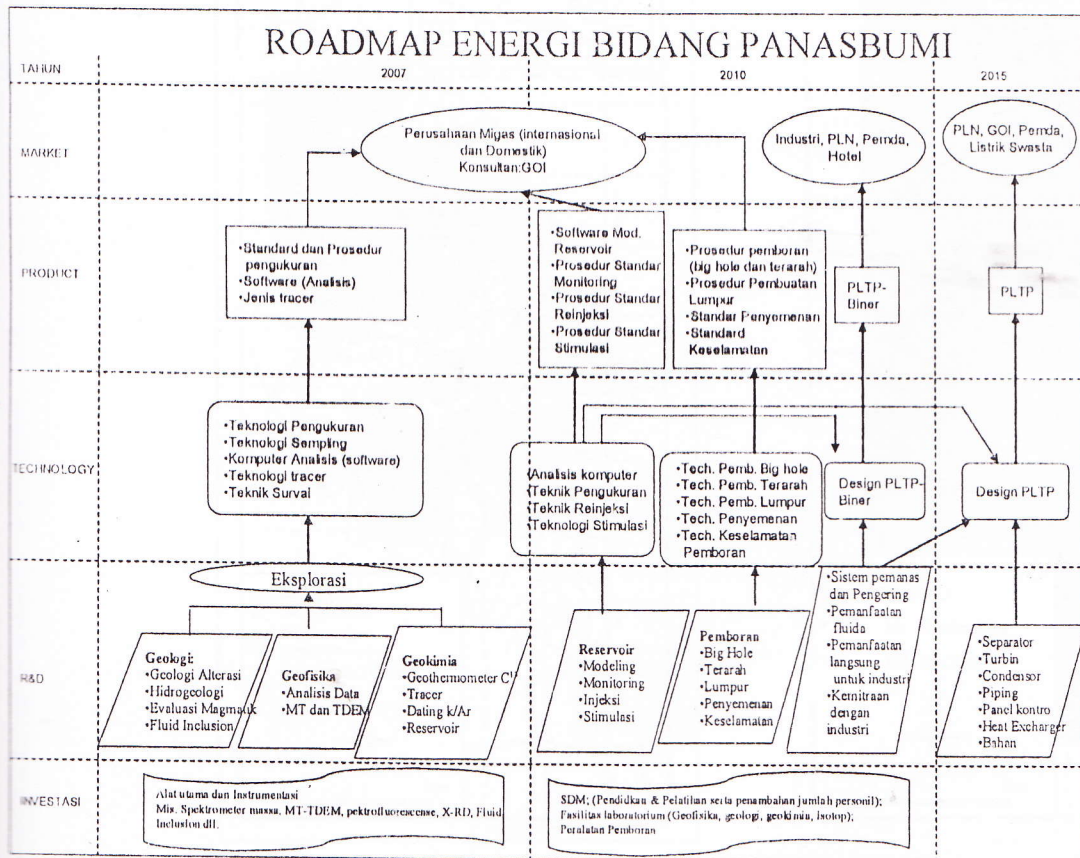
ROAD MAP PENELITIAN ENERGI PANAS BUMI DI INDONESIA

Indonesia diketahui mempunyai potensi energi panasbumi terbesar didunia, yaitu sekitar 40% cadangan dunia atau sekitar 20 GWe setara dengan 9 billion barrel minyak untuk 30 tahun operasi. Tetapi sampai saat ini pemanfaatan energi panasbumi untuk tenaga listrik baru mencapai 3-4% saja (Tamburaka, 2003).

Dasar pertimbangan mengapa prospek panasbumi perlu segera dikembangkan adalah karena menipisnya cadangan migas di

Indonesia. Selain itu energi panasbumi ramah lingkungan dibandingkan sumber energi alternatif lainnya. Sejalan dengan itu kemajuan penelitian dan pemanfaatan energi panasbumi diharapkan semakin cepat berkat lahirnya Undang-Undang Panasbumi tahun 2003. Dimana investor mendapat kepastian hukum untuk menanamkan investasinya di Indonesia.

