

Dapatkah Metoda Gayaberat-Mikro 4D Digunakan untuk Memantau Kemajuan Produksi Air (*Dewatering*) di Reservoir *Coalbed Methane*?

Can the 4D Micro-Gravity method be Used to Monitor Dewatering Progress in a Coalbed Methane Reservoir?

Imam B. Sosrowidjojo

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan

Telepon: 62-21-7394422, Fax: 62-21-7246150

E-mail: imam@sosrowidjojo.com; ibs@lemigas.esdm.go.id

Teregistrasi I tanggal 15 Agustus 2013; Diterima setelah perbaikan tanggal 21 Oktober 2013

Disetujui terbit tanggal: 30 Desember 2013

ABSTRAK

Pemantauan pengurasan/ produksi air (*dewatering*) di suatu lapisan reservoir batubara menggunakan metoda gayaberat-mikro 4D adalah usaha pertama dilakukan di dunia. Percobaan awal yang dilakukan di Lapangan Rambutan, Sumatera Basin Selatan, Indonesia diharapkan akan dapat membantu industri dalam menentukan strategi *dewatering* untuk mengoptimalkan produksi GMB yang akan datang. Secara teori nilai gradien vertikal akan konstan jika hanya terjadi perubahan massa di bawah permukaan, atau nilai gradien vertikal antar waktunya sama dengan 0. Terjadinya perubahan densitas bawah permukaan diindikasikan oleh nilai anomali yang proporsional dengan kondisi bawah permukaannya. Akuisisi data gayaberat-mikro dilakukan dua kali menggunakan Scintrex gravimeter: pada bulan November 2008 dan kemudian disebut sebagai kondisi awal sebelum pengurasan dimulai dan pada bulan September 2009 (proses *dewatering* sedang berlangsung). Hasil simulasi menunjukkan bahwa area *dewatering* seperti ditunjukkan oleh anomali negatif dapat dengan jelas digambarkan pada peta anomali gayaberat-mikro 4D. Hasil akhir dari percobaan ini menunjukkan bahwa metoda gayaberat-mikro 4D dapat digunakan untuk memonitor dan menunjukkan efektivitas proses *dewatering* di suatu lapangan GMB.

Kata Kunci: CBM, GMB, Gayaberat-mikro 4D, *dewatering*, Lapangan Rambutan

ABSTRACT

Monitoring dewatering in a coalbed reservoir using 4D microgravity method is the first attempt made in the world ever. Initial experiments that were conducted in the Rambutan Field, South Sumatra Basin, Indonesia is expected to be able to assist industry in determining dewatering strategies for optimizing the production of CBM in future. In theory the vertical gradient microgravity value at the surface will be constant if there is no subsurface mass change, and hence, response of its time-lapse vertical gradient microgravity for subsidence will be zero. The change of subsurface density is indicated by anomaly values that direct proportional to its subsurface condition. Microgravity data acquisition was done twice using a Scintrex gravimeter: in November 2008 and subsequently referred to as the initial conditions before dewatering began and in September 2009 (dewatering process is underway). Simulation results show that the dewatering area as indicated by a negative anomaly can be clearly depicted on the 4D microgravity

anomaly map. The final results of this experiment that are expected 4D-microgravity method can be used to monitor and demonstrate the effectiveness of the dewatering processes in a CBM field.

Keywords: CBM, 4D-microgravity, dewatering, Rambutan Field

I. PENDAHULUAN

Metoda gayaberat-mikro 4D merupakan pengembangan dari metoda gravitasi 3D dengan dimensi keempatnya adalah waktu. Metoda gayaberat-mikro 4D telah diterapkan pada berbagai bidang seperti: *monitoring* reservoir panas bumi (Allis dan Hunt, 1986; Andres dan Pedersen, 1993; Akasaka dan Nakanishi, 2000; Schultz *et al.*, 2012), pemantauan injeksi air pada reservoir gas (Hare *et al.*, 1999; Gelderen *et al.*, 1999), pemantauan amblesan tanah (Styles *et al.*, 2003; Sarkowi *et al.*, 2005), pemantauan magma dan prediksi letusan (Rymer *et al.*, 2000; Kadir, 2004), pemantauan injeksi air pada reservoir hidrokarbon (Bradley *et al.*, 1999; Alshakhs *et al.*, 2009; Krahenbuhl *et al.*, 2010), namun belum pernah dilakukan di manapun untuk pemantauan produksi air (*dewatering*) pada proses ekstraksi gas metana dari reservoir batubara. Pada penelitian awal ini dicoba kemungkinan metoda gayaberat-mikro 4D untuk pemantauan proses *dewatering* dan produksi GMB di Lapangan Rambutan. Kegiatan ini baru pertama kali dicoba untuk keperluan reservoir GMB, di Lapangan Rambutan, Muara Enim, Cekungan Sumatra Selatan (Sosrowidjojo dan Sarkowi, 2011).

