

Aplikasi Transformasi *Reduction to Pole* (RTP) Menggunakan Matlab dalam Pengolahan Data Magnetik WDMAM pada Wilayah Tapal Kuda -Jawa Timur

Supriyadi*¹, Enjang Jaenal Mustopa², Wahyu Srigutomo³, Harry Mahardika⁴

^{1,2,3,4}Ifisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

e-mail: *supriyadi@unej.ac.id,

Abstract

In the magnetic method, the anomalous magnetic field is caused by a dipole magnetic field source. The magnetic anomaly map is complex and relatively challenging to read because each place has a different angle of inclination and declination. The use of a RTP filter is crucial to overcoming the difficulty in magnetic data interpretation. The RTP transformation has been successfully implemented and applied to the WDMAM magnetic data for Tapal Kuda Region-East Java, using the built-in Matlab algorithms. The RTP application in this region uses the values of the inclination angle $I = -32.82^\circ$ and the declination angle $D = 0.72^\circ$. According to the RTP results' magnetic anomaly, there has been a change in the magnetic field's range from (-345.51 nT to 282.30 nT) to (-975.37 nT to 782.38 nT). The locations of the closures of the positive and negative magnetic anomalies also changed. The middle to northern portions of the Tapal Kuda Region are dominated by a positive magnetic anomaly that is assumed to be related to the Quaternary Volcanic Zone. The positive anomaly closures moved toward the west, specifically toward Mount Bromo and Mount Argopuro. The Horseshoe Region's southern edge is dominated by a negative magnetic anomaly that is assumed to be associated with the Southern Mountain Zone. The negative anomaly closure also shifted location, to the southwest, approaching Mount Semeru.

Keywords : *magnetic method, RTP, built in matlab function, WDMAM data, Tapal Kuda region*

Abstrak

Dalam metode magnetik, medan magnet anomali disebabkan oleh sumber medan magnet dipol. Setiap tempat memiliki sudut inklinasi dan

deklinasi magnetik yang berbeda sehingga menyebabkan peta anomali magnetik bersifat kompleks dan interpretasinya menjadi relatif sulit. Untuk mengatasi kerumitan dalam interpretasi data magnetik, penggunaan transformasi reduksi ke kutub RTP sangat penting dilakukan. Tapis RTP dengan memanfaatkan fungsi-fungsi *built in* Matlab telah berhasil direalisasikan dan diaplikasikan pada data magnetik WDMAM wilayah Tapal Kuda-Jawa Timur. Nilai sudut inklinasi $I = -32.82^\circ$ dan sudut deklinasi $D = 0.72^\circ$ digunakan pada aplikasi RTP daerah ini. Anomali magnetik hasil RTP menunjukkan bahwa terjadi perubahan rentang nilai medan magnet yaitu dari -345.51 nT s.d 282.30 nT menjadi -975.37 nT s.d 782.38 nT. Selain itu, terjadi pergeseran lokasi klosur anomali magnetik positif dan negatif. Anomali magnetik positif mendominasi di bagian tengah sampai utara Wilayah Tapal Kuda dan diduga berkaitan dengan Zona Vulkanik Kuartir. Klosur-klosur anomali positif mengalami pergeseran letak ke barat di sekitar Gunung Bromo dan Gunung Argopuro. Anomali magnetik negatif mendominasi tepi selatan Wilayah Tapal Kuda dan diduga berkaitan dengan Zona Pegunungan Selatan. Klosur anomali negatif juga mengalami pergeseran letak yaitu ke barat daya mendekati gunung Semeru.

Kata Kunci: metode magnetik, transformasi RTP, fungsi *built in* Matlab, data WDMAM, Wilayah Tapal Kuda

PENDAHULUAN

Metode magnetik berkerja dengan memanfaatkan variasi intensitas magnetik di permukaan bumi yang disebabkan adanya variasi distribusi benda termagnetisasi (anomali) di bawah permukaan bumi. Metode ini digunakan untuk mengetahui struktur

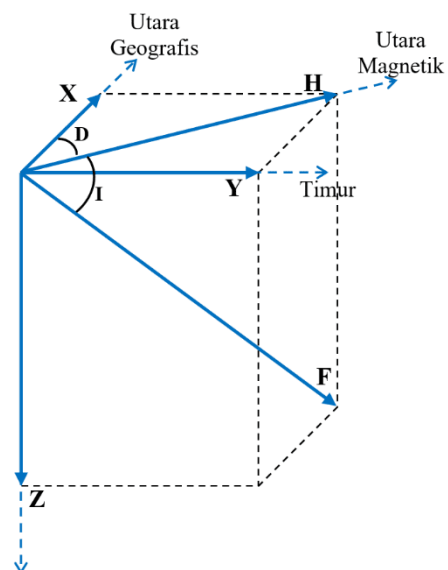
geologi bawah permukaan berdasarkan anomali medan magnetik. Akuisisi data metode ini relatif murah, mudah, dan cepat sehingga banyak dimanfaatkan dalam eksplorasi geofisika. Secara umum, survey magnetik bermanfaat untuk mengetahui kondisi bawah permukaan bumi, prospek benda arkeologi, menentukan lokasi target serta faktor lain yang mempengaruhi tingkat keekonomisan sumber daya alam seperti minyak bumi, geotermal dan mineral, eksplorasi mineral logam berdasarkan sifat suseptibilitasnya, eksplorasi geotermal, monitoring gunung api, dan sebagainya. Selain itu, metode magnetik juga digunakan untuk mengestimasi batas kedalaman anomali lokal dan anomali regional, serta persebaran nilai anomali lokal dan regional dengan memanfaatkan analisa *Fast Fourier Transform* (FFT).

Dalam proses akuisisi data, medan magnet yang terekam selama pengukuran adalah medan magnet total yang merupakan gabungan medan magnet utama bumi, medan magnet luar, dan medan magnet anomali. Medan magnet utama bumi diperoleh dari nilai rata-rata medan hasil pengukuran dalam jangka waktu yang cukup lama dan mencakup daerah dengan luas lebih dari 10^6 km². Medan magnet luar berasal dari hasil ionisasi akibat sinar ultraviolet matahari di atmosfer dengan perubahan terhadap waktu relatif jauh lebih cepat. Medan magnet anomali atau medan magnet lokal (*crustal field*) merupakan medan magnet yang bersumber dari batuan yang mengandung mineral magnetik yang berada di kerak bumi. Target pengukuran dalam survei magnetik adalah medan magnet anomali sehingga medan magnet utama bumi dan medan magnet luar dihilangkan melalui koreksi IGRF dan koreksi harian. Secara garis besar, medan magnet anomali disebabkan oleh sumber medan magnet dipol yaitu medan magnet remanen dan medan magnet induksi.

