

POLA ANOMALI MAGNET RESIDUAL DARI APLIKASI METODE *TREND SURFACE ANALYSIS (TSA)*, HUBUNGANNYA DENGAN TATAAN GEOLOGI BAWAH DASAR LAUT DALAM PEMETAAN GEOLOGI KELAUTAN BERSISTEM DI PERAIRAN MANADO SULAWESI UTARA

D. Ilahude dan B. Nirwana

Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi Kelautan
Jl. Dr. Junjuna No. 236, Bandung-40174

Sari

Analisis intensitas magnet pada penerapan metode TSA menunjukkan nilai anomali sisa yang cukup signifikan dari pemisahan nilai anomali magnet total. Kontur anomali sisa yang dihasilkan dari nilai anomali regional orde ke 2, diduga berkaitan dengan struktur geologi yang berarah barat daya - timur laut.

Kata kunci : metode TSA, anomali sisa

Abstract

Analysis of magnetic intensity using a TSA method shows a significant value of residual anomaly from the separation of total magnetic anomaly value. Contour of the residual anomaly resulted from the 2nd order value of regional anomaly is assumed to be correlated with the geological structures of southwest-northeast directions.

Keyword: TSA method, residual anomaly

Pendahuluan

Informasi data geofisika, khususnya data magnet laut di perairan lepas pantai Manado dan sekitarnya, masih relatif minim. Penelitian geofisika khususnya metode magnet yang dilakukan oleh Puslitbang Geologi Kelautan (P3GL), di perairan ini berkontribusi sebagai data awal dan dapat mengetahui pola anomali magnet.

Penelitian ini meliputi perairan Manado dan Bitung Sulawesi Utara pada koordinat 124.5°00 – 126°BT dan 1°00'00" – 2°00'00" LU (Gambar 1). Dari peta hidrografi yang telah dipublikasikan, kedalaman laut daerah penelitian mencapai lebih dari 1000 m (Dishidros TNI-AL, 2006).

Penerapan metode magnet di perairan Manado tersebut dilakukan bersamaan dengan pengukuran kedalaman laut (pemeruman) secara kontinu dengan menggunakan kapal riset Geomarin I milik P3GL dengan mengambil titik pangkal (*base station*) di Pelabuhan Bitung sebagai awal lintasan survei.

Prinsip metode magnet berdasarkan pada induksi medan magnet utama dalam bumi, dan magnetisasi permanen umumnya mempunyai arah dan intensitas yang berbeda serta sebagian termagnetisasi sejak proses kristalisasi batuan.

Oleh sebab itu, nilai anomali magnet yang diperoleh merupakan gabungan dari keduanya atau hasil induksi murni. Jika arah medan magnet permanen sama dengan arah induksi medan magnet, maka anomali tersebut bertambah besar atau sebaliknya.

Analisis anomali magnet dalam tulisan ini lebih ditekankan pada pola anomali yang dihasilkan dari aplikasi metode *Trend Surface Analysis (TSA)* yang dapat menggambarkan pola anomali regional dan residual yang dipadukan dengan bentuk morfologi dasar lautnya.

Anomali magnet regional merupakan respons dari sumber anomali yang relatif dalam, sementara anomali magnet residual merupakan respons dari sumber anomali yang relatif dangkal. Dari anomali magnet regional dan residual tersebut diharapkan pola anomali yang dalam maupun yang dangkal bisa lebih terlihat.

Dengan menerapkan metode *Trend Surface Analysis (TSA)* dari hasil perhitungan intensitas magnet total maka diharapkan aplikasi metode tersebut dapat melihat pola anomali regional dan residual yang mungkin dapat melengkapi data hasil penafsiran pola struktur geologi di daerah penelitian. Metode ini adalah salah satu teknik matematika tertua yang telah digunakan oleh ahli geologi untuk melakukan penafsiran data geologi dan cadangan minyak (Wharton, 1993).