Perubahan nilai gayaberat-mikro 4D di suatu titik dapat disebabkan oleh perubahan fluida bawah permukaan dan perubahan tinggi titik amat. Proses pengurasan air dan proses produksi *Coalbed Methane* menyebabkan terjadinya pengurangan fluida (penurunan kerapatan air/tekanan hidrostatik) pada lapisan reservoir batubara yang akan mengakibatkan terjadinya penurunan respon gayaberat yang terukur di permukaan dan perubahan nilai anomali gayaberat-mikro 4D.

Coalbed Methane adalah gas metana batubara (GMB) yang dihasilkan selama proses pembatubaraan dan terperangkap/teradsorpsi pada matrik batubara yang didefinisikan sebagai reservoirnya. GMB dapat pula dihasilkan oleh bakteri methanogen yang memakan lapisan batubara (Faiz *et al.*, 2003). GMB keluar dari matriks reservoir batubara hanya terjadi pada tekanan desorbsinya, kemudian melalui bidang rekahan keluar ke lobang bor. Sedangkan gas metana di batubara umumnya berada dalam tekanan

air (hidrostatik), atau reservoirnya dalam kondisi dibawah tekanan desorbsinya (*under-saturated*). Produksi GMB hanya akan terjadi bila tekanan hidrostatiknya diturunkan sampai tercapai pada tekanan desorbsinya dengan cara memompakan/memproduksi air formasi ke permukaan (*dewatering*). GMB kemudian akan mengalir melalui rekahan batubara (*cleat*) dan akhirnya keluar menuju lobang sumur. Proses *dewatering* harus dipantau untuk memahami penurunan tekanan hidrostatik dalam suatu reservoir GMB dengan berkurangnya air formasi. Perubahan kerapatan fluida dalam reservoir GMB akibat proses *dewatering* dapat dipetakan dan lokasi/ area yang sesuai dengan tekanan desorpsi reservoir GMB tersebut otomatis dapat memproduksi gas GMB.

Percobaan ini bertujuan untuk memantau dinamika fluida dalam reservoir Lapangan Rambutan, Cekungan Sumatra Selatan akibat pengurasan/produksi air (*dewatering*) di suatu lapisan reservoir batubara berdasarkan metoda gayaberat-mikro. Keberhasilan metoda ini untuk memonitor pergerakan fluida di dalam lapisan reservoir batubara, diharapkan akan dapat membantu industri dalam menentukan strategi *dewatering* untuk mengoptimalkan produksi GMB ke depan.

II. PRINSIP DASAR METODA GAYABERAT

Material di bawah permukaan yang berbeda memiliki kerapatan massa yang berbeda pula. Nilai gayaberat dipengaruhi oleh distribusi massa dan jarak tertentu dari titik ukur di permukaan. Dinamika bawah permukaan dapat terjadi secara alami ataupun diakibatkan oleh aktivitas manusia. Survei gayaberat-mikro berusaha untuk mendeteksi daerah dengan kepadatan kontras atau anomali dengan mengumpulkan pengukuran permukaan medan gravitasi bumi.

Dasar teori yang digunakan untuk mengukur gayaberat adalah hukum Newton, yang dikenal sebagai Hukum Universal Gravitasi Newton, menyatakan bahwa gaya tarik menarik antara dua titik massa benda 1 (m_1) dan massa massa benda 2 (m_2) yang terpisah pada jarak tertentu (r) akan

memiliki gaya tarik menarik (F). Terlihat bahwa besarnya gayaberat (g) berbanding lurus dengan massa (m), yaitu perkalian antara densitas (ρ) dengan volume benda, sehingga besarnya gayaberat terukur merupakan pencerminan dari densitas dan volume massa tersebut dengan (γ) adalah konstanta gayaberat yang besarnya $6,6732 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$.

Anomali gayaberat yang terukur di permukaan merupakan penjumlahan dari semua kemungkinan sumber anomali yang berada di bawah permukaan dimana salah satunya merupakan anomali residual. Target ini perlu dipisahkan dari anomali regional dan *noise*. Anomali regional memiliki lebar anomali yang lebih besar dibandingkan anomali residualnya. Sedangkan *noise*, lebar anomalnya lebih kecil dibandingkan dengan anomali residual.