Medan magnet remanen berperan besar terhadap magnetisasi batuan yaitu menentukan arah dan besar medan magnetnya serta berkaitan juga dengan peristiwa kemagnetan yang terjadi sebelumnya sehingga sangat rumit untuk diteliti. Anomali magnetik yang diperoleh dari survei merupakan gabungan medan magnet remanen dan induksi.

Konsekuensinya jika arah medan magnet remanen sama dengan arah medan magnet induksi maka anomalnya bertambah besar, sebaliknya jika keduanya berlawanan arah maka anomali menjadi semakin kecil. Efek medan remanen dalam survei magnetik dapat diabaikan apabila anomali medan magnetik kurang dari 25 % medan magnet utama bumi (Telford et al., 1990). Tidak seperti anomali gravitasi yang secara langsung berkaitan dengan benda penyebab anomali, anomali magnetik secara umum tidak langsung berhubungan secara sederhana dengan benda penyebab anomali karena medan utama maupun magnetisasi benda/ induksi berarah vertikal (Yao & Mei-Ping, 2022). Karena sumber medan magnet berupa sumber dipol dan gabungan dari medan remanen dan induksi maka peta anomali magnetik bersifat kompleks dan interpretasinya menjadi relatif sulit.

Medan magnet hasil pengukuran di sembarang titik yaitu meliputi arah dan intensitas kemagnetannya dinyatakan dalam komponen-komponen medan magnet (Gambar 1).



Gambar 1 Komponen medan magnet terukur F (Telford et al., 1990)

Vektor medan magnet total hasil pengukuran menggunakan magnetometer modern dinyatakan dengan F , yang mempunyai komponen horizontal H , dan komponen vertikal Z . Hubungan antar komponen medan magnet dapat dinyatakan melalui persamaan (1-7).

$$Z = F \sin I \quad (1)$$

$$H = F \cos I \quad (2)$$

$$X = H \cos D \quad (3)$$

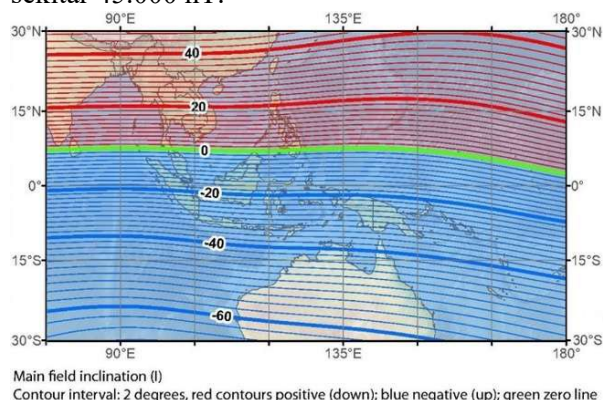
$$Y = H \sin D \quad (4)$$

$$F^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (5)$$

$$D = \arctan (Y/X) \quad (6)$$

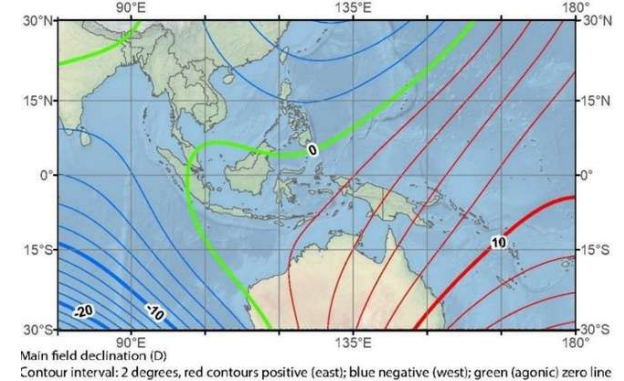
$$I = \arctan (Z/H) \quad (7)$$

Secara teori, medan magnetik dapat didekati dengan dipol magnetik yang terletak di pusat bumi, dengan sudut inklinasi sebesar 10° terhadap sumbu rotasi bumi. Pada permukaan bumi, sudut inklinasi I medan magnetik bervariasi dari $\pm 90^\circ$ di Kutub utara dan selatan, ke 0° di sekitar ekuator. Inklinasi bernilai positif berarti arah medan ke bawah (tanah) sementara negatif mengarah ke atas. Di belahan bumi selatan, termasuk di sebagian Indonesia, sudut inklinasinya negatif (Gambar 2a). Posisi kutub-kutub magnetik dan kutub-kutub geografis tidak berimpit, maka deklinasi D tidak nol dan inklinasi I tidak mengikuti garis lintang. Pola nilai sudut inklinasi dan deklinasi di Wilayah Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2a dan 2b, secara detail dapat diakses melalui portal <https://www.bmkg.go.id/geofisika-potensial/kalkulator-magnet-bumi.bmkg>. Medan magnet total (TMI) pada permukaan bumi memiliki besar bervariasi antara 22.000 nT di dekat ekuator hingga 67.000 nT di dekat kutub utara atau kutub selatan (British Geological Survey, 2022). Di Pulau Jawa, Indonesia, besar nilai magnetik normal adalah sekitar 45.000 nT.



(a)

Aplikasi Transformasi Reduction to Pole (RTP)



(b)

Gambar 2 (a) Peta inklinasi, (b) Peta deklinasi medan magnet utama bumi di sekitar Wilayah Indonesia (NOAA/NCEI and CIRES, 2019b; NOAA/NCEI and CIRES, 2019a)

Untuk mengatasi kerumitan dalam interpretasi data magnetik, penapisan (*filtering*) dalam domain frekuensi dan domain spasial sangat penting dilakukan. Prosedur penapisan dapat dilakukan dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) dalam domain waktu atau konvolusi dalam domain spasial. Tahapan penapisan domain frekuensi mencakup konversi data ke dalam domain frekuensi, melakukan operasi pada data menggunakan tapis tertentu dan kemudian mentransformasikan kembali data ke dalam domain spasial (Özgül Arısoy & Dikmen, 2011). Tapis yang sering digunakan antara lain reduksi ke kutub, transformasi pseudogravity, kontinuasi analitik, tapis derivatif dan sebagainya. Paket perangkat lunak komersial biasa digunakan dalam keperluan praktis penapisan misalnya geosoft Oasis Montaj, magpick, surfer, dan sebagainya.

