

Analisis data gayaberat daerah Porong dalam studi kasus struktur dan deformasi geologi bawah permukaan

Analysis of the Gravity Data of Porong regions in the case study subsurface geology structure and deformation

Tatang Padmawidjaja

Badan Geologi, Jln. Diponegoro No. 57, Bandung 40122

ABSTRAK

Semburan Lumpur Sidoarjo telah mengakibatkan dampak lingkungan terhadap wilayah di luar kolam penampungan lumpur, yaitu di bagian baratnya berupa amblesan tanah, tembusan gas dan semburan air bercampur lumpur di Siring Barat dan Desa Besuki. Data gayaberat dan deformasi permukaan menunjukkan bahwa zona anomali gayaberat rendah dengan deformasi permukaan sebagai dinamika struktur geologi dangkal. Zona anomali gayaberat rendah menunjukkan penurunan rapat massa yang menggambarkan sebagai struktur geologi dangkal bawah permukaan dengan indikasi amblesan tanah, tembusan gas, dan semburan air bercampur lumpur. Struktur geologi dangkal dari kelurusan anomali gayaberat residual ditafsirkan sebagai sesar dan rekahan yang digunakan sebagai media dimana terjadi tembusan gas berarah selatan barat daya – utara timur laut. Tembusan gas maupun amblesan di daerah Siring Barat dan Tanggulangin merupakan deformasi bawah permukaan sebagai penurunan rapat massa dari pengukuran gayaberat secara priodik.

Kata kunci: gayaberat, struktur geologi, deformasi bawah permukaan

ABSTRACT

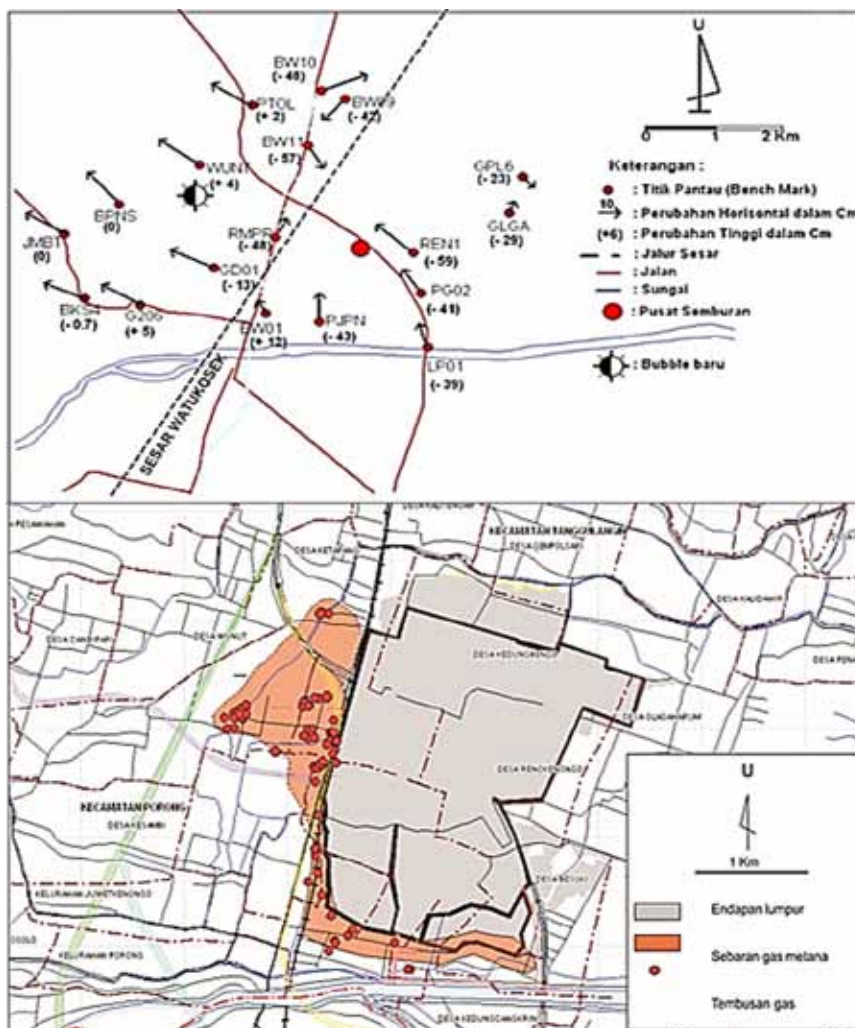
Sidoarjo mudflow has environmental impacts beyond the mud pool, is in the western part appears of the land subsidence, gas and water effluent, and mudflow in Siring western and eastern Besuki village appear mudflow. Analysis of gravity data dan surface deformation indicate that the zone of low gravity anomaly with a surface slope deformation as the dynamics of shallow geological structure. Zone of low gravity anomaly as a decrease in density that show the deformation of shallow subsurface geology with land subsidence, gas and water effluent, and mudflow in West Siring western and eastern parts of the Besuki village pond mud. Analysis of regional and detailed gravity data obtained lineament anomaly as regional geological structure in the western part of the pool of mud. Shallow geological structure indicated by the residual gravity anomaly lineament lineament is a fault and stocky as a medium in which the effluent gas occurred southwest of the southern direction - north northeast. Land subsidence and effluent gas and water, and mud flow in the area West Siring and subsurface deformation Tanggulangin is indicated by a decrease in density of periodic gravity measurements.

Keywords: gravity, structural geology, subsurface deformation

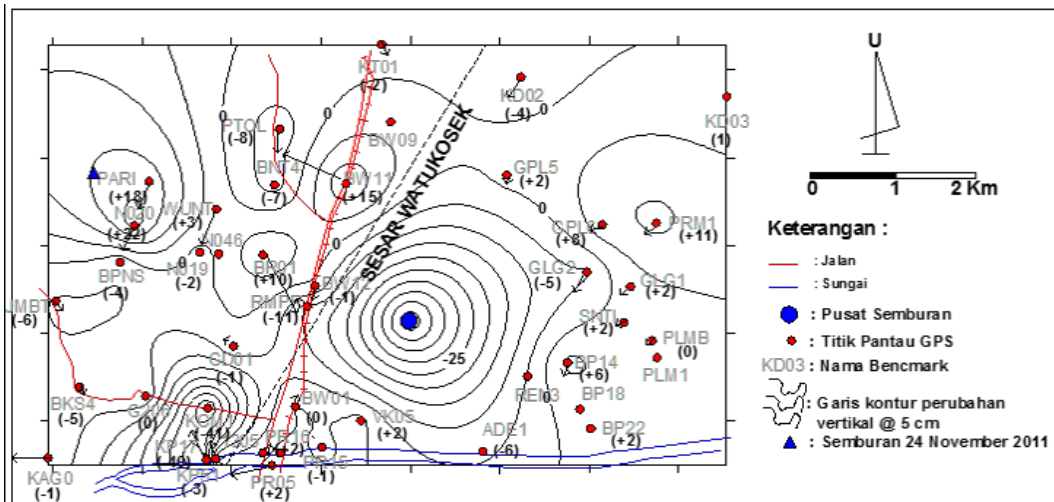
PENDAHULUAN

Endapan lumpur dari semburan lumpur Sidoarjo (LUSI) dan peninggian tanggul kolam lumpur mengakibatkan bertambahnya beban berat atau gaya tekan baik vertikal maupun horizontal. Gaya tekan tersebut terjadi di daerah dengan sedimen aluvium dan dapat mengakibatkan reaktivasi struktur geologi dangkal pada zona-zona lemah, membentuk amblesan maupun tembusan gas dan air (Sudarsono *et al.*, 2008