Pemanfaatan energi panasbumi akan semakin ditingkatkan untuk menjawab kebutuhan energi yang semakin meningkat, dan semakin menipisnya sadangan migas pada tahun-tahun mendatang. Penelitian dan pengembangannya telah dipetakan sampai tahun 2015 seperti terlihat pada Gambar 3. Penelitian meliputi berbagai bidang ilmu kebumian (geologi, geofisika, geokimia), teknik pengeboran sumur dan reservoir, dan teknik



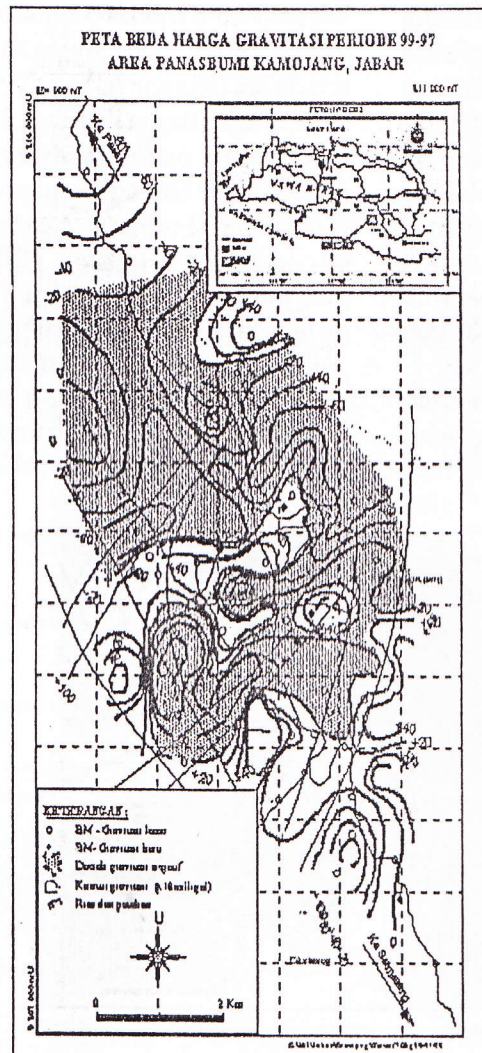
Gambar 3. Road map energi bidang Panasbumi (Sumber : Kementerian Riset dan Teknologi, 2004)

pembangkitan energi listriknya, sehingga menghasilkan produk yang bisa dimanfaatkan oleh industri listrik (PLN) atau swasta. Kesemuanya itu tentunya memerlukan investasi besar baik dari pemerintah maupun dukungan dana investor luar negeri.

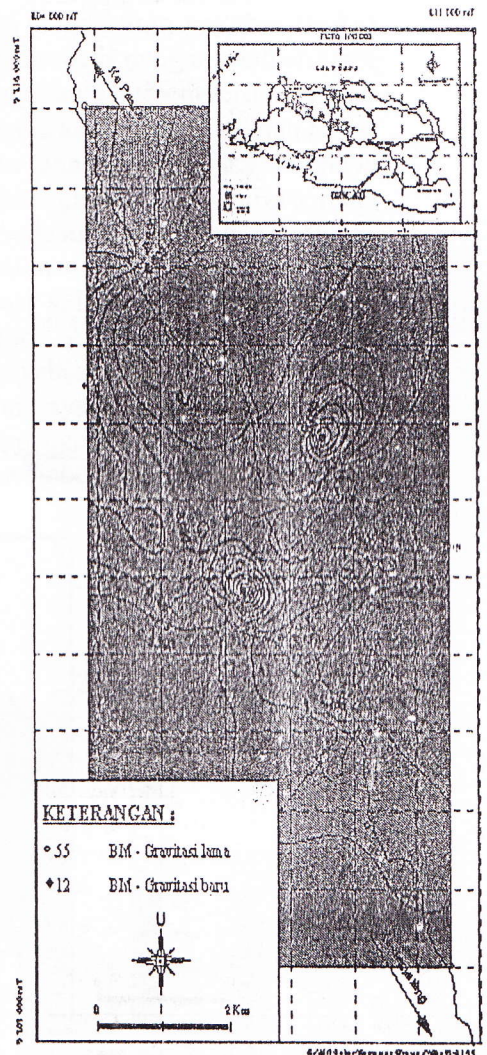
PENERAPAN METODE GAYABERAT MIKRO 4D DI LAPANGAN PANAS BUMI KAMOJANG