Transformasi *Reduction to Pole* (RTP) merupakan salah satu transformasi yang sering digunakan dan menjadi standar pemrosesan data dalam proses interpretasi data magnetik (Cooper & Cowan, 2008), terutama pada wilayah lintang sedang dan lintang rendah. Transformasi ini dilakukannya karena adanya perbedaan nilai inklinasi dan deklinasi dari setiap daerah, sehingga medan magnet di tempat yang diteliti perlu ditransformasikan menjadi medan magnet di kutub Utara magnetik bumi (Luo dan Xue, 2009; Zhang dkk., 2014). Dengan menggunakan transformasi reduksi ke kutub ini, dapat diasumsikan bahwa pada seluruh lokasi pengambilan data, nilai medan

magnet utama dan magnetisasinya mempunyai nilai dan arah yang tetap. Asumsi ini berlaku jika luas lokasi penelitian relatif sempit. Asumsi ini kurang valid untuk daerah penelitian yang sangat luas karena melibatkan nilai lintang dan bujur yang bervariasi dimana medan magnet utama dan magnetisasi berubah secara bertahap (Yao & Mei-Ping, 2022). Dalam prakteknya, bentuk dan posisi dari nilai maksimum dan minimum anomali magnetik bergantung pada sudut inklinasi dan deklinasi. Data anomali medan magnet direduksi ke kutub agar anomali medan magnet maksimum dan minimum tersebut terletak tepat diatas tubuh benda penyebab anomali (Nuamah dkk., 2021; Guo dkk., 2022). Secara matematis, transformasi reduksi ke kutub dilakukan dengan cara membuat sudut inklinasi menjadi 90° dan deklinasi 0° melalui proses transformasi. Hasil transformasi ini adalah anomali magnetik dari sumber monopol dengan asumsi termagnetisasi dalam arah vertikal (Guo dkk., 2013).

RTP terhadap data magnetik dapat dilakukan baik dalam domain spasial maupun domain frekuensi. Pengembangan terkini RTP dalam domain waktu dilakukan oleh Luo dkk. (2010) yang mengusulkan teknologi iteratif. RTP dalam domain spasial mempunyai presisi yang tinggi tetapi membutuhkan perhitungan yang rumit dan sumber daya komputer yang besar sehingga dipilih alternatif lain yaitu RTP dalam domain frekuensi. Tapis RTP dalam domain frekuensi pertama kali dikembangkan oleh Bhattacharyya (1965) yang merubah operasi konvolusi rumit dalam domain spasial menjadi perkalian perkalian sederhana menggunakan transformasi Fourier. Anasewich dan Agarwal (1970) mengusulkan penggunaan FFT dalam data magnetik, yang direalisasikan dan dikembangkan lagi oleh Ervin (1976) menjadi lebih efisien. Prinsip yang sederhana dan perhitungan yang cepat menjadikan RTP dalam domain frekuensi menjadi metode transformasi data magnetik yang penting dan digunakan sampai sekarang.

Data anomali magnetik dalam domain spasial ditransformasi menggunakan FFT menjadi domain frekuensi $T(k_x, k_y)$, dimana k_x dan k_y adalah bilangan gelombang dalam arah x dan y . Transformasi RTP dalam domain frekuensi mempunyai bentuk

$$T_P(k_x, k_y) = S_P(k_x, k_y) T(k_x, k_y) \quad (8)$$

yaitu perkalian antara anomali magnetik dengan fungsi transfer dari operator reduksi ke kutub RTP $S_P(k_x, k_y)$. Fungsi transfer sendiri didefinisikan sebagai

$$S_P(k_x, k_y) = \frac{(k_x^2 + k_y^2)}{(N(k_x^2 + k_y^2)^{1/2} + i(Lk_x + Mk_y))^2} \quad (9)$$

L , M , dan N bergantung pada sudut deklinasi D dan inklinasi I sebagai

$$L = \cos I \cos D \quad (10)$$

$$M = \cos I \sin D \quad (11)$$

$$N = \sin D \quad (12)$$

(Blakely, 1996; Ferreira dan Shukowsky, 2013; Zhang dkk., 2014; Zhang dkk., 2018; Nuamah dkk., 2021). Medan magnet hasil reduksi ke kutub dalam domain spasial diperoleh dengan transformasi balik data yang telah tertapis yaitu dengan invers transformasi Fourier.

Hal yang menjadi perhatian dalam penggunaan operator reduksi ke kutub diatas (persamaan 9) adalah permasalahan singularitas pada lintang rendah dengan nilai sudut inklinasi $< 20^\circ$ (Gambar 2a) sehingga membutuhkan penanganan/ teknik numerik khusus (Rajagopalan, 2003; Li, 2008; Luo dan Xue, 2009; Guo dkk., 2013; Melo dan Barbosa, 2019). Sebagaimana nampak pada Gambar 2a, sebagian besar Wilayah Indonesia memiliki sudut inklinasi $> 20^\circ$ sehingga RTP masih stabil dan sering digunakan dalam interpretasi data anomali magnetik. Setelah melalui proses transformasi RTP, data anomali magnetik dapat diinterpretasi secara langsung atau diolah lebih lanjut menggunakan berbagai perangkat analisa data magnetik seperti pemodelan, derivatif medan magnet arah horizontal dan vertikal dan sebagainya.

Tapal Kuda merupakan nama wilayah bagian timur dari Provinsi Jawa Timur yang yang terdiri dari 7 Kabupaten yaitu Pasuruan (bagian timur), Probolinggo, Lumajang, Jember, Situbondo, Bondowoso, dan Banyuwangi (Balai Bahasa Jawa Timur, 2021; Taslim dkk., 2019). Secara geografis, di Wilayah Tapal Kuda terdapat tiga pegunungan besar yaitu Pegunungan Bromo-Tengger-Semeru, Pegunungan Iyang, dan Pegunungan Raung-Ijen. Di pegunungan tersebut, banyak

terdapat gunung berapi aktif yang sering terjadi aktivitas vulkanik terutama yaitu Gunung Semeru, Gunung Bromo, Gunung Raung, dan Gunung Ijen. Berdasarkan peta fisiografi daerah Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949), diketahui bahwa Wilayah Tapal Kuda mempunyai stratigrafi yaitu Zona Pengunungan Selatan dan Zona Vulkanik Kuarter/ Zona Solo. Zona Pengunungan Selatan didominasi oleh batuan siliklastik, vulkaniklastik, vulkanik, dan batuan karbonat sedangkan zona gunung api kuarter berupa pegunungan aktif. Kondisi geografis dan geologi Wilayah Tapal Kuda -Jawa Timur ini menarik untuk dipelajari dengan memanfaatkan data magnetik WDMAM dan pengolahan data menggunakan tapis RTP menggunakan fungsi *built in* Matlab. Harapannya hasil penelitian ini dapat dikaji lebih lanjut sekaligus memberi alternatif pengolahan data selain menggunakan perangkat lunak yang sudah ada.



