

Pengolahan dan Pemodelan Data *Gravity* pada Area Gunung Pandan, Jawa Timur

Waskito Aji^{1,a)}, Eko Januari Wahyudi^{2,b)}, Djoko Santoso^{3,c)} dan Wawan Gunawan A. Kadir^{3,d)}

¹Laboratorium Geofisika Eksplorasi,
Kelompok Keahlian Geofisika Terapan dan Eksplorasi,
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} waskitoaji46@gmail.com (corresponding author)

^{b)} ekojw@gf.itb.ac.id

^{c)} dsantoso78@yahoo.com

^{d)} wawan@gf.itb.ac.id

Abstrak

Gunung Pandan adalah salah satu gunung api yang terletak di Jawa Timur. Pernah terjadi gempa bumi di daerah Gunung Pandan dengan magnitudo 4,2 pada Kamis 25 Juni 2015, pukul 22.35 WIB. Gempa tersebut merupakan indikasi dari masih aktifnya tektonik di daerah Gunung Pandan. Selain itu, Gunung Pandan merupakan salah satu dari sebelas prospek panas bumi di Jawa Timur. Sehingga, menarik untuk dilakukan studi terkait kondisi geologi dari Gunung Pandan. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi kondisi bawah permukaan dari Gunung Pandan berdasarkan data gravity. Dilakukan pemodelan inversi data gravity untuk memodelkan kondisi bawah permukaan Gunung Pandan. Digunakan teknik inversi non linier dengan perhitungan iteratif. Skema pemodelan yang digunakan yaitu menentukan model kedalaman batas lapisan dari dua lapisan batuan di bawah permukaan berdasarkan data anomali gravity. Pada setiap lapisan batuan diasumsikan terdiri dari kumpulan prisma segiempat. Selanjutnya dilakukan perhitungan respon model dari kumpulan prisma yang merepresentasikan lapisan batuan dan dilakukan evaluasi dengan membandingkan nilai respon model hasil perhitungan terhadap data observasi. Setelah evaluasi, dilakukan modifikasi terhadap panjang dari prisma sehingga terjadi perubahan model batas lapisan. Proses evaluasi dan modifikasi terhadap model dilakukan secara iteratif sesuai dengan jumlah iterasi yang ditentukan saat pemodelan. Hasil yang diperoleh dari proses pemodelan yang dilakukan adalah model batas lapisan dari dua lapisan batuan di bawah permukaan Gunung Pandan. Model bawah permukaan yang dihasilkan menunjukkan adanya pola yang menyerupai intrusi dari suatu batuan yang menerobos batuan lain. Pola tersebut diinterpretasikan sebagai intrusi dari batuan andesitis yang menerobos lapisan batuan lebih muda di atasnya. Intrusi ini berlokasi di daerah puncak dari Gunung Pandan dan menerobos ke arah Utara, dengan intrusi terdangkal berada di sekitar puncak dari Gunung Pandan namun tidak sampai muncul di permukaan. Orde kedalaman terdangkal dari intrusi yaitu kurang dari 100 meter.