dan Cahyaningtyas *et al.*, 2012), seperti terjadi di daerah Siring Barat, Ketapang, Wunut, Pamotan dan Mindi (Gambar 1). Deformasi permukaan diindikasikan dengan terjadinya amblesan tanah, tembusan gas dan semburan air bercampur lumpur sebagai reaktivasi struktur geologi yang menerus ke permukaan membentuk struktur geologi dangkal seperti kekar dan sesar (Gambar 2).



Gambar 1. Peta deformasi permukaan, tembusan dan semburan air bercampur lumpur di bagian barat tanggul (Zaenudin *et al.*, 2010).



Gambar 2. Peta kontur penurunan permukaan di kolam lumpur (Zaennudin et al., 2010).

Pengukuran gayaberat secara periodik telah dilakukan sebanyak 3 kali yaitu pada bulan September 2009, Desember 2009, dan bulan Juli 2010. Dari pengukuran tersebut diperoleh adanya perubahan gayaberat. Perubahan gaya-berat ini menunjukkan perubahan rapat massa. Pola kontur perubahan anomali menunjukkan penurunan rapat massa negatif di daerah Siring Barat dan Tanggulangin yang ditunjukkan adanya amblesan tanah serta semburan air dan gas (Gambar 3). Sedangkan perubahan gayaberat positif menunjukkan sebagai lapisan batuan

sedimen yang tidak terganggu oleh desakan flu-ida (lumpur).

Pemodelan geologi dari penampang anomali gayaberat residual yang berarah barat laut – tenggara memperoleh anomali gayaberat meninggi di daerah kolam lumpur dan di bagian baratnya terjadi penurunan. Siring Barat terletak pada tepian sesar yang sangat memungkinkan adanya zona lemah. Melalui pengukuran selama 3 periode akan diperoleh kondisi struktur geologi bawah permukaan dan peruba-



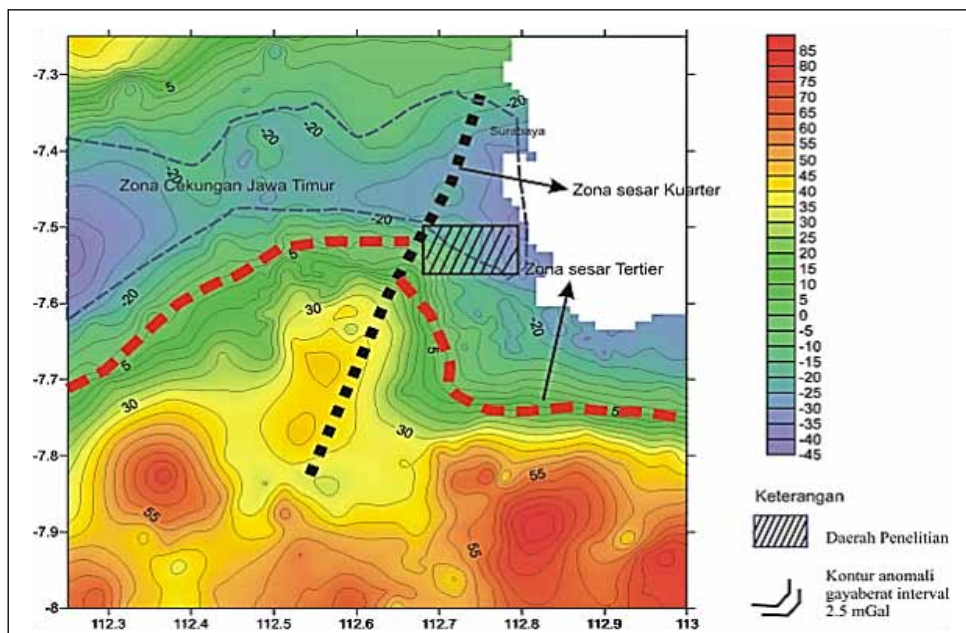
Gambar 3. Semburan air bercampur lumpur di rumah penduduk, Jalan Siring Barat, Porong.

han gayaberat sebagai perubahan rapat massa. Untuk menentukan kondisi geologi bawah permukaan yang berhubungan dengan deformasinya dan pengaruh paling jauh dari beban lumpur tersebut yang berada di luar area kolam lumpur, terutama di bagian barat kolam lumpur. Kontrol yang diperoleh untuk analisis data gayaberat ini adalah amblesan dan tembusan di daerah Siring Barat, gelembung gas muncul di Wunut dan daerah sekitarnya.

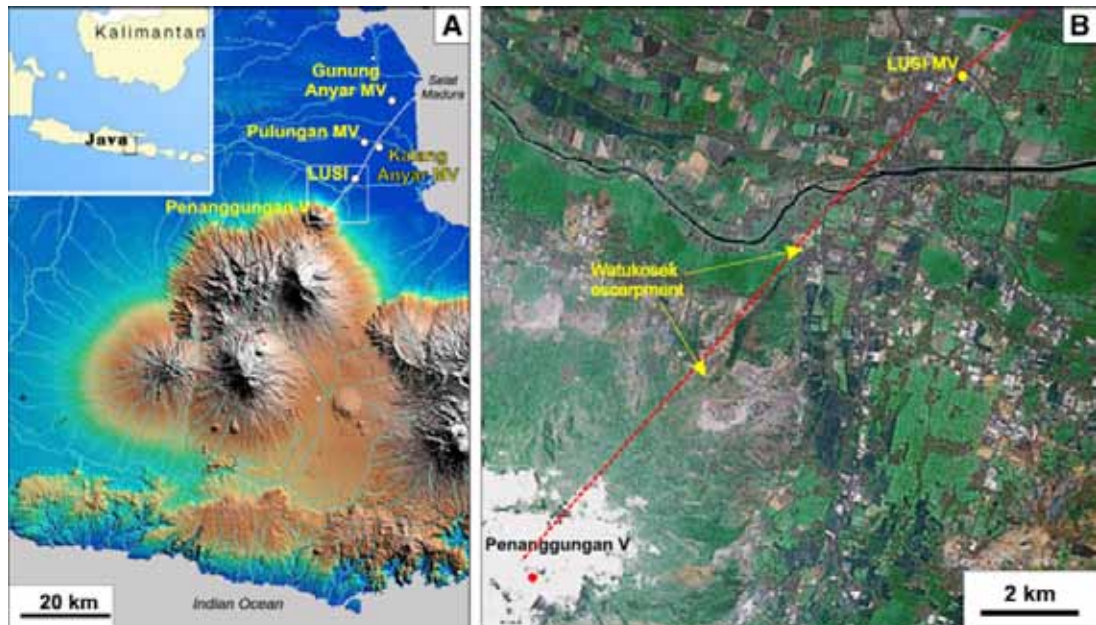
LATAR BELAKANG

Anomali gayaberat regional Lembar Kediri, Lembar Malang, dan Lembar Surabaya memperlihatkan cekungan dan punggungan anomali (Gambar 4). Cekungan anomali menempati di bagian utara merupakan bagian dari Cekungan Jawa Timur, sedangkan tinggian anomali me-