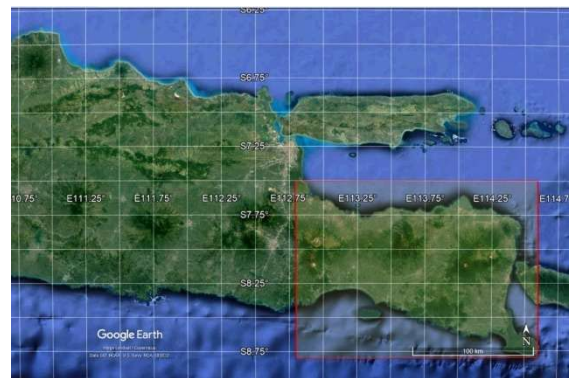
Gambar 3. Fisiografi daerah Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949)

METODE PENELITIAN

Data magnetik yang akan digunakan dalam studi ini adalah WDMAM yang dapat diunduh secara gratis melalui portal <http://wdmam.org/download.php>.

Data WDMAM merupakan data sintetik-kompilasi dengan spasi yang cukup lebar ~ 5 km sehingga penggunaan data ini terbatas untuk kajian analisis regional yang dalam hal ini diterapkan untuk Wilayah Tapal Kuda – Jawa Timur. Secara geologi, Wilayah Tapal Kuda terdiri dari Zona Pegunungan Selatan dan Zona Gunung Api Kuarter. Dengan melakukan pengolahan data magnetik berupa RTP menggunakan Matlab diharapkan dapat mengetahui struktur bawah permukaan Wilayah Tapal Kuda secara

Aplikasi Transformasi Reduction to Pole (RTP) kualitatif dan mengaitkannya dengan zona-zona geologi yang ada. Karena Wilayah Tapal Kuda bukan merupakan wilayah administratif, maka batas-batas koordinat ditentukan berdasarkan cakupan wilayah kabupaten yang termasuk dalam Wilayah Tapal Kuda yaitu Pasuruan (bagian timur), Probolinggo, Lumajang, Jember, Situbondo, Bondowoso, dan Banyuwangi (Balai Bahasa Jawa Timur, 2021; Taslim dkk., 2019). Batas-batas koordinat yang digunakan dalam studi ini sekaligus digunakan sebagai batasan dalam mengunduh data WDMAM adalah 7.5°-8.8° LS dan 112.8°-114.6° BT (Gambar 4).



Gambar 4. Batas koordinat Wilayah Tapal Kuda

Setelah berhasil mengunduh data magnetik WDMAM Wilayah Tapal Kuda, hanya 3 kolom pertama yang dimanfaatkan dan diolah lebih lanjut yaitu data lintang (kolom 1), data bujur (kolom 2), dan data anomali magnetik (kolom 3). Data anomali magnetik WDMAM merupakan data magnetik setara dengan data magnetik yang telah melalui serangkaian koreksi termasuk koreksi IGRF. Data koordinat (lintang dan bujur) dalam format desimal derajat sehingga harus dikonversi terlebih dahulu ke dalam UTM (*Universal Transverse Mercator*) untuk memudahkan pengolahan data lebih lanjut yaitu RTP menggunakan Matlab.

Transformasi reduksi ke kutub (RTP) pada data magnetik WDMAM dilakukan dengan memanfaatkan persamaan 8-13 yang ditulis dalam bahasa pemrograman Matlab 2022a 64 bit. Nilai sudut inklinasi I dan deklinasi D yang digunakan sebagai input dalam proses transformasi RTP dipilih pada koordinat tengah lokasi penelitian dengan asumsi mewakili nilai sudut inklinasi I dan deklinasi D pada lokasi tersebut. Nilai sudut inklinasi dan deklinasi diperoleh dari

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag.web.igrf/mm> atau <https://www.bmkg.go.id/geofisika-potensial/kalkulator-magnet-bumi.bmkg>.

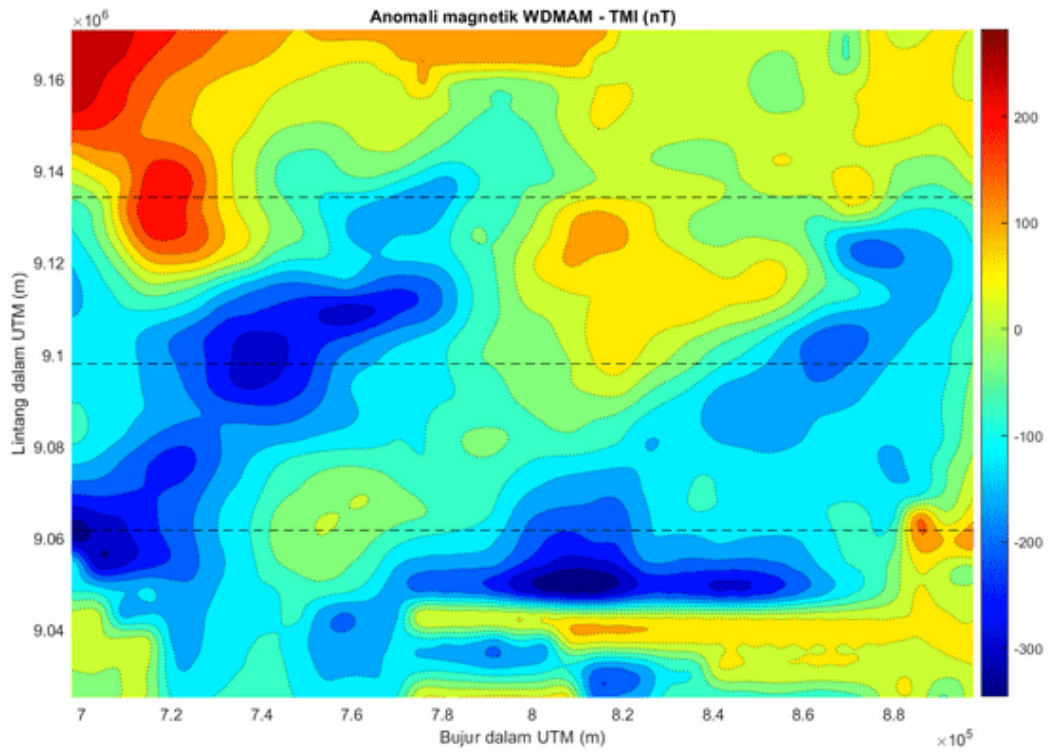
Dengan memasukkan koordinat yang mewakili Wilayah Tapal Kuda yaitu pada koordinat 8.15° LS, 113.7° BT diperoleh sudut inklinasi $I = -32.8233^{\circ}$ dan sudut deklinasi $D = 0.716328^{\circ}$. Data anomali magnetik WDMAM sebelum dan sesudah (hasil) RTP ditampilkan dalam bentuk kontur yang representatif. Kontur-kontur tersebut juga di-*overlay* dengan peta dari **google earth pro** untuk membantu analisa terkait Zona Vulkanik Kuartar dan Zona Pegunungan Selatan pada Wilayah Tapal Kuda. Untuk mengetahui pengaruh lebih detail akibat transformasi RTP, maka dibuat 3 sayatan sepanjang garis lintang tertentu sehingga diperoleh perbandingan profil anomali magnetik sebelum dan sesudah RTP.