III. METODA PENELITIAN

Metoda gayaberat-mikro 4D merupakan pengembangan dari metoda gravitasi dengan dimensi keempatnya adalah waktu (Nind *et al.*, 2008). Metoda gayaberat-mikro 4D ini telah diterapkan pada berbagai bidang seperti: *monitoring* reservoir panas bumi, pemantauan injeksi air pada reservoir gas, pemantauan amblesan tanah, pemantauan magma dan prediksi letusan, dan pemantauan injeksi air pada reservoir hidrokarbon (diantaranya: Gelderen *et al.*, 1999; Sarkowi *et al.*, 2005; Alshakhs *et al.*, 2009; Schultz *et al.*, 2012).

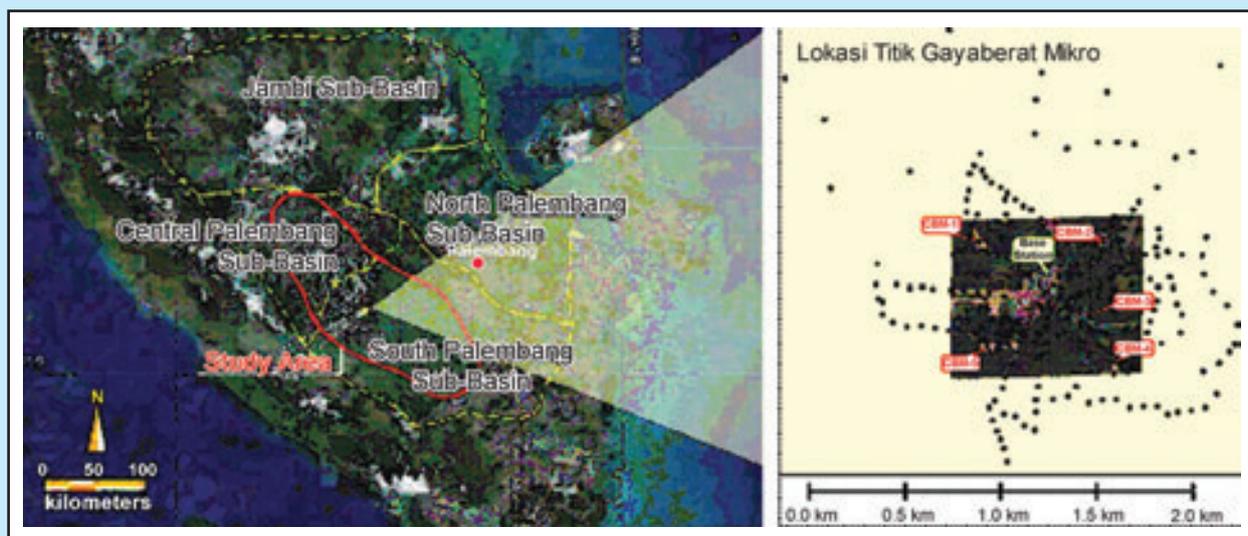
Metoda gayaberat antar waktu yang menjadi sumber anomali adalah kondisi di permukaan berupa terjadi deformasi vertikal dan perubahan kondisi bawah permukaan. Dengan asumsi bahwa selama selang waktu dua pengukuran tidak terjadi amblesan sehingga geometri (dan juga volume) tetap, maka anomali gayaberat-mikro antar waktu hanya diakibatkan oleh perubahan kontras rapat massa $\Delta\rho(\alpha,\beta,\gamma)$ pada selang waktu Δt akibat pergantian fluida dalam reservoir.

Penelitian yang dilakukan meliputi beberapa tahapan, yaitu: studi geologi Lapangan Rambutan, pengukuran gayaberat-mikro di Lapangan Rambutan sebanyak dua kali, pengolahan data gayaberat-mikro hingga diperoleh anomali gayaberat-mikro 4D, pemodelan dan interpretasi anomali gayaberat-mikro 4D, dan analisa dinamika fluida yang terjadi dilapangan *pilot project* GMB Rambutan (Sosrowidjojo dan Sarkowi, 2011).

IV. HASIL-HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Gayaberat-mikro 4D Lapangan GMB Rambutan

Penelitian gayaberat-mikro 4D telah dilakukan di Lapangan GMB Rambutan, Sumatra Selatan (Gambar 1). Pengukuran data gayaberat-mikro dengan menggunakan Gravimeter di Lapangan Rambutan telah dilakukan sebanyak dua kali masing-masing pada tahun 2008 dan 2009. Sebanyak 260



Gambar 1
Peta *google* mengilustrasikan lokasi ke lima sumur GMB di Lapangan GMB Rambutan dan 260 titik amat gayaberat-mikro

titik gayaberat-mikro telah diukur dengan titik *base station* terletak di koordinat 3°24'25" LS dan 103°41'59" BT.