nempati bagian selatan merupakan pengangkatan batuan vulkanik dari Gunung Penanggungan dan Gunung Welirang. Kelurusan anomali gayaberat diduga sebagai sesar regional berarah barat – timur. Kontur anomali gayaberat regional terjadi pergeseran pola (*pattern offset*) ke arah selatan di bagian barat dan pergeseran ke arah utara di bagian timur, diduga sebagai zona Sesar Watukosek (Gambar 5). Zona sesar tersebut mengalami reaktivasi membentuk rekahan atau kekar menerus ke permukaan dan sebagai zona-zona lemah, terjadi amblesan di sekitar Siring Barat dan gelembung gas, dengan perkiraan kedalaman kurang dari 500 m (Cahyaningtyas *et al.*, 2012). Aluvium yang menempati daerah penelitian berasal dari lingkungan laut dangkal dengan ketebalan kurang dari 200 m (Santosa dan Suwarti, 1992).



Gambar 4. Pola Struktur geologi regional berdasarkan anomali gayaberat Malang dan Surabaya.



Gambar 5. Kelurusan geologi yang menghubungkan Mud Volcano dan sesar Watukosek dari Gunung Penanggungan kearah LUSI (Zaennudin *et al.*, 2010).

Untuk mengetahui kondisi geologi bawah permukaan dari sedimen aluvium tersebut, diperlukan adanya penelitian geofisika. Untuk mengetahui kondisi geologi bawah permukaan dari sedimen alluvium tersebut dapat dilakukan melalui pendekatan geofisika, yaitu penelitian gayaberat untuk analisis deformasi geologi bawah permukaan.

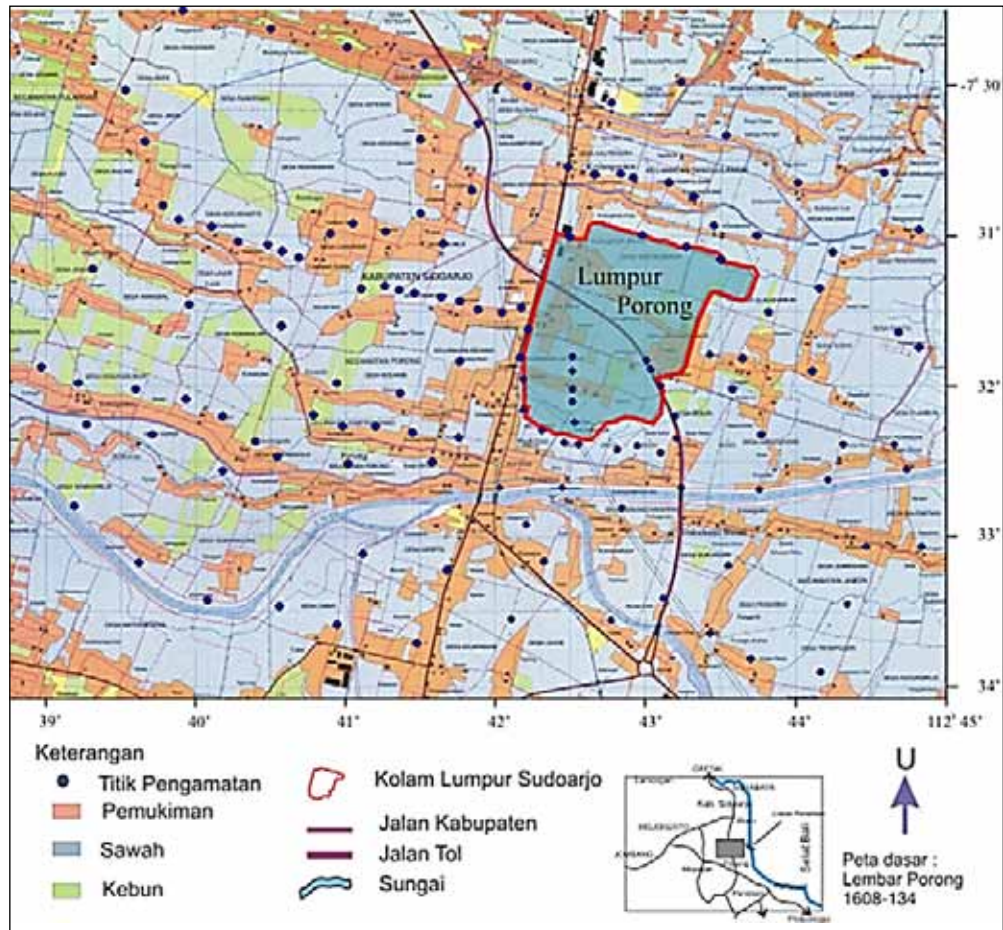
Secara administratif, penelitian gayaberat ini berada pada tiga kecamatan, yaitu Kecamatan Porong, Kecamatan Tanggulangin, dan Kecamatan Jabon, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur. Sedangkan secara geografis terletak pada koordinat antara 703° - 70034° LS dan 112039° - 112045° BT (Gambar 6).

METODOLOGI

Penelitian gayaberat ini meliputi pengukuran, pengolahan, pemodelan geologi, dan interpre-

tasi gayaberat. Didalam pemodelan geologi dan interpretasinya menggunakan control data lapangan berupa amblesan tanah dan bangunan retak. Sementara pengukuran atau monitoring gayaberat dilakukan secara periodic untuk memperoleh informasi perubahan nilai gayaberat yang dikorelasikan dengan deformasi bawah permukaan akibat pengurangan atau penambahan massa. Lokasi titik pengukuran gayaberat ditempatkan pada lokasi zona Sesar Watukosek dengan arah lintasan pengukuran gayaberat memotong zona sesar tersebut yang berada di luar kolam lumpur.

Analisis perubahan massa yang berhubungan dengan dinamika struktur geologi dangkal dilakukan penelitian gayaberat secara periodic yaitu bulan September 2009, bulan Desember 2009 dan bulan Juli 2010. Kajian perubahan gayaberat untuk analisis amblesan tanah dan



Gambar 6. Titik pengukuran gayaberat daerah Porong.

semburan air bercampur gas di daerah Siring barat, Tanggulangin, dan Ketapang. Dengan membuat pemodelan geologi, maka dapat memperoleh gambaran struktur geologi dangkal berdasarkan data anomali gayaberat residual.