Kamojang adalah lapangan panasbumi pertama di Indonesia, telah dikembangkan dan

dioperasikan selama 25 tahun lebih, mulai dari tahapan eksplorasi hingga produksi listrik 140 MWe saat ini. Kegiatan eksploitasi awal dilakukan dengan pengembangan Unit I (30 MWe) pada tahun 1981 oleh PT PLN dan pengelolaan lapangan oleh Pertamina. Kemudian ditingkatkan menjadi 140 MWe dengan penambahan Unit II dan Unit III (2 x 55 MWe) pada tahun 1987, dan sekarang dikembangkan Unit IV hingga produksi total diharapkan mencapai 200 MWe (Sudarman, dkk., 2003).



Gambar 4. Peta Perubahan Gayaberat Kamojang Periode 1999-1997 (Sumber: Divisi Panasbumi, Pertamina)



Gambar 5. Perubahan elevasi Kamojang periode 1999-1984 (Sumber: Divisi Panasbumi, Pertamina)

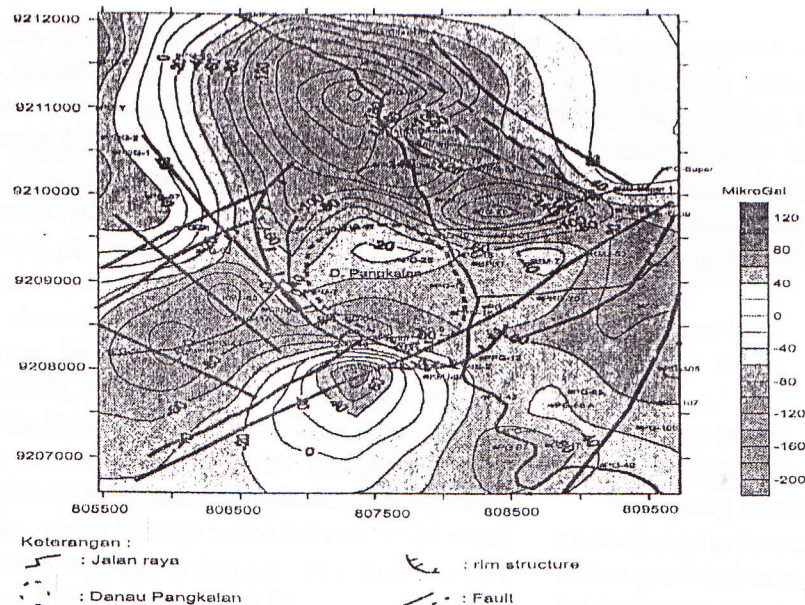
Kegiatan produksi uap menyebabkan perubahan-perubahan di dalam reservoir lapangan panasbumi baik tekanan, temperatur dan penurunan produksi uap itu sendiri. Sehingga sejak tahun 1984 di mulailah proses monitoring dengan menggunakan metoda gayaberatmikro (presisi) untuk memantau pengurangan massa di reservoir mulai dilakukan. Kemudian pengukuran gayaberatmiro dilakukan hampir secara periodik, yaitu pada tahun 1989, 1992, 1997, 1999 dan 2004.