Kata-kata kunci: Gravity, Gunung Pandan, Inversi, Pemodelan

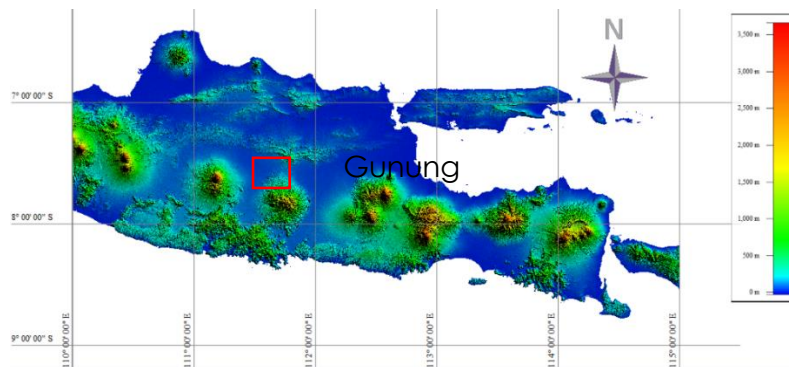
PENDAHULUAN

Gunung Pandan merupakan gunung api yang terletak pada perbatasan dari 3 kota di Jawa Timur yaitu Nganjuk, Madiun, dan Bojonegoro. Menurut Santoso dkk. (2017) Gunung Pandan tidak termasuk gunung api aktif di Indonesia. Menurut van Bemmelen (1949), Gunung Pandan termasuk dalam Antiklinorium Kendeng. Menurut Nugraha dkk. (2016), pernah terjadi sebuah gempa dengan magnitudo 4,2 pada Kamis, 25 Juni 2015 pukul 22:35 WIB. Akibat dari gempa tersebut yaitu adanya kerusakan pada 57 rumah di Dusun Pohulung. Gempa tersebut mengindikasikan tektonik dari Zona Kendeng yang masih aktif. Selain itu, menurut Setijadji (2010), daerah Gunung Pandan merupakan salah satu dari sebelas prospek panas bumi yang ada di Jawa Timur. Sehingga, menarik untuk dilakukan studi lebih lanjut mengenai kondisi bawah permukaan dari Gunung Pandan.

Pada penelitian ini penulis akan melakukan studi dari kondisi dari bawah permukaan Gunung Pandan dengan cara melakukan pemodelan kondisi bawah permukaan Gunung Pandan menggunakan metode *gravity*.

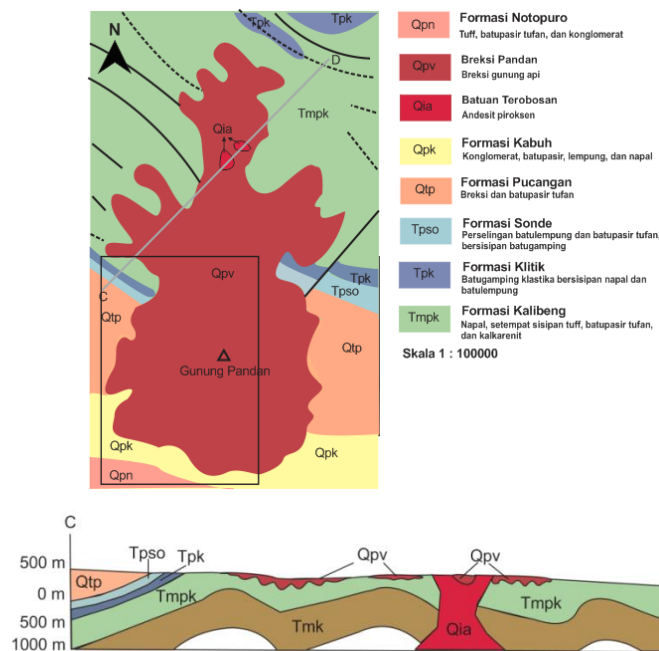
GEOLOGI REGIONAL

Daerah Jawa Timur menurut van Bemmelen (1949), dibagi menjadi tujuh zona fisiografi yaitu Dataran Aluvial Jawa Utara, Antiklinorium Rembang, Zona Depresi Randublatung, Antiklinorium Kendeng, Zona Pusat Depresi Jawa, Busur Vulkanik Kuarter, dan Pegunungan Selatan. Peta lokasi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Gunung Pandan terletak di zona Antiklinorium Kendeng. Menurut Smyth dkk. (2005) batuan penyusun daerah Gunung Pandan terdiri dari sekuen vulkanogenik tebal serta pelagic sedimen. Selain terdapat *thrust belt* dengan tren Barat – Timur sebagai batas antara zona Antiklinorium Kendeng dengan zona Antiklinorium Rembang .



Gambar 1. Peta Daerah Jawa Timur.