Tinjauan Geologi

Stratigrafi batuan yang terdapat di daerah Sidoarjo adalah endapan batuan yang diawali dengan terbentuknya batugamping Formasi Kujung pada zaman Miosen, kemudian ditutupi secara tidak selaras oleh endapan batupasir

vulkanik Pliosen Atas, batulempung berwarna kebiru-biruan, selang-seling batupasir dan serpih berumur Plistosen Bawah – Tengah. Kelompok batuan tersebut kemudian yang ditindih secara tidak selaras oleh batuan Gunung api Notopuro berumur Plistosen Atas dan aluvial delta Brantas berumur Resen. Batu pasir vulkanik yang terdapat di sumur Banjar panji-1 ini mempunyai ketebalan sekitar 962 m yang menipis ke arah timur (sumur Porong). Lapisan batuan ini adalah endapan batuan vulkanik hasil erupsi gunung api yang berada di sebelah barat atau barat dayanya yang berumur Pliosen

Atas, merupakan hasil orogenesis Plio-Plistosen. Batulempung berwarna kebiru-biruan yang menindih di atasnya adalah bagian bawah dari Formasi Pucangan berumur Plistosen Bawah. Bemmelen (1949) menyatakan bahwa pada zaman Pliosen Bawah terdapat Gunung Api Banyak yang berlokasi di sekitar Surakarta masih aktif dan diduga pada saat yang bersamaan di wilayah sebelah timurnya terdapat aktivitas gunung api lainnya sebagai ujung timur Zona Solo adalah Kompleks Gunung Api Wilis Tua dan Anjasmoro Tua. Letusan-letusan dari kompleks gunung api tersebut menghasilkan endapan lahar, aliran piroklastika, dan atau endapan fluvial hasil "reworked" dari endapan piroklastika. Lapisan batupasir vulkanik yang terdapat pada wilayah Porong dan sekitarnya merupakan lapisan batuan hasil erupsi gunung api tersebut (Gambar 7).

PEMBAHASAN

Pengukuran gayaberat daerah Porong Sidoarjo telah diperoleh peta anomali gayaberat, peta anomali gayaberat residual, pemodelan geologi bawah permukaan, dan peta perbedaan gayaberat sebagai deformasi geologi dangkal. Jumlah titik yang telah diperoleh dalam pengukuran tersebut sebanyak 136 titik amat, dengan interval 500 m sepanjang jalan dan interval 1000 m untuk distribusi random.

Pada pengukuran daerah Siring Barat, Ketapang, dan Tanggulangin diperoleh pengukuran tidak stabil, dimana jarum penunjuk pada galvanometer sebagai penunjuk stabil pada titik nol dan mengalami goyangan yang cukup besar. Hal ini diduga bahwa lokasi tersebut sebagai zona lemah yang ditunjukkan oleh amblesan jalan, tembusan gas, semburan air bercampur

lumpur di Siring Barat yang menggambarkan adanya deformasi geologi bawah permukaan. Pengamatan gayaberat selama dua priode, yaitu bulan September dan bulan Desember 2009 menggambarkan zona lemah dan zona kuat diperoleh dari perubahan nilai gayaberat negatif dan positif sebagai reaktivasi struktur yang membentuk zona sesar dangkal.

Gayaberat

Anomali gayaberat daerah penelitian berkisar antara -28 mGal sampai 8 mGal, dan terbagi dalam 2 wilayah yaitu wilayah anomali rendah lebih kecil dari -14 mGal menempati timur laut dan anomali tinggi lebih besar dari -14 mGal menempati barat daya. Anomali tinggi ini membentuk bulatan meninggi melingkar kearah Gunung Penanggungan dan Gunung Welirang dan diduga sebagai kelompok Batuan Gunung Api Arjuno-Welirang yang tersusun oleh breksi, tuf, lava, aglomerat dan lahar. Sedangkan anomali rendah menurun kearah timur laut sebagai penebalan batuan sedimen dari Cekungan Jawa Timur (Gambar 8).

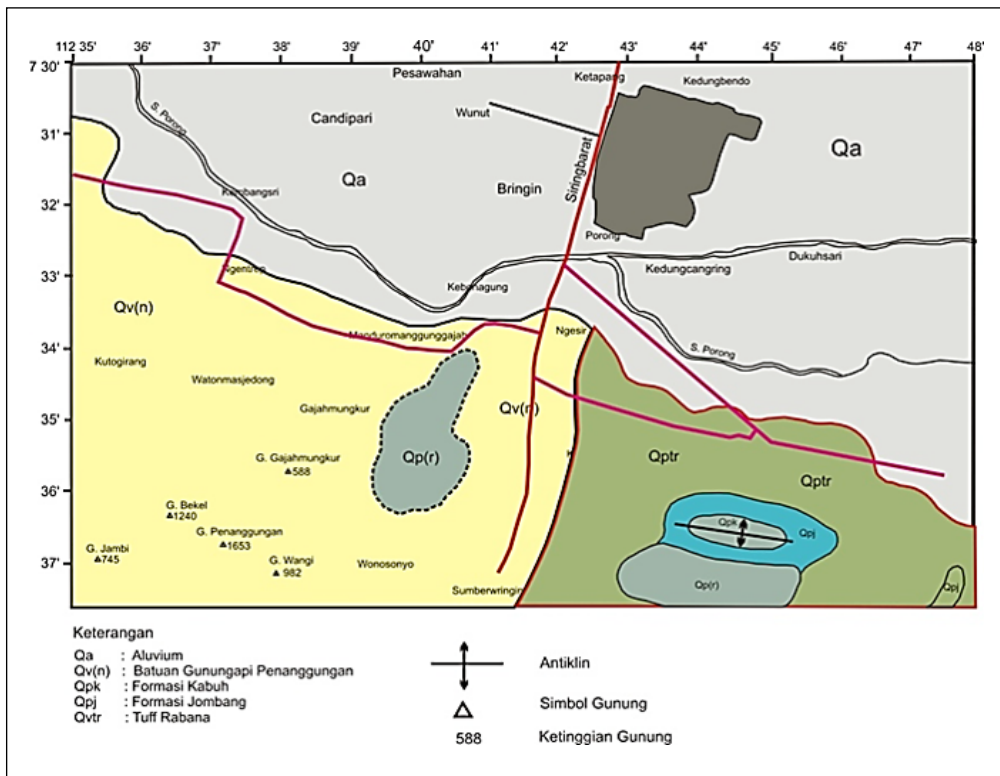
Pola anomali gayaberat ini membentuk lekukan - lekukan dengan arahnya sejajar sebagai kelurusan anomali yang diduga sebagai zona struktur geologi dari Sesar Watukosek. Sesar ini terletak di bagian barat kolam lumpur yang terletak dari Siring Barat sampai dengan Ketapang, diduga sesar tersebut yang mengalami perubahan yang disebabkan oleh semburan Lumpur Sidoarjo. Struktur sesar dangkal dan kekar menimbulkan adanya gas Termogenik yang berasal dari kedalaman antara 3.000 m sampai dengan 4.000 m dapat muncul ke permukaan.