HASIL DAN PEMBAHASAN

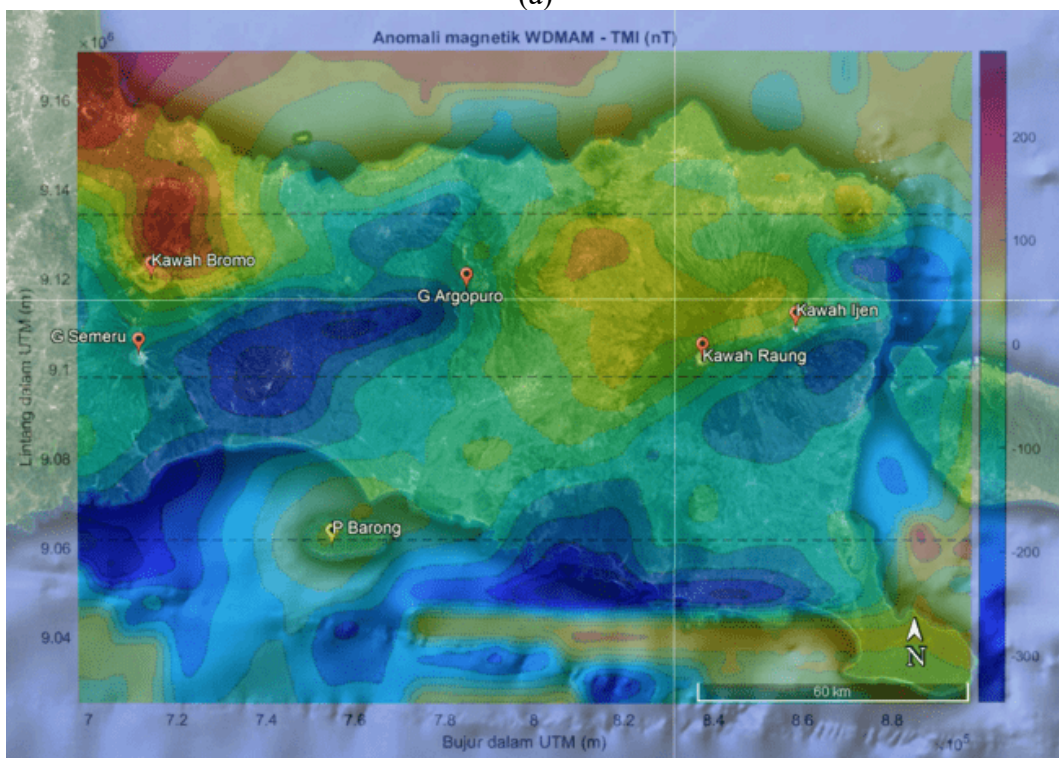
Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, transformasi reduksi ke kutub (RTP) merupakan operasi perkalian antara operator RTP dengan anomali medan magnet dalam domain frekuensi (persamaan 8). Secara spasial, setiap koordinat yang dinyatakan dengan lintang dan bujur tertentu mempunyai nilai anomali magnetik. Oleh karena itu, dibutuhkan operasi FFT 2 dimensi untuk merubah anomali magnetik dari domain spasial menjadi domain frekuensi yaitu menggunakan fungsi *built in* dalam Matlab “fft2”. Dalam operator RTP (persamaan 9), k_x dan k_y diperoleh dari $1/2 \times$ rata-rata selisih antar titik bujur dan lintang. Sedangkan pengaruh sudut

inklinasi dan deklinasi dalam operator RTP, diakomodasi dalam variabel L, M, dan N (persamaan 10, 11, dan 12). Jika sudut inklinasi semakin kecil maka nilai variabel N semakin kecil dan menyebabkan operator RTP mendekati singular. Pada Wilayah Tapal Kuda dengan nilai sudut inklinasi $I = -32.82^{\circ}$ dan sudut deklinasi $D = 0.72^{\circ}$, masih termasuk wilayah lintang sedang ($I > 20^{\circ}$) sehingga operator RTP stabil dan dapat digunakan tanpa harus menggunakan teknik numerik khusus. Untuk memperoleh anomali magnetik hasil RTP, maka hasil perkalian antara operator RTP dengan anomali medan magnet dalam domain frekuensi ditransformasi bali menjadi domain spasial menggunakan fungsi *built in* dalam Matlab “ifft2” (persamaan 13).

Data anomali magnetik WDMAM Wilayah Tapal Kuda (Gambar 5) mempunyai rentang antara -345.51 nT s.d 282.30 nT. Nilai anomali positif mendominasi bagian tengah hingga utara Wilayah Tapal Kuda (Gambar 5b). Klosur anomali magnetik positif berada di sekitar lereng utara Gunung Bromo, diantara lereng timur Gunung Agopuro sampai dengan lereng barat Dataran Tinggi Ijen. Sedangkan anomali negatif mendominasi bagian selatan Wilayah Tapal Kuda. Klosur anomali negatif mendominasi di Wilayah Kabupaten Lumajang, Wilayah Taman Nasional Meru Betiri (Jember-Banyuwangi) dan lereng timur dataran Tinggi Ijen. Klosur anomali positif menyisipi bagian selatan Wilayah Tapal Kuda yaitu di sekitar Pulau Nusa Barong dan di sepanjang selatan pantai Jember-Banyuwangi.



(a)



(b)

Gambar 5. Kontur anomali magnetik WDMAM pada Wilayah Tapal Kuda a) kontur anomali magnetik, b) overlay kontur anomali magnetik dengan topografi google earth.