Menurut Lunt dkk.(1998) Gunung Pandan adalah gunung api berumur Pleistosen Awal. Gunung menempati posisi *near back-arc* dan terletak satu deretan dengan Gunung Ungaran. Daerah Gunung Pandan ini secara geologi tersusun atas batuan breksi gunung api yang diberi nama Breksi Pandan. Peta geologi dari daerah Gunung Pandan dapat dilihat pada Gambar 2. Daerah penelitian terletak di dalam area kotak hitam pada Gambar 2.

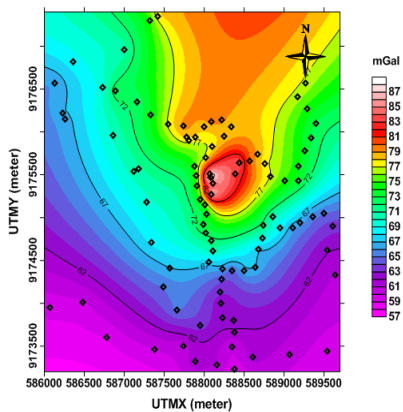


Gambar 2. Penyederhanaan Peta Geologi daerah Gunung Pandan dari Pringgoprawiro dan Sukido (1992).

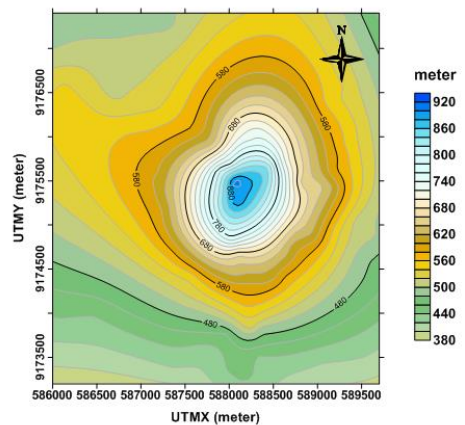
DATA DAN PENGOLAHAN

Data

Data *gravity* yang digunakan berasal dari hasil pengukuran di daerah Gunung Pandan pada tahun 2016 dan 2017. Alat yang digunakan untuk akuisisi data adalah Scintrex CG5. Gambar 3. merupakan peta CBA dari daerah Gunung Pandan. Pada peta CBA daerah puncak dari Gunung Pandan ditunjukkan oleh daerah dengan kontur nilai anomali yang tinggi mencapai nilai 85 mGal. Sementara data topografi yang digunakan berasal dari data pengukuran menggunakan GPS yang dilakukan bersamaan dengan akuisisi data *gravity*. Gambar 4. berikut menunjukkan peta topografi dari daerah penelitian berdasarkan data topografi hasil akuisisi yang dilakukan bersamaan dengan akuisisi data *gravity*. Elevasi maksimum pada peta topografi menunjukkan daerah puncak dari Gunung Pandan dengan elevasi mencapai 900 meter diatas permukaan laut.



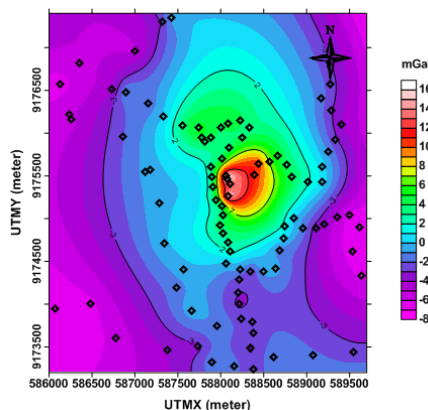
Gambar 3. Peta CBA Daerah Gunung Pandan.



Gambar 4. Peta topografi daerah Gunung Pandan.