Untuk memperoleh gambaran geologi struktur dangkal telah dilakukan analisis data anomali

gayaberat residual. Dimana anomali gayaberat residual tersebut diperoleh dari pemisahan anomali Gayaberat Bouguer terhadap anomali gayaberat regional, dengan kisaran nilai antara -3,5 mGal sampai 4 mGal. Berdasarkan distribusi nilainya dipisahkan dalam dua kelompok anomali, yaitu kelompok anomali rendah lebih kecil dari 0 mGal membentuk cekungan anomali dan kelompok anomali tinggi lebih besar dari 0 mGal, membentuk punggung anomali. Cekungan anomali gayaberat residual menempati bagian timur laut dan barat dari kolam lumpur, sedangkan punggung menempati kolam lumpur dan berarah barat laut – tenggara. Cekungan-cekungan anomali tersebut sebagai sinklin dari kelurusan anomali arahnya

barat laut – tenggara. Sedangkan punggung anomali yang melalui kolam lumpur, ini menunjukkan bahwa semburan tersebut berhubungan dengan batuan yang kompak yang mempunyai rapat massa besar dari sekitarnya, kemungkinan batuan tersebut adalah batuan penudungnya atau *cap rock*-nya.

Cekungan anomali di bagian barat dan timur membentuk sumbu cekungan memanjang berarah barat laut – tenggara sebagai kelurusan geologi dari zona Sesar Watukosek. Zona cekungan anomali dengan indikasi munculnya semburan lumpbu bercampur air diduga sebagai zona lemah dan dikontrol oleh deformasi permukaan dari pengukuran GPS (Gambar 10).



Gambar 7. Peta geologi daerah Porong yang disederhanakan (Santosa dan Suwarti, 1992).

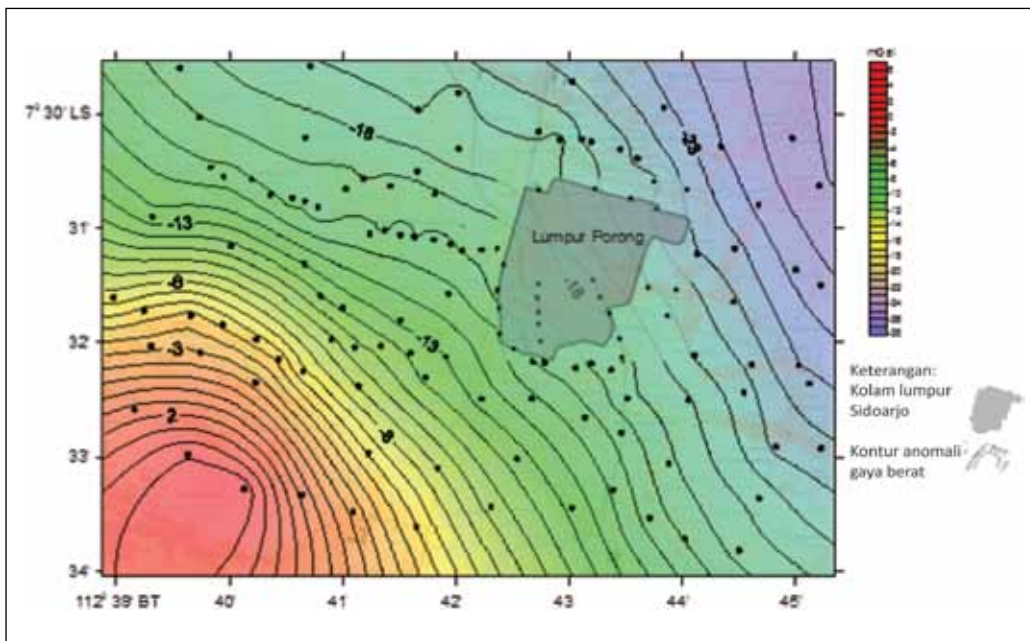
Struktur geologi dan Deformasi

Kelurusan anomali gayaberat sebagai struktur geologi berarah barat daya – timur laut dan terletak di bagian barat kolam lumpur, sebagai Sesar Watukosek. Sesar tersebut mengalami reaktivasi yang membentuk zona lemah dan menimbulkan adanya amblesan maupun tembusan gas dan air.

Deformasi permukaan merupakan perubahan posisi, elevasi, dan arah kemiringan, melalui pengukuran GPS secara periodik pada titik dalam jangka waktu tertentu. Deformasi tersebut berhubungan dengan deformasi bawah permukaan sebagai bentuk reaktivasi dari kondisi geologi dangkal bawah permukaan dan perubahan dari material padatan menjadi material cairan karena adanya gaya tekan horizontal (Cahyaningtyas *et al.*, 2012 dan Sudarsono *et al.*, 2008).

Deformasi bawah permukaan di luar kolam Lumpur Sidoarjo adalah reaktivasi Sesar Watukosek menjadi sesar dangkal, dan perubahan material padatan menjadi material cairan atau terjadi perubahan rapat massa. Hal ini berhubungan dengan gaya tekan horizontal dari beban Lumpur Sidoarjo. Pola struktur kompleks tersebut merupakan terobosan batuan alas yang menerus ke permukaan membentuk struktur sesar dangkal.

Pengukuran gayaberat dilakukan 3 perioda, yaitu pengukuran bulan September 2009, Desember 2009, dan Juli 2010. Dari ketiga pengukuran tersebut diperoleh peta kontur pengurangan gayaberat antara bulan September dengan bulan Desember 2009 dan antara pengurangan gayaberat bulan Desember 2009 dan bulan Juli 2010. Peta kontur ini menunjukkan pola kontur menurun dan meninggi, kon-