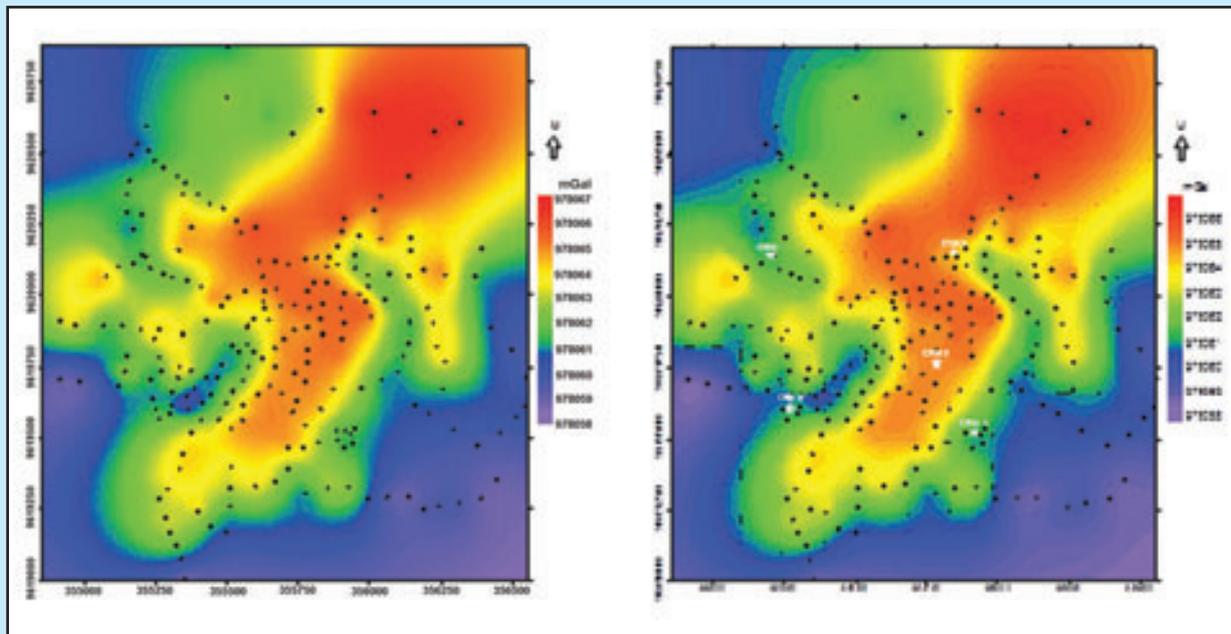
Gambar 2 menunjukkan data hasil pengukuran gayaberat-mikro di Lapangan GMB Rambutan. Data gayaberat-mikro pengukuran dikoreksi *tide* dan *drift* hingga diperoleh peta gayaberat observasinya. Gambar 2A menunjukkan data yang diukur pada bulan Nopember 2008 dan dianggap sebagai kondisi awal pergerakan fluida bawah permukaan. Pengukuran kedua dilakukan pada bulan September 2009 sebagai data kondisi setelah adanya perubahan waktu (Gambar 2B).

Untuk mengetahui seberapa besar respon anomali gayaberat-mikro 4D di lapangan GMB Rambutan akibat proses *dewatering* dan produksi GMB telah dilakukan simulasi dengan menggunakan data dari lapangan. Hasil simulasi data sintetik mendapatkan respon anomali gayaberat-mikro 4D akibat proses *dewatering* dan produksi GMB akan dapat diukur oleh gravimeter yang ada setelah jumlah *dewatering* mencapai 100 ton, dimana respon anomali gayaberat-mikro 4D mencapai -6 μ Gal.