Klosur-klosur tersebut, baik klosur anomali positif maupun klosur anomali negatif belum menunjukkan posisi sumber anomali karena

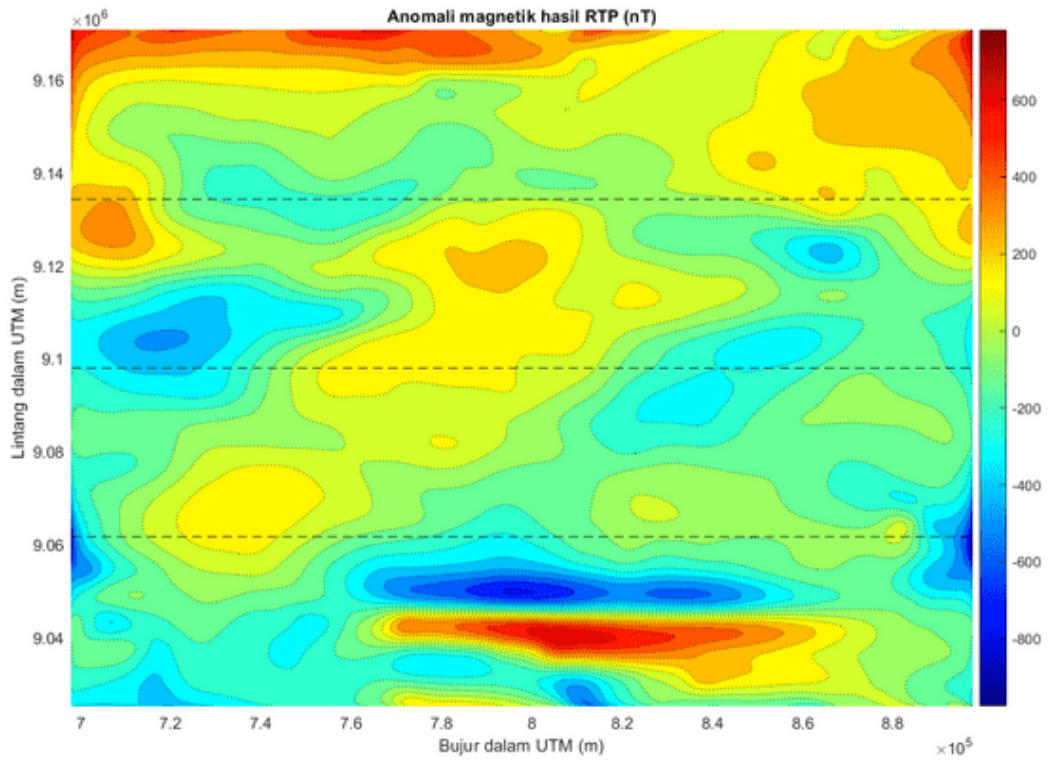
pengaruh sumber medan magnet dipol sehingga perlu dilakukan transformasi RTP.

Tujuan dilakukannya transformasi reduksi ke kutub (RTP) adalah untuk mengubah arah magnetisasi dan medan utama bumi dalam arah vertikal, sehingga posisi penyebab anomali tepat berada di bawah klosur utama. Kontur anomali magnetik WDMAM hasil RTP (Gambar 6) menunjukkan perubahan nilai medan magnet dan pergeseran letak klosur anomali positif dan negatif. Nilai anomali magnetik WDMAM hasil RTP mempunyai rentang antara -975.37 nT s.d 782.38 nT. Secara umum, anomali magnetik positif masih mendominasi bagian tengah hingga utara Wilayah Tapal Kuda dan sekitar Pegunungan Iyang (Gunung Argopuro) yang merupakan zona vulkanik kuarter. Klosur anomali positif berada di sebelah barat Gunung Bromo yang merupakan wilayah dataran tinggi, Gunung Argopuro, dan di sebelah barat Pulau Nusa Barong. Klosur-klosur anomali positif ini mengalami pergeseran lokasi dari posisi sebelum dilakukan RTP. Anomali magnetik hasil RTP di bagian selatan Wilayah Tapal Kuda secara umum lebih rendah dari bagian utara. Klosur anomali negatif terletak di sekitar Gunung Semeru, Gunung Raung, dan sebelah timur Dataran Tinggi Ijen. Pasangan klosur anomali positif dan negatif dengan lokasi relatif tetap teramati semakin jelas di sebelah selatan pantai daerah Taman Nasional Maeru Betiri.

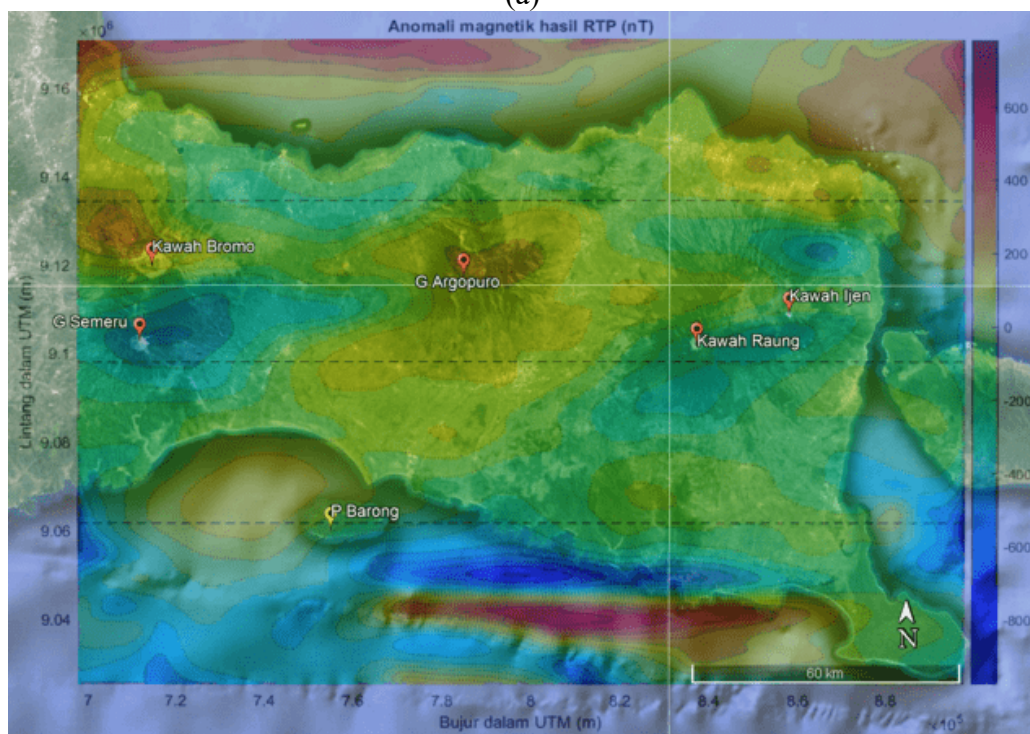
Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Junaidi (2016), anomali magnetik rendah/ negatif dengan nilai kurang dari -50 nT diasumsikan merupakan batuan vulkanik yang telah mengalami pelapukan masif seperti batuan breksi lapuk. Anomali magnetik tersebut teramati pada Gambar 6 mendominasi bagian selatan Wilayah Tapal Kuda yang disumsikan berasosiasi dengan Zona Pegunungan Selatan. Anomali magnetik menengah dengan nilai berkisar 0 nT sampai 300 nT diduga sebagai batuan vulkanik yang telah mengalami pelapukan sedang seperti batuan lava dan batuan andesit. Anomali