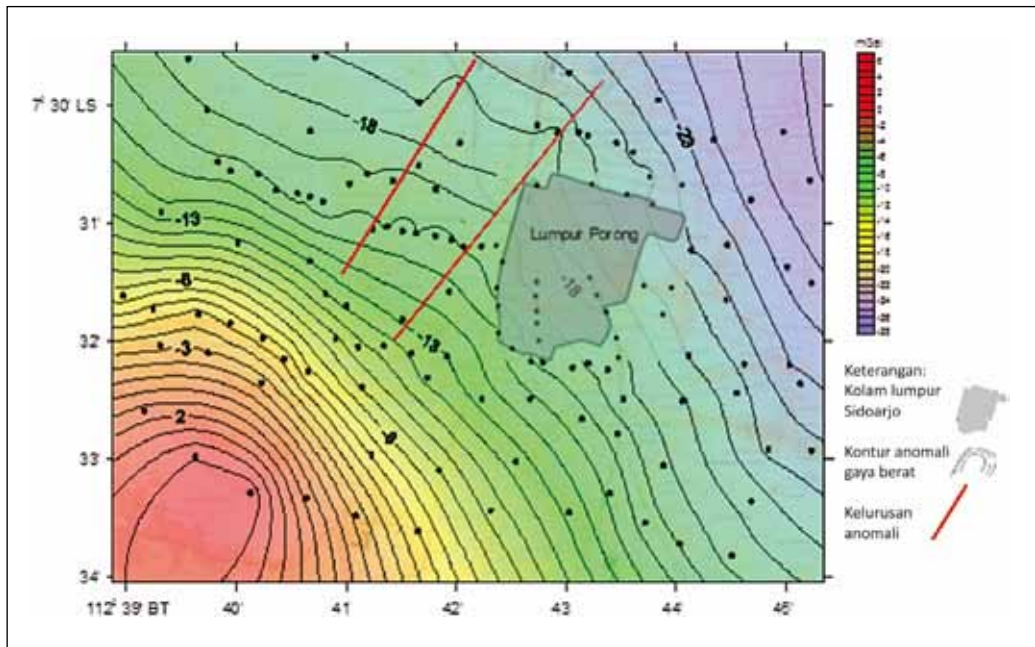
Gambar 8. Kontur anomali gayaberat daerah Porong, dengan interval 0,5 mgal.

tur menurun sebagai perubahan kontur negatif atau zona negatif (-) dan kontur meninggi sebagai perubahan kontur positif atau zona positif (+).

Zona kontur negatif dikorelasikan sebagai zona lemah, artinya terjadi pengurangan massa atau penurunan rapat massa pada lokasi tersebut, sehingga memudahkan terjadi rekahan yang menyebabkan adanya amblesan yang diindikasikan dengan munculnya gelembung-gelembung gas (*bubbles*). Sedangkan kontur rendah sebagai zona lemah merupakan wilayah pengurangan massa atau penurunan rapat massa terjadi dibagian utara tanggul di wilayah Ketapang, Kalitengah sampai Siring Barat. Indikasi dari zona lemah, ditemukan adanya tembusan gas, buaian air dan gas, dan retakan pada perumahan penduduk dengan arah barat laut – tenggara. Di bagian timur kolam lumpur belum terjadi luapan lumpur, air atau gas yang menunjukkan

tidak ada zona penurunan bawah permukaan.

Sedangkan zona positif atau zona kuat mengindikasikan sebagai daerah pengangkatan (*up lift*), dan di lokasi ini tidak ditemukan tembusan gas. Zona positif menempati daerah Desa Wunut dan Kelurahan Gedang sampai Desa Sentul, lokasi ini digambarkan daerah pengangkatan atau mempunyai rapat massa tinggi. Zona negatif membentuk bulatan di Siring Barat, Ketapang sampai Kalitengah. Zona ini berhubungan dengan amblesan di jalan Raya Porong dan luapan lumpur di rumah penduduk daerah Siring barat, bersamaan dengan kejadian tersebut juga muncul semburan gas dan air di Wunut, Pamotan, dan Ketapang. Begitu juga di Jabon bagian selatan kolam lumpur muncul semburan air bercampur lumpur yang ditandai oleh bulatan kecil dari zona kontur negatif. Zona kontur positif menempati bagian tengah kolam dan membelok ke utara sampai Jalan Raya Gem-



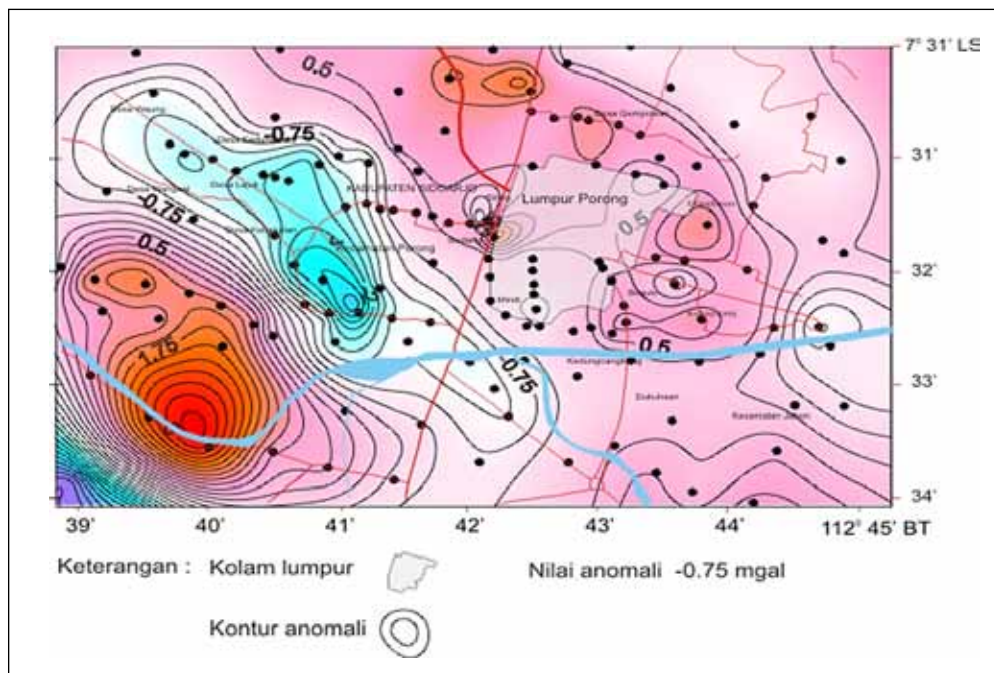
Gambar 9. Kelurusan struktur geologi yang ditunjukkan pola anomali gayaberat berarah selatan barat daya – utara timur laut.

pol – Surabaya, zona ini menunjukkan adanya material yang masih kuat dari areal sekitarnya, yang juga muncul di bagian timur kolam lumpur.