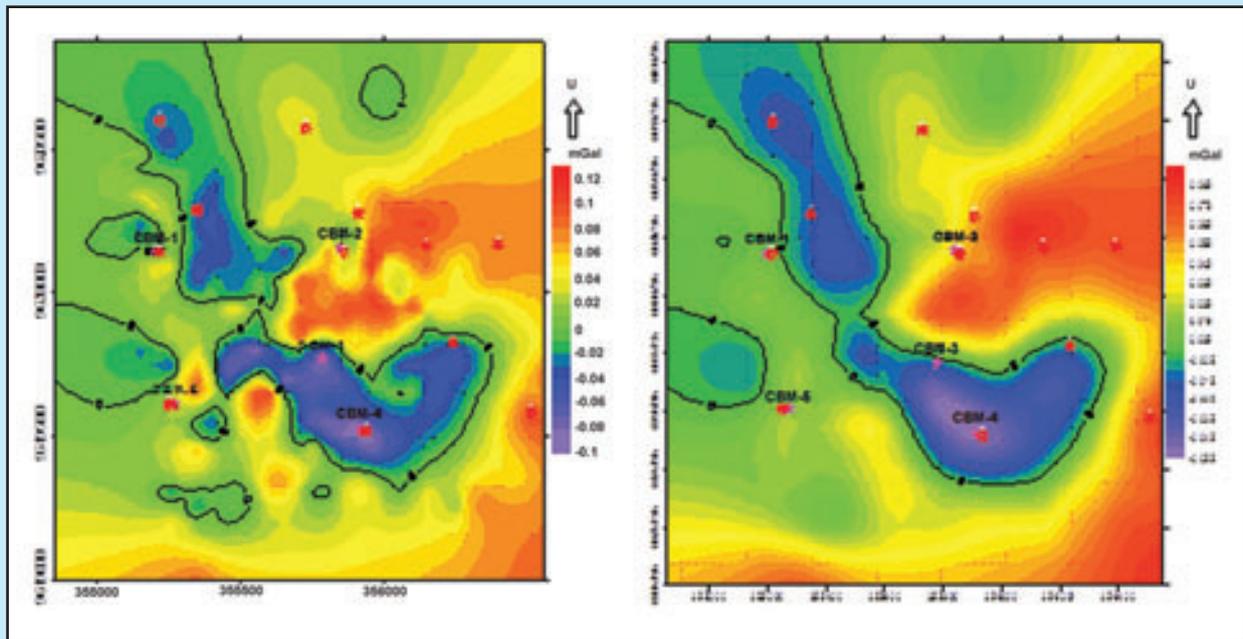
Anomali gayaberat-mikro 4D merupakan selisih nilai gayaberat observasi periode 1 dengan periode

2. Anomali ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya: perubahan dinamika fluida di bawah permukaan dan perubahan ketinggian titik pengukuran. Pada percobaan ini anomali gayaberat-mikro 4D kemungkinan besar hanya disebabkan oleh perubahan dinamika fluida bawah permukaan akibat proses *dewatering* (pengurangan air dan produksi GMB). Peta anomali gayaberat-mikro 4D lapangan GMB Rambutan hasil pengurangan gayaberat observasi periode Nopember 2008 dengan September 2009 ditunjukkan pada Gambar 3A. Sedangkan peta hasil pemfilteran gayaberat-mikro 4D pada periode yang sama ditampilkan pada Gambar 3B.

Dari analisa peta anomali gayaberat-mikro 4D yang dikorelasikan dengan aktivitas produksi sumur GMB yang ada di Lapangan Rambutan menunjukkan bahwa aktifitas *dewatering* sangat intens terjadi di sekitar sumur CBM-3 dan CBM-4 saja. Gambar 3 memperlihatkan adanya data anomali negatif di sekitar sumur CBM-3 dan CBM-4 tersebut. Anomali negatif ini kemungkinan besar disebabkan oleh adanya pengurangan fluida (air dan gas) akibat aktifitas *dewatering* (produksi air) dari kedua sumur produksi tersebut. Data produksi sumur GMB mendukung kecenderungan tersebut, dimana proses *dewatering* berlangsung lebih baik dilakukan pada



Gambar 2
(A) Peta gayaberat observasi Lapangan GMB Rambutan Nopember 2008 (B) Peta gayaberat observasi Lapangan GMB Rambutan September 2009. Titik hitam menggambarkan 260 lokasi titik amat

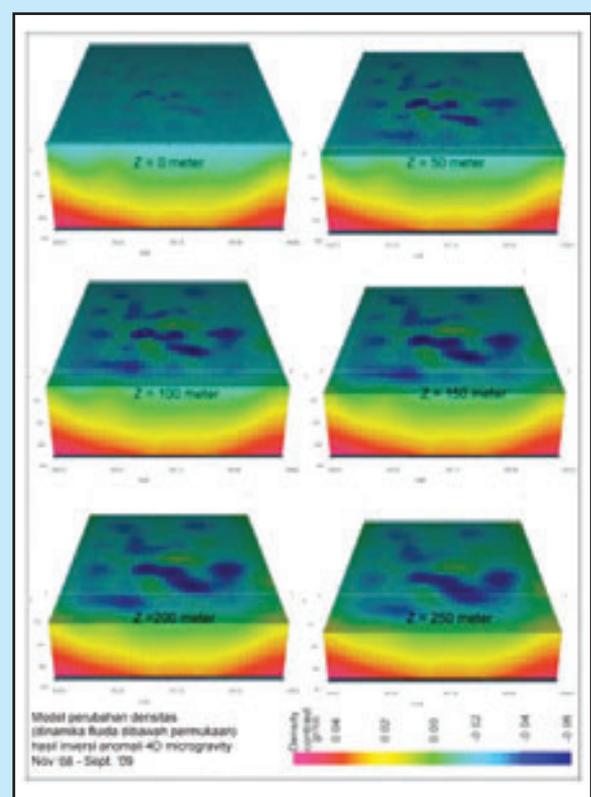


Gambar 3
(A) Anomali gayaberat-mikro 4D periode Nov'08 - Sept'09
(B) Peta hasil *filetrng* gayaberat-mikro 4D periode Nov'08 - Sept'09

sumur CBM-4 dan sumur CBM-3 bila dibandingkan dengan sumur GMB yang lainnya.