magnetik tinggi dengan nilai lebih besar dari 300 nT diduga sebagai defleksi dari batuan beku atau batuan vulkanik yang diperkirakan mempunyai hubungan erat dengan batuan intrusi yang bersifat magnetik sedang sampai kuat. Anomali magnetik menengah dan tinggi mendominasi bagian utara Wilayah Tapal Kuda yang diasumsikan berkaikan dengan Zona Vulkanik Kuarter. Hal tersebut juga dijelaskan pada penelitian Sartohadi dkk. (2014) bahwa material batuan Gunung Raung-Ijen dan Gunung Argopuro terdiri dari breksi, lava basal serta endapan lahar dan *tuff*. Sedangkan untuk Gunung Bromo-Tengger-Semeru terdiri dari material alluvial-vulkanik, lava andesit, basal, breksi andesit dan *tuff*.

Pada umumnya, interpretasi kuantitatif anomali medan magnet dilakukan dengan membuat model bawah permukaan bumi berdasarkan profil medan magnet yang melalui anomali positif dan negatif menggunakan aplikasi pemodelan 2D misalnya Mag2DC. Pada studi ini, profil anomali magnetik dibuat sejajar dengan garis dengan garis lintang yaitu pada lintang bawah ($y/4$), lintang tengah ($y/2$), dan lintang atas ($3y/4$) (Gambar 7). Pada ketiga profil anomali magnetik, nampak bahwa anomali magnetik WDMAM hasil RTP mempunyai rentang nilai lebih besar dan terjadi perubahan pola nilai anomali magnetik terutama pergeseran letak nilai maksimum dan minimumnya. Pada profil lintang bawah ($y/4$), nampak bahwa anomali positif bergeser secara signifikan semakin ke kiri (pada bujur semakin kecil) yang bersesuaian dengan pergeseran klosur positif dari sekitar pulau Nusa Barong sebelum RTP menjadi di sebelah baratnya setelah RTP. Pada profil lintang tengah ($y/2$), tampak dengan jelas pergeseran puncak anomali positif hasil RTP menjadi di sekitar Pegunungan Iyang-Argopuro. Hal serupa terjadi pada profil lintang atas dimana nampak 2 puncak anomali positif bergeser ke kiri (pada bujur semakin kecil).

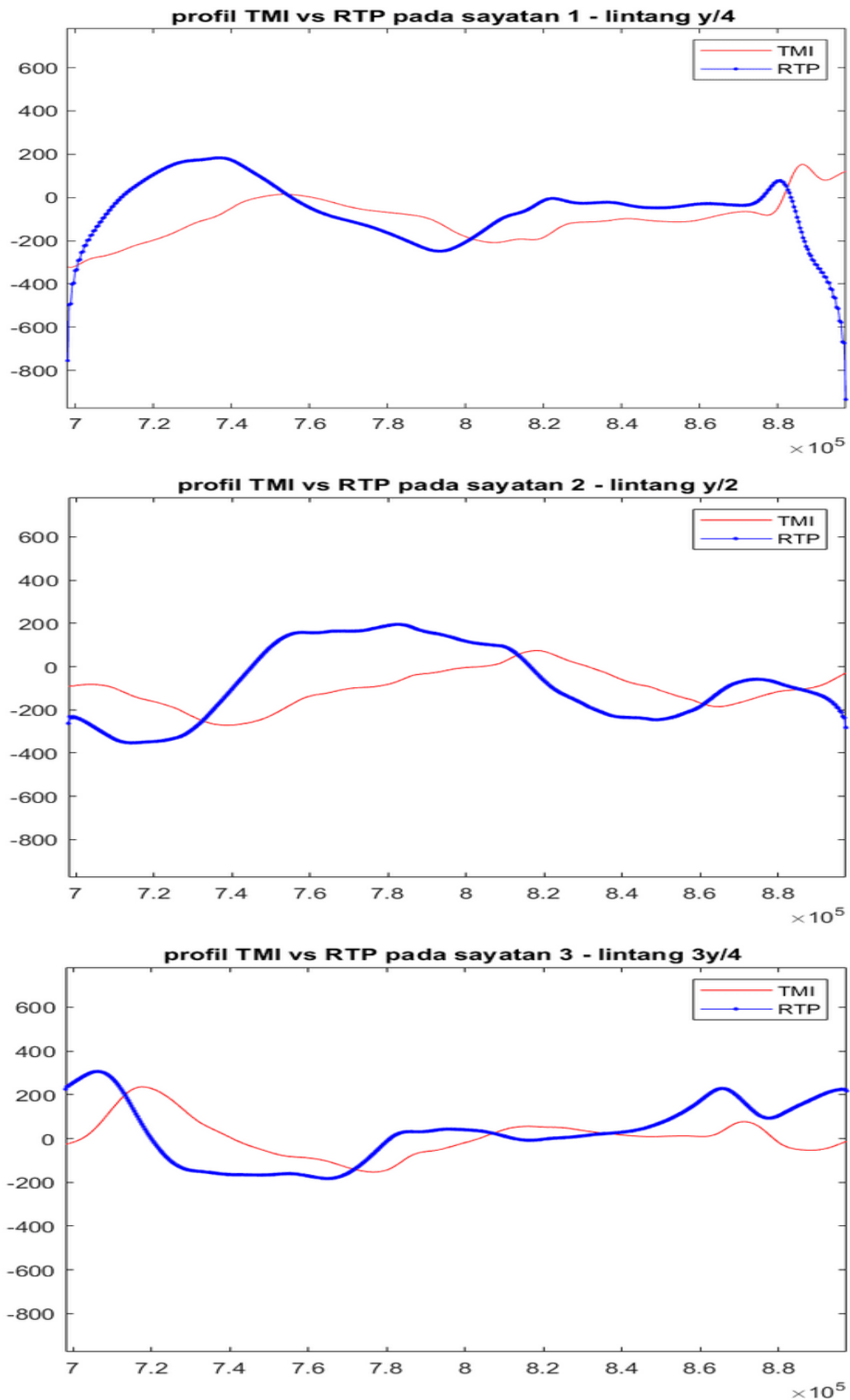


(a)



(b)

Gambar 6. Kontur anomali magnetik hasil RTP WDMAM menggunakan Matlab pada Wilayah Tapal Kuda a) kontur RTP, b) overlay kontur RTP dengan topografi google earth