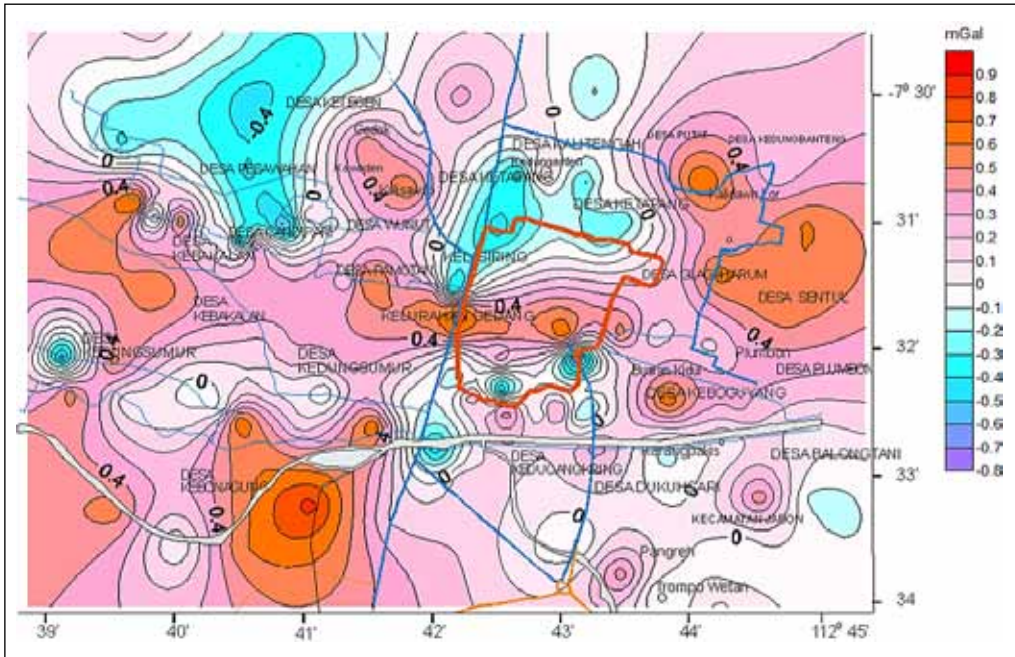
Pada perioda pengukuran bulan Desember 2009 dan bulan Juli 2010, terjadi zona perubahan nilai, dengan zona lemah berpindah ke arah selatan kali Porong atau bagian barat Desa Kedungcangkring mencapai $-0,5$ mgal, Kelurahan Siring Barat mencapai $-0,3$ mgal. Perubahan nilai gayaberat tersebut menunjukkan bahwa terjadi penurunan semburan (Gambar 11). Perubahan nilai gayaberat pada pengukuran bulan Desember 2009 dan bulan Juli 2010 ini telah mengalami perubahan dengan zona negatif semakin kecil yang ditunjukkan oleh aktivitas tembusan gas dan air di Siring barat mengalami penurunan jumlah yang aktif. Pemantauan pe-

rubahan nilai gayaberat antara bulan September 2009 dan Desember 2009 lebih kecil dibandingkan perubahan nilai gayaberat antara bulan Desember 2009 dan bulan Juli 2010. Pada perioda bulan Desember 2009 dan Juli 2010 ini terjadi penguatan nilai di bagian barat terjadi amblesan-amblesan yang bersamaan dengan adanya tembusan gas dan air (Gambar 12).

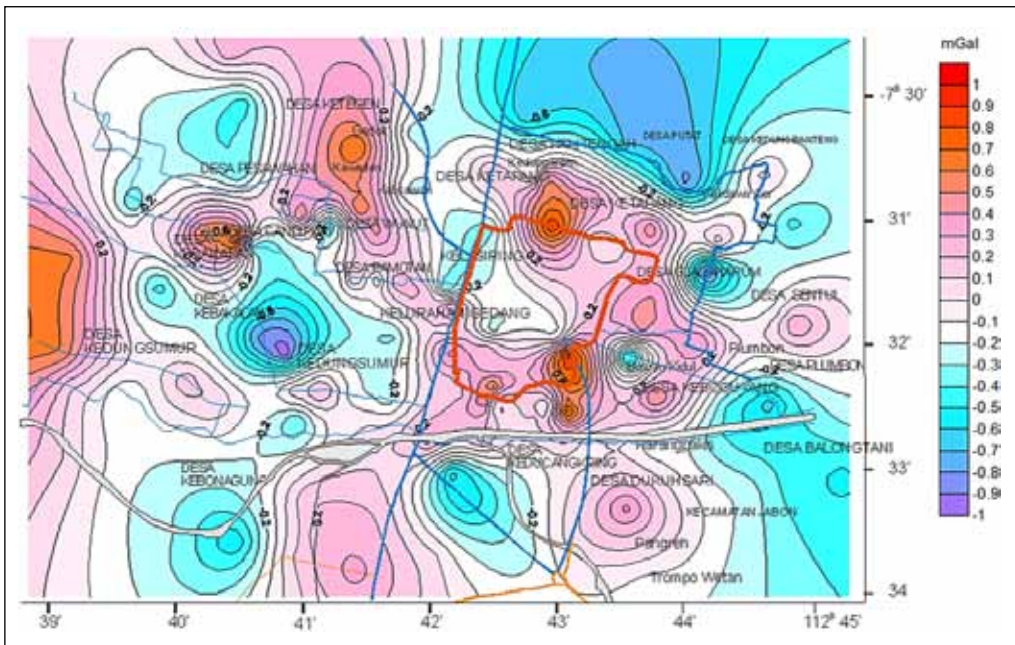
Penampang anomali gayaberat yang digunakan untuk pemodelan geologi adalah penampang yang memotong lokasi Lumpur Sidoarjo yang berarah barat daya – tenggara (Gambar 13), yang melalui rencana Jalan Tol Siring Barat, tanggul barat dan timur. Nilai anomali gayaberat secara keseluruhan didominasi oleh nilai anomali rendah (< 0 mgal). Hal ini menunjukkan bahwa rapat massa yang menempati lokasi ini merupakan kumpulan rapat massa dari ke-



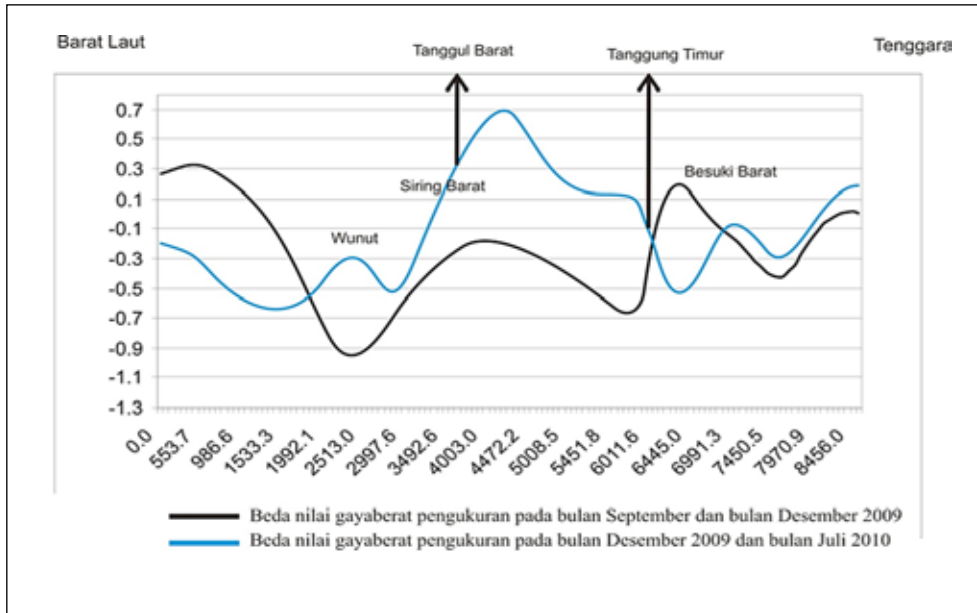
Gambar 10. Kontur anomali gayaberat residual daerah Porong, dengan interval 0,5 mgal.