Di lain pihak, data anomali gayaberat-mikro 4D terekam positif di sekitar sumur CBM-2, mengindikasikan tidak adanya pengurangan fluida di daerah tersebut. Sejarah dari sumur CBM-2 ini memastikan bahwa sejak awal sumur CBM-2 merupakan sumur problem. Telah terjadi kick ketika pemboran baru masuk pada Seam 3 reservoir Muaraenim *coal*. Lobang sumur terindikasi ada “fish” kemungkinan dari pemasangan *casing* yang tidak presisi sehingga di dalam sumur tidak dapat dilakukan perforasi pada lapisan target. Akhirnya sumur CBM-2 tidak diaktifkan untuk proses *dewatering*.

Sumur CBM-5 menempati area positif yang mengindasikan terjadinya penambahan fluida, sedangkan disebelah Barat sumur memiliki anomali negatif. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat periode 1 dari sumur CBM-5 telah dilakukan proses *dewatering* dan pada saat periode 2 pengukuran sumur CBM-5 dalam posisi *off* / tidak beroperasi. Pada saat terjadi *dewatering* melalui sumur CBM-5 air dari reservoir akan berkurang dan pada saat proses *dewatering* berhenti terjadi aliran fluida dari luar ke arah sumur yang mempunyai tekanan rendah.



Gambar 4
Irisan beberapa kedalaman model perubahan densitas bawah permukaan Periode Nov'08 - Sept'09 hasil inversi gayaberat-mikro 4D

Lebih lanjut, data anomali Sumur CBM-1 menunjukkan pola anomali gayaberasat-mikro 4D relatif 0, bila dibandingkan dengan daerah sebelah Barat dan Timur dengan anomali negatif. Hal ini mengindikasikan terjadinya pengurangan fluida di kedua daerah tersebut. Besarnya data anomali di sebelah Timur sumur CBM-1 mengindikasikan bahwa telah terjadi pemompaan air secara terus menerus dalam laju yang lebih besar terjadi memanjang *relative* dari Utara dengan arah Tenggara-Barat Laut. Penjelasan adanya anomali negatif yang memanjang tersebut diakibatkan oleh adanya produksi dari beberapa sumur gas konvensional, terutama di sumur Rambutan *Deep* yang sampai hari ini masih berproduksi. Fenomena ini sekaligus menjelaskan bahwa data anomali gayaberasat-mikro 4D secara sensitif hanya dapat merekam semua perubahan/pergerakan fluida cair dan gas di bawah permukaan, namun tidak dapat secara selektif membedakan fluida mana yang berpengaruh.

b. Pemodelan dan Interpretasi anomali gayaberasat-mikro 4D

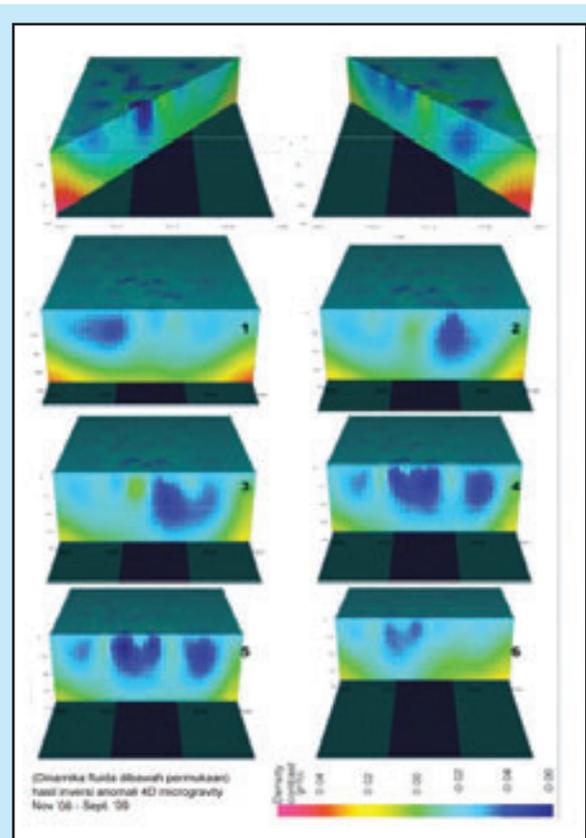
Untuk mengetahui dinamika fluida yang terjadi dibawah permukaan (reservoir) berdasarkan anomali gayaberasat-mikro 4D, maka dilakukan pemodelan untuk mendapatkan pola distribusi perubahan densitas yang terjadi. Pada percobaan ini pemodelan dilakukan dengan pendekatan perhitungan respon gayaberasat menggunakan benda prisma sisi tegak, kesesuaian model benda di lapangan bergantung pada jumlah dan dimensi prisma yang disusun. Plouf (1976), menghitung respon gayaberasat yang disebabkan oleh model benda berbentuk prisma. Hasil pemodelan inversi anomali gayaberasat-mikro 4D ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan irisan model 3D yang menggambarkan perubahan densitas pada beberapa lokasi diilustrasikan pada Gambar 5.