Perubahan harga gayaberatmikro secara signifikan dapat diamati, seperti diperlihatkan pada Gambar 4 (Kamah, dkk., 2003). Untuk periode 1999-1997 terlihat anomali gayaberat negatif dan positif. Anomali negatif menunjukkan pengurangan massa dibawah permukaan (reservoir) dan anomali positif menunjukkan penambahan massa. Anomali gayaberat negatif 1999-1997 antara -20 sampai -60 mikrogal di bagian tengah lapangan, menunjukkan pengurangan massa di bagian ini dimana sumur-sumur produksi terpusat disini. Demikian juga perubahan elevasinya (*subsidence*) seperti diperlihatkan pada Gambar 5. *Subsidence* terbesar periode 1999-

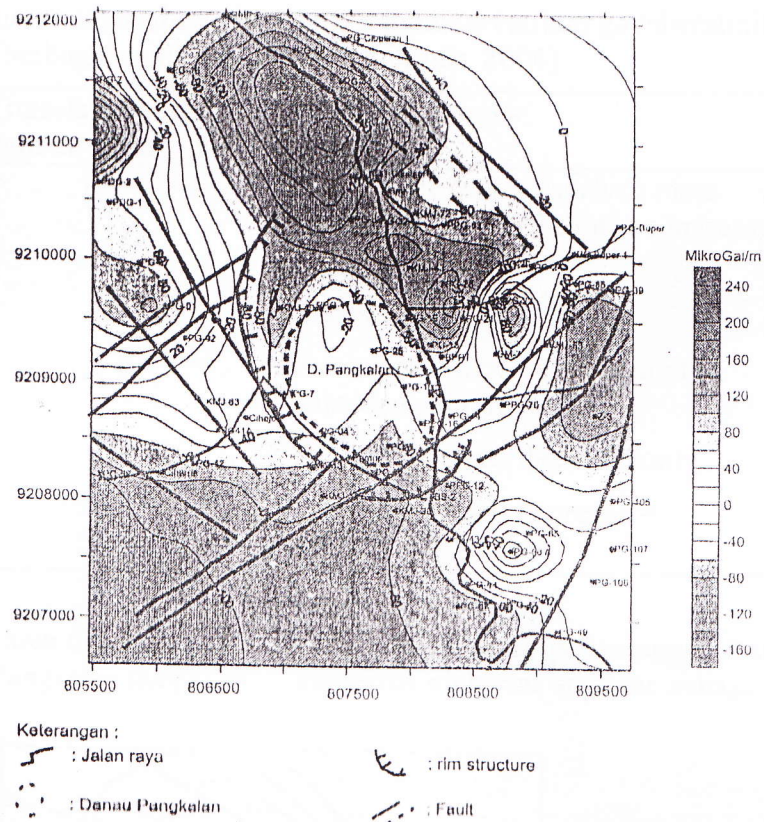
1984 terletak di bagian tengah lapangan hingga mencapai 40 cm.

Selanjutnya untuk memantau per-ubahan yang terjadi di lapangan dilakukan pengukuran gayaberatmikro untuk periode pendek oleh penulis. Pengukuran gaya-beratmikro dilakukan pada Juni 2006 dan di ulang pada November 2006. Kemudian anomali gayaberatmikro antar-waktu periode ini di petakan (Gambar 6) dan dianalisa berdasarkan anomali gayaberatmikro dan anomali gradien-vertikal gayaberatmikronya (Gambar 7). Anomali gradien-vertikal gayaberatmikro ini dihasilkan dari pengukuran gayaberatmikro pada ketinggian berbeda dengan bantuan statif penambah ketinggian. Gradien-vertikal diukur dan dihitung untuk ketinggian 0 cm dan 80 cm dari permukaan tanah, dan harga gradiennya adalah selisih harga gayaberatmikro pada ketinggian berbeda ini dibagi dengan jaraknya. Anomali gradien-vertikal antar-waktunya didapatkan dari selisih pengukuran untuk periode tersebut.