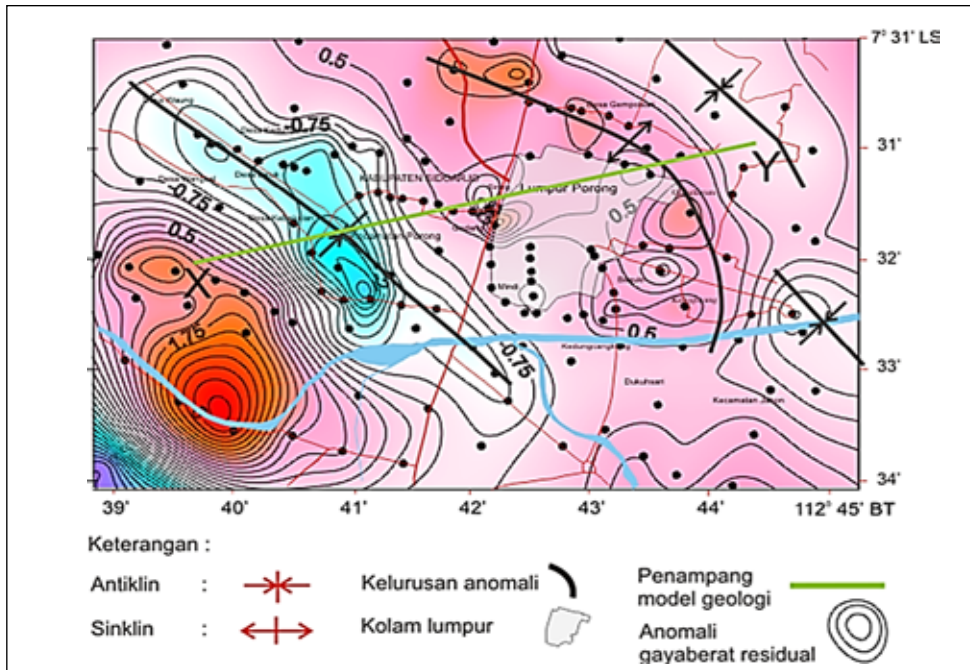
Gambar 11. Kontur perubahan nilai gayaberat pada pengamatan Bulan September 2009 dan pengamatan bulan Desember 2009.



Gambar 12. Kontur perubahan nilai gayaberat pada pengamatan Bulan Desember 2009 dan pengamatan bulan Juli 2010.



Gambar 13. Penampang perubahan nilai gayaberat bulan September dan Desember 2009, dan Juli 2010.



Gambar 14. Sinklin dan antiklin menempati anomali residual rendah dan tinggi berarah utara barat laut – selatan tenggara.

lompek batuan sedimen Kuartar dengan ketebalan lebih dari 2000 meter (Mazzini, 2007).

KESIMPULAN

Pola kontur anomali gayaberat daerah Porong menunjukkan pola lengkungan ke arah utara yang diduga sebagai zona struktur geologi yang berarah barat daya – timur laut, yaitu Sesar Watukosek. Sedangkan pola anomali gayaberat residual diperoleh punggungan dan cekungan anomali. Punggungan dan cekungan tersebut membentuk antiklin dan sinklin yang berarah barat laut – tenggara (Gambar 14). Untuk menentukan kedalaman dan rapat massa lapisan batuanya dilakukan dari pemodelan geologi. Pemodelan geologi pada penampang anomali gayaberat dari lintasan arah barat daya – timur laut yang menunjukkan sesar dan pengangkatan batuan alas, dengan lokasi Lumpur Sidoarjo merupakan pengangkatan (*up lift*). Lapisan batuan diperoleh dari model ini dicerminkan oleh rapat massa lapisan penutup adalah 1,9 gr/cc dari batuan aluvium. Sedangkan lapisan kedua atau sebagai batuan alas dengan rapat massa 2,3 gr/cc sebagai kelompok batuan Formasi Kalibeng Atas dan Kalibeng Bawah. Pada penampang ini ke arah timur terjadi penurunan anomali merupakan struktur sesar Watukosek, oleh karena itu Lumpur Sidoarjo terletak di bagian timur sesar tersebut.

Kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan pengukuran gayaberat dalam 3 periode telah diperoleh perubahan rapat massa. Perubahan rapat massa merupakan deformasi bawah permukaan, akibat perubahan material padatan menjadi material cairan yang menunjukkan ketidak stabilan daerah tersebut. Model geologi pada penampang anomali gayaberat memotong

kolam lumpur ditafsirkan bahwa Sesar Watukosek, mengalami rekahan maupun sesar dangkal sebagai reaktivasi dari gaya tekan horizontal maupun vertikal. Tembusan gas maupun semburan air lumpur di daerah Siring Barat sampai Tanggulangin sebagai kontrol dari reaktivasi dari Sesar Watukosek tersebut.

Ucapan terima kasih

Pada kesempatan ini kami mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Survei Geologi yang telah memberikan kesempatan dalam penulisan paper ini, juga saya ucapkan terimakasih kepada Ketua Kelompok Geofisika yang telah memberikan dukungan dan koreksinya.

ACUAN

Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (BPLS), 2010, *Data lokasi bubble semburan lumpur Sidoarjo*.

Cahyaningtyas, T. I., Suaidi, D. A., dan Sujito, 2013, *Identifikasi Potensi Gerakan Tanah di Sekitar Kawasan Semburan Lumpur Lapindo Berdasarkan Pengukuran Resistivitas Flashres 64 - 61 Channel*, Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang.

Hasan, M. A., dan Nurwidyanto, M. I., 2008, *Berkala Fisika*, Vol 11 No. 4,

Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G.G., Aloisi, G., Planke, S., Malthe-Sorensen, A., Istadi, B., 2007, *Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia*. *Earth and Planetary Science Letters* 261 (3–4), 375–388

Nazar Buyung et al., 1994, *Peta anomali gayaberat Lembar Malang*, Skala 1:100.000 Pusat

Penelitian dan Pengembangan Geologi,.

Panjaitan, S., 2010, *Prospek Migas pada Cekungan Jawa Timur dengan Pengamatan Metoda Gayaberat*, Pusat Survei Geologi.

Santosa, S. dan Suwarti, T, 1992, *Peta Geologi Lembar Malang*, Skala 1:100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Sukardi, 1992, *Peta Geologi Lembar Surabaya*, Skala 1:100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Syarif, N., Suhariono., dan Subagio., 1994. *Peta Anomali Bouguer Lembar Surabaya, Jawa Timur*, Skala 1: 100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Sudarsono, U. dan Sudjarwo, I. B., 2008, Amblasan Di daerah Porong, Jawa Timur, *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol 3 No. 1

Zaennudin, A., Badri, I., Padmawidjaja, T., Humaida, H., dan Sutiningsih, N. E., *Fenomena Geologi Semburan Lumpur Sidoarjo*, Badan Geologi, 2010.