Hasil pemodelan inversi 3D anomali gayaberasat-mikro 4D menunjukkan beberapa hal yang menarik, antara lain, pola atau daerah pengurangan fluida (air) pada reservoir GMB dapat tergambar dengan jelas. Seperti terlihat pada Gambar 4, perubahan densitas di bawah permukaan hanya terjadi secara berarti pada sumur yang terproduksi saja baik dari sumur CBM-1, CBM-3, CBM-4 maupun sumur konvensional dari Rambutan deep di sebelah utara sumur CBM-1.

Lebih rinci lagi, perubahan densitas positif cenderung terjadi pada kedalaman > 500 m (lihat Gambar 5) kecuali di daerah bagian Timur sumur CBM-2. Sedangkan densitas negatif yang menunjukkan pengurangan fluida terjadi pada kedalaman kurang dari 500 m. Sedangkan perubahan densitas negatif yang terjadi di kedalaman >500 m kemungkinan disebabkan oleh aktivitas produksi gas dari sumur konvensional (Rambutan *Deep*) di barat laut lokasi pilot GMB tersebut. Fenomena ini mengindikasikan bahwa penurunan tekanan hidrostatik sumur hanya signifikan terjadi pada zona atas dimana reservoir (seam 2 dan 3) yang terproduksi. Sedangkan zona dalam pada reservoir (seam 5 atau dahulu disebut seam P) tidak terlihat adanya penurunan tekanan hidrostatik yang berarti karena fluida dari bagian bawah terindikasi naik keatas.

V. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan awal dapat disimpulkan beberapa hal berikut ini:



Gambar 5
Irisan model 3D perubahan densitas bawah permukaan Nov'08 - Sept'09 hasil inversi gayaberasat-mikro 4D

- Anomali gayaberat-mikro 4D yang terdeteksi dilapangan GMB menunjukkan bahwa respon anomali gayaberat-mikro 4D akibat proses *dewatering* dan produksi GMB di Lapangan Rambutan berkorelasi positif dengan aktifitas pemompaan di permukaan.
- Densitas negatif yang menunjukkan pengurangan fluida terjadi pada kedalaman < 500 m. Sedangkan perubahan densitas negatif yang terjadi di kedalaman > 500 m kemungkinan disebabkan oleh aktivitas produksi gas dari sumur konvensional (Rambutan *Deep*) di barat laut lokasi pilot GMB tersebut. Peta progres *dewatering* dapat tergambar dengan jelas dari peta anomali gayaberat-mikro 4D yang mempunyai nilai anomali negatif, sehingga strategi *dewatering* di masa mendatang dapat diperbaiki.
- Metoda gayaberat-mikro 4D dapat menduga zona yang mengalami pengurangan massa akibat aktifitas *dewatering*. Analisis zonasi ini diperkuat dari hasil analisa perubahan rapat massa hasil pemodelan anomali gayaberat-mikro 4D.
- Dari percobaan ini menunjukkan bahwa metoda gayaberat-mikro 4D kemungkinan dapat digunakan untuk memantau proses *dewatering* dan produksi GMB, sehingga daerah-daerah yang mengalami pengurangan air dapat diketahui dengan lebih baik.

VI. REKOMENDASI

Anomali gayaberat yang terukur di lapangan merupakan gabungan (superposisi) dari berbagai sumber anomali tersebut diatas. Saat ini belum ada hasil penelitian 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.

Agar diperoleh hasil dengan tingkat kepercayaan yang tinggi, ke depan perlu dilakukan pengukuran gayaberat-mikro sekurang-kurangnya dua kali dalam rentang waktu sekurang-kurangnya tiga bulan untuk menentukan kondisi awal. (apabila hasil kedua pengukuran gayaberat-mikro menunjukkan nilai yang berbeda, maka metoda ini tidak dapat diaplikasikan di

lokasi tersebut). Jadi penentuan kondisi awal dengan pasti mutlak dilakukan agar tidak ada keraguan bahwa terjadinya dinamika fluida bawah permukaan hanya disebabkan karena aktifitas *dewatering* di kawasan itu.