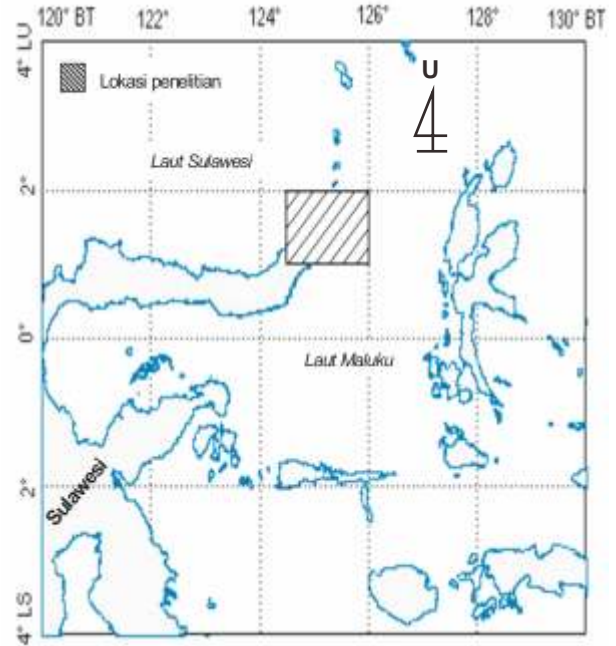
Persamaan polinomial linier dan resultan yang dihasilkan merupakan representasi grafis dari persamaan matematika (Davis, 1986). Metode matematis ini digunakan untuk memisahkan data yang direpresentasikan sebagai peta *trend* dan peta residual. Keluaran penerapan metode tersebut disajikan dalam peta kontur maupun dalam bentuk tiga dimensi (3-D).

Tujuan penelitian antara lain adalah untuk memetakan pola anomali magnet total di perairan Manado dan sekitarnya, serta untuk mengaplikasikan metode TSA untuk memperjelas bentuk anomali total yang diperoleh di sepanjang lintasan. Penerapan metode ini dimaksudkan untuk menggambarkan tataan pola anomali residual yang direduksi dari anomali total dan regional.

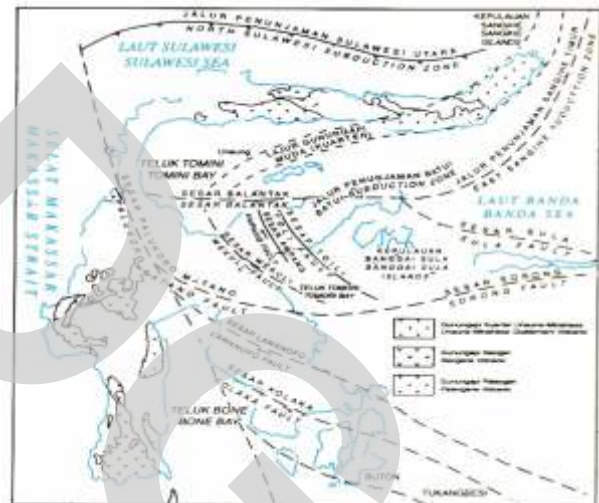
Geologi Regional

Daerah penelitian termasuk dalam jalur tektonik yang ditunjukkan oleh adanya jalur penunjaman ganda yaitu lajur Sulawesi Utara di bagian utara dan lajur tunjaman Sangihe Timur di sebelah timur dan selatan lengan utara, yang memanjang relatif timur laut – barat daya (Simanjuntak, 1986) (Gambar 2).

Daerah perairan bagian utara, timur dan tenggara Sulawesi Utara adalah bagian dari Indonesia bagian timur yang merupakan bagian dari pertemuan empat lempeng utama, yaitu lempeng Australia, Philipina, Pasifik, dan Asia, sehingga daerah tersebut merupakan zona struktur yang sangat kompleks (McCaffrey *et al.*, 1981). Ketidakstabilan yang dihasilkan lempeng pada sistem penunjaman (*trench-arc system*) mengakibatkan berhentinya subduksi pada zona tersebut sehingga terjadi pembentukan batuan *ultramafic* dan *melange* di bagian timur Sulawesi (Silver *et al.*, 1978; Hamilton, 1979). Jalur vulkanik yang berada di Sulawesi merupakan akibat



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian.



Gambar 2. Peta tektonik Pulau Sulawesi (Simanjuntak, 1986).

dari subduksi ke arah barat di bawah Pulau Sulawesi sebelum terbentuknya batuan *ultramafic* di bagian timur Sulawesi (McCaffrey *at al.*, 1981). Sementara di lengan utara dan selatan Sulawesi banyak terdapat gunung api aktif sebelum Miosen hingga Kuartar. Zona vulkanik ini memanjang ke utara hingga ke Sangihe yang merupakan zona tumbukan lempeng tepi barat Laut Maluku yang masih aktif (Sukamto, 1975). Diharapkan penerapan metode TSA akan memberikan gambaran struktur geologi di perairan Manado dan sekitarnya.