Pemisahan Anomali Regional dan Residual

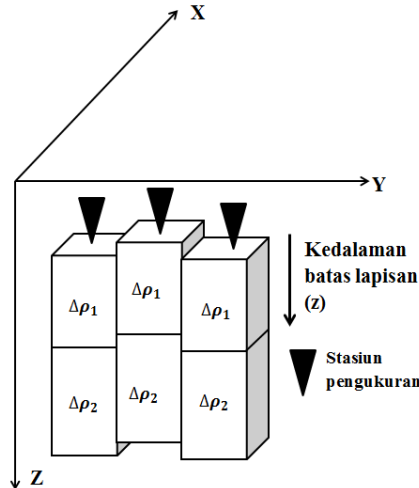
Pemisahan anomali regional dan anomali residual pada penelitian ini dilakukan menggunakan teknik *polynomial surface fitting*. Anomali regional dari data *gravity* didekati oleh suatu persamaan bidang orde dua. Anomali residual diperoleh dari pengurangan CBA terhadap anomali regional. Penggunaan data anomali residual untuk dimodelkan terkait tujuan dari pemodelan ini yaitu memodelkan kondisi bawah permukaan pada kedalaman yang relatif dangkal. Peta anomali residual yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta anomali residual daerah Gunung Pandan

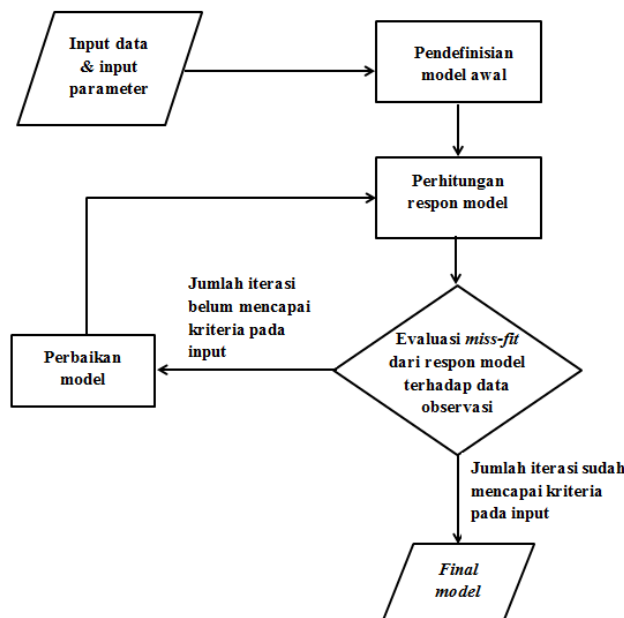
PEMODELAN

Pada tahap ini, model yang dicari menggunakan pemodelan inversi adalah kedalaman batas lapisan antara dua lapisan batuan dan data yang dimodelkan adalah data anomali *gravity*. Asumsi yang digunakan yaitu kondisi bawah permukaan terdiri dari kumpulan prisma segiempat sebagai sumber bodi anomali, dengan ilustrasi ditunjukkan pada Gambar 6. Pada setiap stasiun pengukuran diwakili oleh 2 buah prisma segiempat dengan salah satu prisma mewakili lapisan batuan pertama dan prisma lainnya mewakili lapisan batuan kedua, dan setiap lapisan mempunyai nilai kontras densitas $\Delta\rho_1$ untuk lapisan atas dan $\Delta\rho_2$ untuk lapisan bawah.



Gambar 6. Ilustrasi model batas lapisan.

Mekanisme pemodelan untuk penentuan model kedalaman batas lapisan dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir pemodelan inversi yang digunakan.

Pada tahap inisiasi program, parameter *input* yang dimasukkan diantaranya data anomali *gravity* residual Gunung Pandan, data topografi Gunung Pandan, dimensi model prisma yang digunakan, batas lapisan, jumlah iterasi yang digunakan, nilai densitas untuk tiap lapisan.