Anomali gayaberatmikro ini menunjukkan perubahan nilai gayaberatmikro yang terjadi selama periode pengukuran, yaitu antara bulan Juni hingga November 2006. Nilainya berkisar



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



Gambar 7. Peta Gradien-Vertikal Gayaberatmikro 4D Periode Juni- November 2006

antara -240 sampai 160 mikroGal.

Sedangkan anomali gradien-vertikal gayaberatmikro berkisar antara -200 sampai dengan 240 mikroGal. Nilai anomali ini masih merupakan gabungan beberapa sumber anomali permukaan (akibat *subsidence*) dan bawah permukaan (dinamika fluida bawah permukaan).

Anomali gayaberatmikro 4D ini secara umum bersesuaian Sesar BL-TG (arah $N140^{\circ}E$), baik di bagian utara maupun selatan danau Pangkalan. Anomali juga dibatasi oleh rim struktur yang berarah hampir sama di bagian selatan danau Pangkalan. Selain itu di bagian timur lapangan dibatasi oleh sesar-sesar berarah tegaklurus dengan sesar diatas, yaitu sesar BD-TL (arah $N60^{\circ}E$).

Karena beberapa sumber menunjukkan anomali yang serupa, maka untuk pendugaan

sumber penyebab anomali, analisa dengan menggunakan kedua anomali diatas adalah sangat bermanfaat. Hubungan antara anomali gayaberatmikro 4D dan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dalam hubungannya dengan sumber anomali telah dilakukan melalui simulasi data sintetik dan ditabelkan seperti di bawah ini.

Berdasarkan beberapa kemungkinan kombinasi ini dapat diduga area-area *subsidence*, pengurangan massa dan penambahan massa bawah permukaan. Hasil analisisnya ditunjukkan pada Gambar 8.

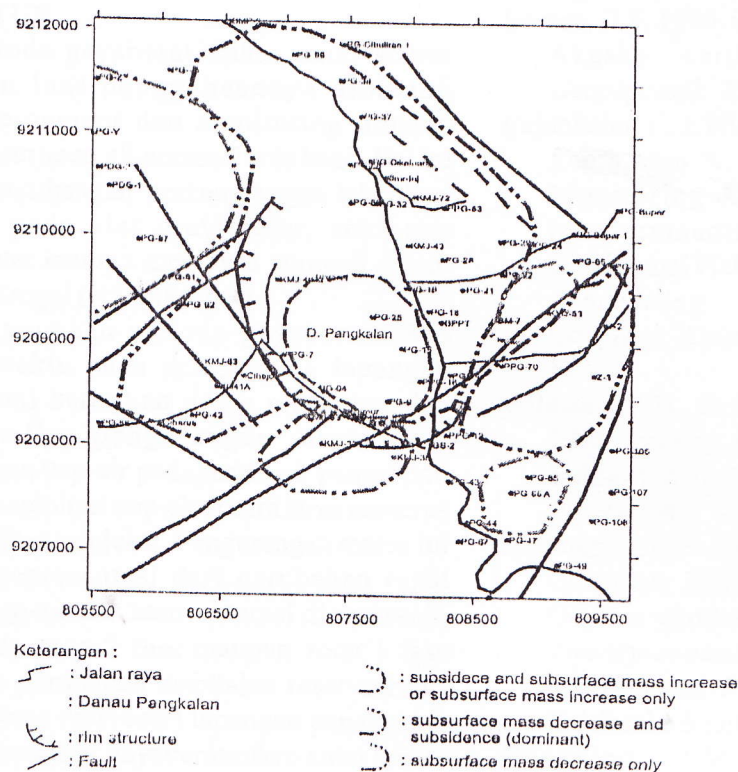
Area yang ditandai dengan warna merah menunjukkan area dengan pengurangan massa akibat produksi sumur-sumur di area ini. Area ini berhubungan dengan Kluster Kamojang bagian tengah sebagai pusat produksi disekitar Danau Pangkalan dan sumur-sumur produksi