Gambar 7. Profil anomali magnetik (TMI) dan hasil RTP menggunakan Matlab pada sayatan 1, 2, dan 3

KESIMPULAN DAN SARAN

Transformasi reduksi ke kutub (RTP) biasa digunakan dalam pengolahan data magnetik untuk menghilangkan efek dipol sumber. RTP berkerja berdasarkan prinsip perkalian anomali magnetik dengan operator RTP dalam domain frekuensi. Dalam studi ini, RTP telah dapat direalisasikan dengan menggunakan fungsi-fungsi *built in* Matlab dan diaplikasikan pada data magnetik WDMAM wilayah Tapal Kuda-Jawa Timur. Anomali magnetik hasil RTP menunjukkan bahwa terjadi perubahan rentang nilai medan magnet dan pergeseran letak klosur anomali positif dan negatif. Hasil RTP ini dapat digunakan untuk menjelaskan keterkaitan antara anomali magnetik dengan keberadaan Zona Pegunungan Selatan dan Zona Vulkanik Kuarter pada Wilayah Tapal Kuda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah mendanai studi S3.

DAFTAR PUSTAKA

- Balai Bahasa Jawa Timur. (2021). *Tapal Kuda*. <https://balaibahasajatim.kemdikbud.go.id/2021/01/28/tapal-kuda/>
- Bhattacharyya, B. K. (1965). Two-Dimensional Harmonic Analysis as a Tool For Magnetic Interpretation. *GEOPHYSICS*, 30(5), 829–857. <https://doi.org/10.1190/1.1439658>
- Blakely, R. . (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- BritishGeologicalSurvey. (2022). *The Earth's Magnetic Field: An Overview*. <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>
- Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2008). Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *GEOPHYSICS*, 73(3), H1–H4. <https://doi.org/10.1190/1.2837309>
- Ervin, C. P. (1976). Reduction to the magnetic pole using a fast fourier series algorithm. *Computers & Geosciences*, 2(2), 211–217. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(76\)90108-4](https://doi.org/10.1016/0098-3004(76)90108-4)
- Ferreira, W., & Shukowsky, W. (2013). Estimation of the total magnetization direction using Helbig's method: A *Aplikasi Transformasi Reduction to Pole (RTP) ... comparative study using the Reduction to the Pole operator. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013*, 492–497. <https://doi.org/10.1190/sbgf2013-104>
- Google Earth. 2022. Wilayah Tapal Kuda pada Google Earth. <https://earth.google.com>. Diakses pada tanggal 17 November 2022.
- Guo, H., Wang, M., Han, S., Chang, C., & Yao, Y. (2022). Reduction-to-the-pole method for aeromagnetic three-component data in different latitudes. *Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s11770-022-0978-7>
- Guo, L., Shi, L., & Meng, X. (2013). The antisymmetric factor method for magnetic reduction to the pole at low latitudes. *Journal of Applied Geophysics*, 92, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.018>
- Junaidi, A. (2016). *Pemetaan Struktur Bawah Permukaan Ranu Betok Gunung Lamongan Menggunakan Metode Magnetik* [Universitas Jember]. <http://repository.unej.ac.id/handle/123456789/78129>
- Kanasewich, E. R., & Agarwal, R. G. (1970). Analysis of combined gravity and magnetic fields in wave number domain. *Journal of Geophysical Research*, 75(29), 5702–5712. <https://doi.org/10.1029/JB075i029p05702>
- Li, X. (2008). Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge*, 27(8), 990–1002. <https://doi.org/10.1190/1.2967550>
- Luo, Y., & Xue, D.-J. (2009). Stable Reduction to the Pole at Low Magnetic Latitude by Probability Tomography. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4), 872–880. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1410>
- Luo, Y., Xue, D.-J., & Wang, M. (2010). Reduction to the Pole at the Geomagnetic Equator. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(6), 1082–1089. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1578>
- Melo, F., & Barbosa, V. (2019). Reduction to the pole in Fourier domain – good and bad filtering of real data in Brazil. *Proceedings of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society&Expogef*, 1–6.

- <https://doi.org/10.22564/16cisbgf2019.240>
- NOAA/NCEI and CIRES. (2019a). *US/UK World Magnetic Model - Epoch 2020.0 Main Field Declination (D)*. https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020_D_BoZ_MILL.pdf
- NOAA/NCEI and CIRES. (2019b). *US/UK World Magnetic Model - Epoch 2020.0 Main Field Inclination (I)*. https://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2020/WMM2020_I_BoZ_MILL.pdf
- Nuamah, D. O. B., Dobróka, M., Vass, P., & Baracza, M. K. (2021). Legendre polynomial-based robust Fourier transformation and its use in reduction to the pole of magnetic data. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(4), 645–666. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00357-1>
- Özgü Arısoy, M., & Dikmen, Ü. (2011). Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping. *Computers & Geosciences*, 37(7), 935–942. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.02.008>
- Rajagopalan, S. (2003). Analytic Signal vs. Reduction to Pole: Solutions for Low Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*, 34(4), 257–262. <https://doi.org/10.1071/EG03257>
- Sartohadi, J., Sianturi, R., Rahmadana, A., Maritimo, F., Wacano, D., Munawaroh, Suryani, T., & Pratiwi, E. (2014). *Bentang Sumberdaya Lahan Kawasan Gunungapi Ijen dan Sekitarnya*. Pustaka Pelajar.
- Taslim, R., Mandala, M., & Indarto, I. (2019). Pengaruh Luas Penggunaan Lahan Terhadap Laju Erosi: Studi Pada Beberapa Das Di Wilayah Tapal Kuda Jawa Timur (The effect of land use on erosion rate: a study at several watersheds in Tapal Kuda Region, East Java). *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, 3(2), 141–158. <https://doi.org/10.20886/jppdas.2019.3.2.141-158>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2 ed.). Cambridge University Press.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). The Geology of Indonesia. General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes. In *Government Printing Office, The Hague* (hal. 1–766).
- Yao, L., & Mei-Ping, W. (2022). Vector transformation and reduction to the pole for regional magnetic data with variable field direction. *Applied Geophysics*, 19(1), 107–116. <https://doi.org/10.1007/s11770-022-0929-3>
- Zhang, H., Marangoni, Y. R., Hu, X., & Zuo, R. (2014). NTRTP: A new reduction to the pole method at low latitudes via a nonlinear thresholding. *Journal of Applied Geophysics*, 111, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.010>
- Zhang, Q., Zhang, Y. T., Yin, G., & Li, Z. N. (2018). An improved frequency-domain algorithm for stable reduction to the pole at low latitudes. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(4), 1767–1782. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa227>