Pada penelitian ini, nilai kontras densitas tiap lapisan batuan yang akan dimodelkan ditentukan berdasarkan data sekunder berupa peta geologi daerah sekitar Gunung Pandan. Berdasarkan informasi dari peta geologi,

daerah Gunung Pandan terdiri atas beberapa formasi batuan diantaranya Formasi Pucangan, Formasi Klitik, Formasi Sonde, Formasi Kalibeng, serta Breksi Pandan. Pada formasi tersebut secara umum terdapat batupasir dan batupasir tufaan. Selain itu, berdasarkan penampang C – D pada Gambar 2. terdapat intrusi andesit pada sebelah utara daerah Gunung Pandan. Di sisi lain, terdapat manifestasi sumber mata air panas di sekitar Gunung Pandan yang mendukung kemungkinan adanya intrusi di Gunung Pandan

Sehingga pada penelitian ini akan dimodelkan suatu batuan andesit yang mengintrusi batuan samping yang berasal dari formasi – formasi batuan yang ada di daerah penelitian. Batuan samping tersebut diasumsikan homogen berupa batupasir dan batu pasir tufaan. Berdasarkan data nilai densitas batuan dari Telford dkk. (1990), densitas pasir yaitu 1,61 g/cc – 2,76 g/cc dan densitas batuan andesit yaitu 2,4 g/cc – 2,8 g/cc. Sementara itu, menurut Tan dkk. (2003), densitas dari batupasir tufaan yaitu 1,92 g/cc – 1,99 g/cc. Sehingga pada pemodelan, digunakan kontras densitas -0,2 g/cc untuk lapisan atas atau batuan samping dan +0,5 g/cc untuk lapisan bawah atau batuan yang menerobos, dengan asumsi *background density* dari data adalah 2,1 g/cc.

Selanjutnya, model awal didefinisikan, yang pada penelitian kali ini model awal berupa batas lapisan yang *flat* pada kedalaman tertentu. Dari model awal dihitung respon modelnya menggunakan persamaan perhitungan respon dari prisma segiempat mengacu dari Plouff (1976)

dengan G merupakan konstanta gravitasi, ρ merupakan densitas batuan, R adalah jarak titik pengukuran ke tiap sudut prisma, x adalah komponen sumbu x dari jarak titik pengukuran ke tiap sudut prisma, y adalah komponen sumbu y dari jarak titik pengukuran ke tiap sudut prisma, dan z adalah komponen vertikal dari jarak titik pengukuran ke tiap sudut prisma.

Kemudian dilakukan perhitungan *miss-fit* dari respon model terhadap data observasi dan dilakukan evaluasi terhadap nilai *miss-fit* yang dihasilkan. Setelah itu, dilakukan perbaikan terhadap model menggunakan persamaan 1. Perhitungan *miss-fit* menggunakan persamaan *Mean Absolute Error* dari penelitian Chai dan Draxler (2014).

Selanjutnya, untuk modifikasi model menggunakan persamaan 2 dari Blakely (1996). Berikut ini persamaan yang digunakan untuk melakukan modifikasi model

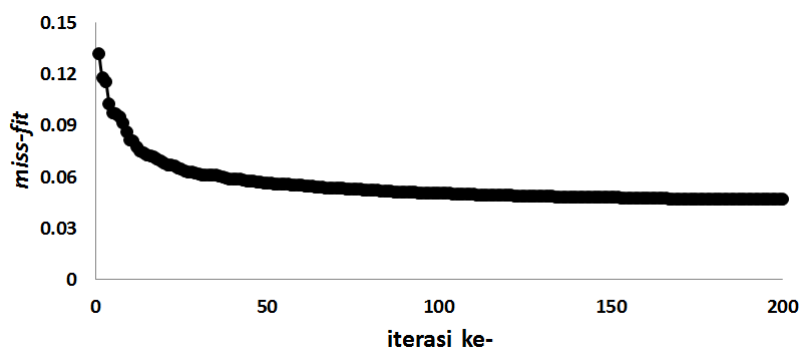
$$z^{(j+1)}(k) = z^j(k) + \frac{g_{obs}(k) - g_{cal}(k)}{2\pi G \Delta\rho}, k = 1,2,3,\dots,N \tag{1}$$

dengan z merupakan kedalaman batas lapisan, g_{obs} merupakan data observasi, g_{cal} merupakan data kalkulasi, G merupakan konstanta gravitasi, dan ρ adalah densitas dari lapisan batuan.