Tabel 1. Hubungan anomali gayaberat 4D dengan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D dengan berbagai sumber anomalnya (Kadir, 2004)

Time-lapse value (Gal)	Time-lapse vertical gradient value (Gal)	Anomaly sources
(+)	(+)	Subsidence and subsurface mass increase or subsurface mass increase only
(+)	(0)	Subsidence only
(+)	(-)	Subsurface mass decrease and subsidence(dominant)
(-)	(-)	Subsurface mass decrease only
(0)	(-)	Subsurface mass decrease = Subsidence

bagian utara sampai ke area Cibuliran, dan dibagian selatan Danau Pangkalan sampai ke

area Ciharus. Area pengurangan massa ini dikontrol oleh rim struktur sebagai batas



Gambar 8. Hasil analisa zonasi *subsidence*, pengurangan dan penambahan massa dari anomali gayaberatmikro 4D dan gradien-vertikal gayaberatmikro 4D 2006

dengan area lainnya, dan bersesuaian dengan sesar BL-TG (arah N140°E). Area dengan warna merah ini juga tampak di bagian timur lapangan, hal ini diduga berhubungan dengan area produksi bagian timur lapangan dan dikontrol oleh sesar U-S (arah N15°E).

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 dan *subsidence* yang lebih dominan di area ini. Sedangkan warna hijau berhubungan juga dengan *subsidence* dan penambahan massa atau hanya penambahan massa bawah permukaan. Area ini mencakup area tenggara dan barat-laut serta muncul di sekitar BM-7 secara lokal.

PENUTUP

Metode gayaberat mikro antar-waktu semakin luas penggunaannya dibidang geoenvironment dan monitoring dimana melibatkan anomali-anomali orde kecil. Hal ini adalah sumbangan perkembangan teknologi digital pada alat gravimeter, sehingga gravimeter mampu membaca anomali dalam orde mikrogal (< 5 mikrogal).

Penggunaan metoda gayaberatmikro antara-waktu pada pemantauan lapangan panasbumi bertujuan untuk mengukur dan menganalisa pengurangan massa atau kandungan uap-air pada reservoir panasbumi akibat eksploitasi uap-air secara terus menerus dan aktifitas reinjeksi. Pengurangan massa ini adalah representasi dari perubahan rapat massa uap-air dan atau saturasi di reservoir, baik pada zona 2 fase maupun zona 1 fase dan atau perubahan ketebalan reservoir air-dalam (*deep reservoir*) lapangan panasbumi. Anomali negatif gayaberatmikro antar waktu negatif (-) menunjukkan pengurangan massa dan anomali positif (+) menunjukkan penambahan massa atau *subsidence*. Analisa secara terpadu anomali gayaberatmikro antar-

waktu dan anomali gradien vertikal antar-waktu nya dapat menunjukkan zona-zona yang mengalami pengurangan massa, *subsidence*, penambahan massa dan kombinasi pengurangan massa dan *subsidence*.

Metode gayaberatmikro selain dapat menduga arah dan distribusi rapat-massa (massa) antar waktu juga dapat menghitung jumlah massa yang masuk dan keluar reservoir yang tidak dapat diduga oleh metoda monitoring lainnya seperti tracer isotop dan gempa mikro (MEQ).