Sedangkan pada tahap pemantauan, pengukuran gayaberat-mikro dilakukan sesuai dengan kebutuhan dengan rentang waktu pengukuran setiap empat sampai enam bulan sekali. Untuk mengetahui efektifitas proses *dewatering*, minimum dilakukan pengukuran dua kali pada tahap pemantauan. Dengan pendekatan ini, maka diharapkan pergerakan fluida dan efektifitas *dewatering* dapat diketahui dengan lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen LEMIGAS atas izin untuk mempublikasikan tulisan ini. Dr Sarkowi dari Unila, terima kasih atas kerjasamanya dalam melakukan akusisi gayaberat-mikro 4D, dan juga penghargaan yang tinggi kepada korektor yang tidak disebut namanya atas komentarnya untuk membantu meningkatkan kualitas makalah ini.

KEPUSTAKAAN

1. Akasaka, C., Nakanishi, S., 2000, *Correction of Background gravity change due to precipitation; oguni geothermal Field, Japan*. Proceeding World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, p. 2471-2475.
2. Allis, R.G., Hunt, T.M, 1986, *Analysis of Exploration-induced gravity changes at Wairakei geothermal Field*, Geophysics vol. 51, p. 1647-1660.
3. Alshakhs, M.J., Riis, E., Westerman, R., Lyngra, S., Al-Otaibi, U.F., 2009, *Utilizing 4D Microgravity to Monitor Water Encroachment*, Saudi Aramco Journal of Technology, 8p., <http://www.saudiaramco.com/content/dam/Publications/Journal%20of%20Technology/Summer2009/Microgravity.pdf>
4. Andres, R.B.S., Pedersen, J.R., 1983, *Monitoring the Bulalo geothermal reservoir, Philipines, using precession gravity data*, Geothermics, vol. 22, p. 395-402.
5. Faiz, M., Stalker, L., Sherwood, N., Saghafi, A., Wold, M., Barclay, S., Choudhury, J., Barker, W., Wang, I., 2003. *Bio-enhancement of coal bed methane resources in the southern Sydney Basin*. APEA Journal, 43, 595-610.

6. **Gelderen, M.V., Haagmans, R., Bilker, M.,** 1999, *Gravity change and natural gas extraction in Groningen*, Geophysical Prospecting, vol. 47, p. 979 - 993, DOI: 10.1046/j.1365-2478.1999.00159.x.
7. **Hare, J.L., Ferguson, J.F., Aiken, C.L.V., Brady, J.L.,** 1999, *The 4-D microgravity method for waterflood surveillance: A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska (Abstract)*. Geophysics, vol. 64, p. 78, DOI:10.1190/1.1444533
8. **Kadir, W.G.A.,** 2004, *Penerapan Metoda gayaberat-mikro-4D untuk Proses Monitoring*. Journal JTM, X, 3, p. 170-179.
9. **Krahenbuhl, R.A., Li, Y., Davis, D.,** 2010, *4D gravity monitoring of fluid movement at Delhi Field, LA: A feasibility study with seismic and well data*, 4p., http://geophysics.mines.edu/cgem/pdf%20files/Krahenbuhl_Li_Davis%202010.pdf
10. **Nind, C., Niebauer, T., Macqueen, J., van Westrum, D., Klopping, F., Aliod, D., Mann, E., Francis, O.,** 2008, *New Developments in Gravity Applications and Instruments*, 7th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad, 6p., <http://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/1846/1/NIND%20et%20la.pdf>
11. **Rymer, H., Van Wyk de Vries, B., William-Jones, J.S.G.** 1998, *Pit creater structure and processes governing persistent activity at Masaya volcano, Nicaragua*, Bulletin Vulcano, vol. 59, 345-355.
12. **Sarkowi, M., Kadir, W.G.A., Santoso, D.,** 2005, *Strategy of 4D Microgravity Survey for the Monitoring of Fluid Dynamics in Subsurface*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
13. **Schultz, A., Vincent, P., Rose, K., Hakala, A., Lopano, C., Schroeder, K., Urquhart, S., Hare, J., Beard, L.,** 2012, *4D monitoring techniques to improve reservoir longevity and productivity in Enhanced Geothermal Systems*, International Workshop of Deep Geothermal Systems, Wuhan, China, June 29-30, 2012, 7p., <http://cug60.cug.edu.cn/dgs2012/30%20Adam%20Schultz.pdf>
14. **Sosrowidjojo, I.B., dan Sarkowi, M.,** 2011, *Metoda 4D Microgravity pertama kali digunakan untuk pemantauan produksi air (dewatering): Studi kasus Lapangan CBM Rambutan*, Majalah Mineral & Energi vol. 9, p. 62-67.