Model hasil perbaikan tersebut dihitung kembali respon modelnya, dievaluasi terhadap data observasi, dan dilakukan perbaikan model. Proses ini berlangsung secara iteratif hingga mencapai jumlah iterasi yang sudah ditentukan.

HASIL DAN ANALISIS

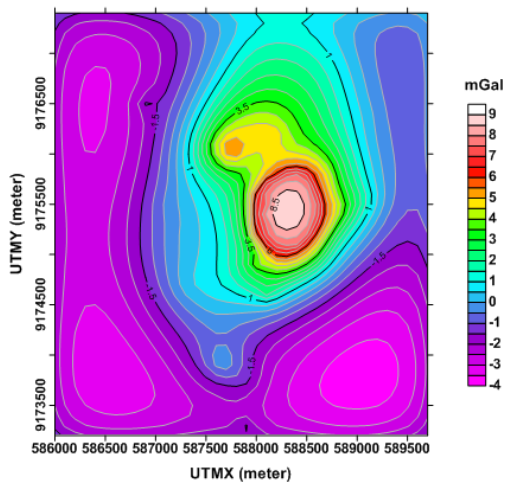
Setelah dilakukan pemodelan dengan jumlah iterasi sebanyak 200 kali, pola penurunan *miss-fit* setiap iterasi dapat dilihat pada Gambar 8. Pada awal pemodelan, nilai *miss-fit* sekitar 0,13 dan mengalami penurunan nilai *miss-fit* pada tiap iterasi hingga pada akhir iterasi didapatkan nilai *miss-fit* 0,045.



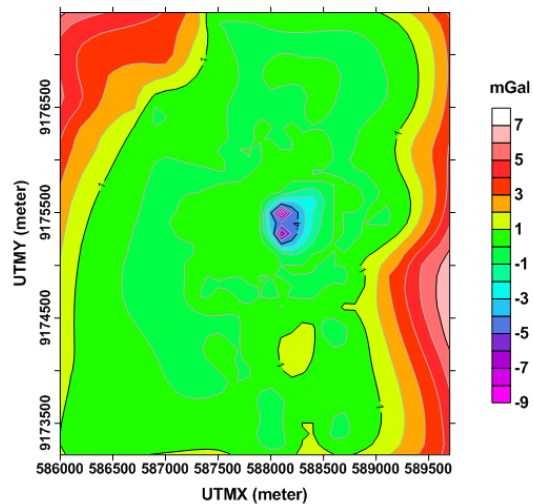
Gambar 8. Kurva perubahan miss-fit setiap iterasi selama proses inversi.

Ditinjau dari kontur *calculated data* yang dapat dilihat pada Gambar 9, terdapat kesesuaian pola antara kontur *calculated data* dengan pola kontur dari data yang dimodelkan. Daerah sekitar puncak Gunung Pandan ditandai dengan anomali yang relatif tinggi dibanding daerah sekitar. Hanya saja terdapat perbedaan rentang

nilai anomali dari *calculated data* terhadap data observasi. Nilai rentang anomali dari *calculated data* lebih pendek dibandingkan rentang nilai anomali dari data observasi. Nilai anomali terbesar pada *calculated data* yaitu sekitar 9 mGal dan nilai anomali terendahnya yaitu sekitar -4 mGal. Sedangkan nilai anomali terbesar pada data observasi yang dimodelkan yaitu sekitar 16 mGal dan nilai anomali terendahnya yaitu sekitar -8 mGal. Sementara itu, ketika ditinjau perbedaan nilai antara *calculated data* terhadap data yang dimodelkan pada titik yang sama, nilai perbedaan terbesar yaitu 8 mGal pada daerah sekitar puncak Gunung Pandan, dan perbedaan terkecil bernilai 0,000002 mGal. Kontur dari perbedaan nilai antara *calculated data* terhadap data observasi dapat dilihat pada Gambar 10.