DAFTAR RUJUKAN

- Akasaka, C. dan S. Nakanishi. 2000. Correction of Background Gravity Change Due to Precipitation: Oguni Geothermal Field. Japan. *Proceeding World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku. Japan. 2471-2475.
- Barnes, D.F. 1996. Gravity change during the Akaska earthquake. *Journal of Geophysical Research*. 81: 451-456.
- Fujimitsu, Y., J. Nishijima, N. Shimosako, S. Ehara, dan K. Ikeda. 2000. Reservoir Monitoring by Repeat Gravity Measurements at The Takigami Geothermal Field, Central Kyushu, Japan. *Proceeding World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku. Japan. 573 – 577.
- Galderen, V.M., R. Haagmans, dan M. Bikler. 1999. Gravity Change and Natural Gas Extraction in Groningen. *Geophysical Prospecting*. 47: 979-993.
- Gettings, P., R.N. Harris, R.G. Allis, and D.S. Chapman. 2002. Gravity signal at The Geysers geothermal field. *Proceedings Twenty-seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.
- Goodkind, J.M. 1986. Continuous Measurement of Non-tidal Variation of Gravity. *Journal Geophysics Research*. 91: 9125-9134.
- Hare, J.L., J.F. Ferguson, C.L.F. Aiken, dan

- Braddy, 1999. The 4D Microgravity Method for Waterflood Surveillance: A model Study for Prodhoe Bay Reservoir. Alaska: *Geophysics*. 64: 76-87.
- Hunt, T.M. 2001. Five Lectures on Environmental Effects of Geothermal. Lecturer 5: Microgravity Monitoring. *Geothermal Training Programme*. The United Nations University. 73-103
- Hunt, T.M. 2005. Using Repeat Microgravity Measurements to Track Reinjection in Liquid-dominated Fields. *Proceedings Word Geothermal Congress*. Antalya, Turkey.
- Kadir, W.G.A., D. Santoso, dan M. Sarkowi. 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. *Proceedings of The 7th SEGJ International Symposium, Sendai-Japan, 24-26 November 2004*. p: 421-426.
- Kamah, Y., D. Tavip, dan A.A. Zuhro. 2003. Penanggulangan Problem Geologi dalam Operasi Pemboran Sumur di Blok Timur Area Geotermal Kamojang Jawa Barat, Indonesia. *Proceeding of The 6th Indonesian Geothermal Association-Annual Meeting & Conference*, Bandung. Editor: Sutopo, Ashat, M.A., Saptadji, N.M., dan Ariaji, T.
- Lambert, A. dan C. Beaumond. 1977. Nanovariation in Gravity Due to Seasonal Ground Water Movement: Implication for Gravitational Detection of Tectonic Movement. *Journal of Geophysics Research*. 82: 297-306.
- Rymer, H. and G.W. Jones. 2000. Volcanic Eruption Predicture: Magma Chamber Physics from Gravity and Deformation Measurement. *Geophysical Research Letter*. 27(6).
- Santoso, D., M. Sarkowi, and W.G.A. Kadir. 2006. Determination of Negative Groundwater Withdrawal in Semarang City Area Using Time-Lapse Microgravity Analysis. *Proceedings of The 8th SEGJ International Symposium, Sendai-Japan*.
- Sudarman, S., Mulyadi, B. Budiarjo, T. Silitonga, dan M. Masdjuk. 2003. Penerapan Metoda Geofisika di Kamojang: "A lesson Learn". *Proceeding of The 6th Indonesian Geothermal Association-Annual Meeting & Conference*. Bandung.
- Sugihara, M. 2001. Reservoir monitoring by repeat gravity measurement at The Sumikawa geothermal field, Japan. *Proceedings Twenty-sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.
- Takemura, T., N. Shiga, S. Yokomoto, K. Saeki, dan H. Yamanobe. 2000. Gravity Monitoring in Yanaizu-Nishiyama Geothermal Field, Japan. *Proceeding World Geothermal Congress*. Kyushu-Tohoku, Japan. 2937-2941.
- Tamburaka, R.E. 2003. Prospek Energi Panasbumi Indonesia Setelah Lahirnya U.U. Panasbumi. *Proceeding of The 6th Indonesian Geothermal Association-Annual Meeting & Conference*. Bandung.