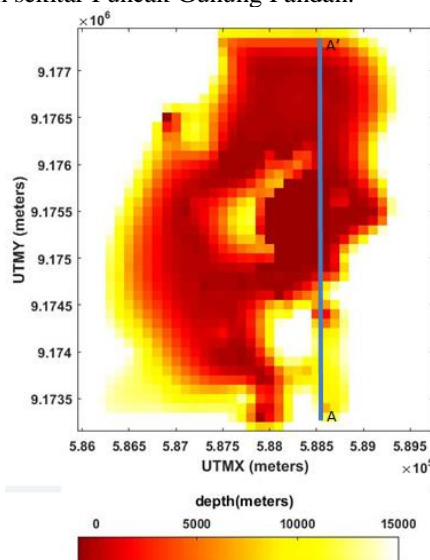


Gambar 9. Peta kontur *calculated data* hasil perhitungan respons model dari model hasil proses inversi.



Gambar 10. Peta kontur selisih *calculated data* dengan *observed data*

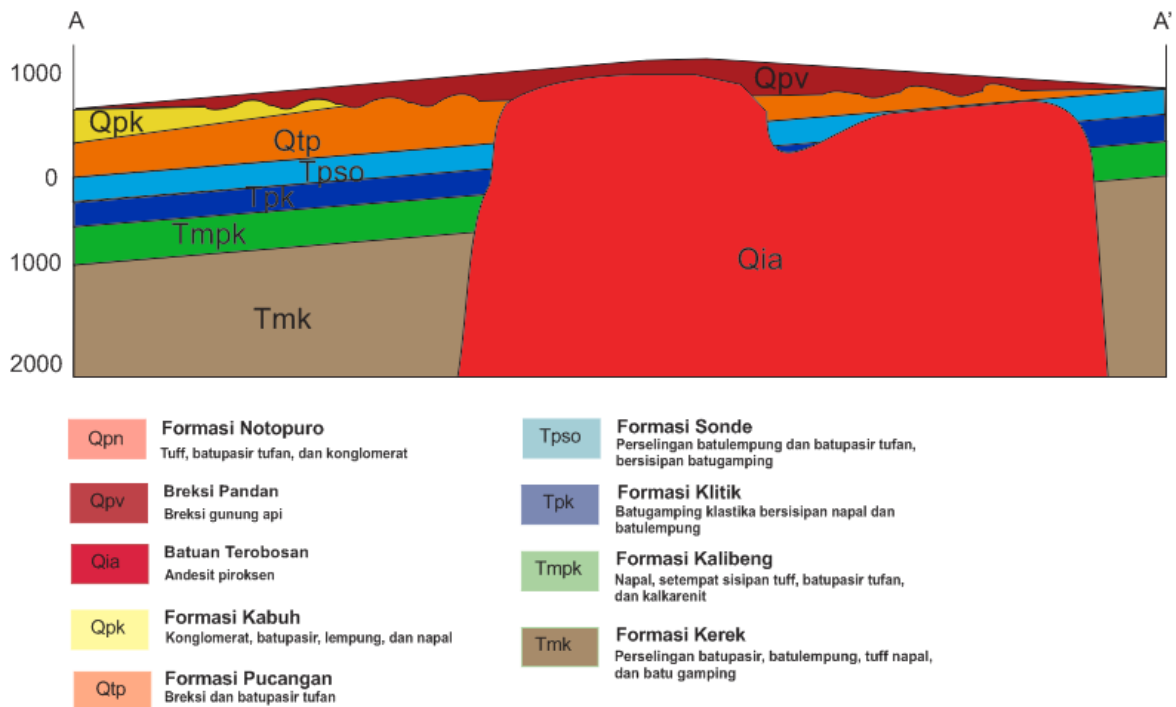
Sementara itu, apabila ditinjau dari model yang dihasilkan, yang dapat dilihat pada Gambar 11, terlihat terdapat pola model kedalaman batas lapisan yang dangkal yang ditunjukkan dengan warna merah pada daerah dengan nilai anomali *gravity* yang relatif lebih tinggi dari sekitar. Batas lapisan paling dangkal yaitu kurang dari 100 meter berada pada daerah sekitar Puncak Gunung Pandan.



Gambar 11. Model batas lapisan hasil pemodelan inversi.

Berdasarkan hasil dari pemodelan inversi yang dikombinasikan dengan data formasi batuan dari peta geologi daerah Gunung Pandan, maka dibuat suatu model geologi yang dapat dilihat pada Gambar 12. Model

geologi pada Gambar 17 menunjukkan bahwa batuan terobosan (Qia) menerobos beberapa formasi batuan yang sudah ada mulai dari Formasi Kerek (Tmk), Formasi Kalibeng (Tmk), Formasi Klitik (Tpk), Formasi Sonde (Tpso), hingga Formasi Pucangan (Qtp), dengan posisi dari batuan terobosan ini terletak dibawah area puncak dari Gunung Pandan dan menerus ke arah Utara dari Puncak Gunung Pandan.



Gambar 12. Model geologi penampang A – A’ berdasarkan hasil inversi dan data dari Peta Geologi daerah Gunung Pandan.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada model yang dihasilkan dari proses pemodelan, dihasilkan pola model batas lapisan yang menyerupai bentuk intrusi. Pola tersebut diasumsikan sebagai intrusi andesitis. Intrusi terletak pada area puncak dari Gunung Pandan dan cenderung menerus ke Utara dengan kedalaman intrusi terdangkal kurang dari 100 meter. Intrusi ini kemungkinan menjadi sumber panas sistem geotermal di Gunung Pandan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Geofisika Eksplorasi yang telah menyediakan data untuk penelitian.

REFERENSI

1. Blakely, R J. (1996): Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge University Press, Cambridge.
2. Chai, T. dan Draxler, R.R. (2014): Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?- Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geoscientific Model Development*, 7, 1247 – 1250.

3. Lunt, P., R. Netherwood, dan O.F. Huffman (1998): Guide book of IPA field trip to Central Java. Indonesian Petroleum Association, Jakarta,. 65pp.
4. Nugraha, A. D., Shiddiqi, H. A., dan Widiyantoro, S. (2016): Unexpected earthquake of June 25th, 2015 in Madiun, East Java, *AIP Conference Proceeding*, **1730**, 020001.
5. Plouff, D. (1976): Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections, *Geophysics*, **41**, 727 – 741.
6. Pringgoprawiro, H. dan Sukido (1992): Peta Geologi lembar Bojonegoro, Jawa Timur, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
7. Santoso, D., Wahyudi, E. J., Alawiyah, S., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Kadir, W. G. A., Supendi, P., Wiyono, S., dan Zulfakriza. (2017): Subsurface structure interpretation beneath of Mt. Pandan based on gravity data, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **62**, 012038.
8. Setijadji, L. (2010): Segmented volcanic arc and its association with geothermal fields in Java Island, Indonesia, *Proceeding World Geothermal Congress*.
9. Smyth, H., Hall, R., Nichols, G. J. (2005): East Java: Cenozoic Basins, volcanoes, and ancient basement, *Indonesian Petroleum Association Annual Convention* , **30**, 251 – 266.
10. Tan, T.S., Phoon, K.K., Hight, D.W., dan Lerouiel, S. (2003): *Characterization and engineering properties of natural soils*, A.A. Balkema Publishers, Tokyo.
11. Telford, W.M., Geldart, L.P., dan Sheriff, R.E. (1990): *Applied geophysics second edition*, Cambridge University Press 1990, Cambridge.