Metode Penelitian

Data intensitas magnet di laut diperoleh dengan menggunakan alat *marine magnetometer* sistem *geometrics* model G-877 dan proton *procession* model G-856. Perangkat sensor magnet ini ditarik di belakang kapal pada jarak tiga kali panjang kapal, sedangkan data kedalaman laut diperoleh dengan menggunakan alat gema suara (*echo-sounder*) model *Reson 420DS Navisound* sepanjang lintasan kapal. Sensor (*transducer*) alat ini ditempatkan di bagian kiri lambung kapal dengan posisi tenggelam (*draft*) 1,5 meter dari permukaan laut. Kedua alat ini dioperasikan secara bersamaan dengan kecepatan jelajah kapal rata-rata 6 knot. Untuk menentukan posisi pengambilan data di lapangan, digunakan sistem satelit navigasi terpadu dengan menggunakan satelit *DGPS Receiver Model C-Nav*. Data ini diterima setiap dua detik dan diproses secara digital menggunakan fasilitas program *Hypack Software*.

Untuk mendapatkan nilai anomali magnet maka dilakukan reduksi efek intensitas magnetik yang ditimbulkan oleh medan magnet bumi. Besarnya intensitas magnetik terukur (*M-obs*) dikoreksi terhadap datum kemagnetan global (*International Geomagnetic Reference Field / IGRF*, tahun 2000) yang dipublikasikan oleh IAGA (2000), dan intensitas magnet variasi harian (*vh*), sehingga diperoleh nilai anomali magnet total dalam satuan nano Tesla (nT).

Hasil koreksi IGRF dan variasi harian ini disebut sebagai anomali magnet total dengan rumusan sebagai berikut :

$$DT = T_{obs} - DT_{vh} - T_{IGRF} \dots\dots\dots (1)$$

- DT : anomali magnet total
- T_{obs} : intensitas magnet hasil pengamatan
- DT_{vh} : intensitas magnet variasi harian
- T_{IGRF} : intensitas medan magnet utama bumi (IGRF)

Dari data anomali magnet total dilakukan perhitungan dalam bentuk matriks untuk mendapatkan anomali magnet regional dengan menggunakan metode *Trend Surface Analysis* (TSA) yang diformulasikan oleh Grant (1967) dengan bilangan *polynomial* sebagai berikut :

$$Y = f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \dots\dots a_{n-1} x^{n-1} + a_n x^n \dots\dots\dots (2)$$

- y = fungsi dari anomali magnet regional
- x = fungsi dari posisi
- $a_0..a_n$ = koefisien kurva TSA
- n = orde

Sementara data kedalaman laut yang diperoleh direkam secara otomatis dan tersimpan dalam komputer. Data ini setelah dikoreksi terhadap posisi *draft* kapal, kemudian diplot ke dalam sistem koordinat geografis dan disajikan dalam bentuk peta dan dalam bentuk tiga dimensi yang memperlihatkan morfologi dasar laut.

Hasil dan Pembahasan

Pemeruman

Kondisi dasar laut di perairan ini umumnya bergelombang terjal dengan kedalaman laut semakin bertambah ke arah timur dan barat laut.

Di lepas pantai perairan Pulau Lembeh, yang berjarak lebih kurang 20 km ke arah timur, kedalaman laut mencapai 2000 sampai 3000 m, membentuk alur (parit) dan memanjang timur laut – barat daya. Hasil rekaman *echosounder* di perairan Sulawesi Utara dan sekitarnya sangat kontras antara perairan dangkal yang diberi warna merah dan perairan dalam yang diberi warna hijau hingga biru. Di bagian barat laut Manado kedalaman laut antara 200 sampai 1400 m. Di bagian barat Pulau Manadotua, dijumpai morfologi dasar laut yang sangat curam dengan kedalaman laut mencapai 4000 m. Morfologi dasar laut tersebut mencerminkan tataan geologi bawah permukaan dasar laut yang diduga berkaitan dengan jalur penunjaman ganda yang menempati bagian utara lengan Sulawesi Utara dan bagian tenggara lengan Sulawesi Utara.

Magnet

Hasil pengukuran hasil lapangan merupakan data medan magnet total yang masih dipengaruhi oleh komponen medan magnet luar. Pengaruh ini antara lain disebabkan oleh medan magnet yang berasal dari pergerakan bulan, sehingga data anomali total yang diperoleh perlu dikoreksi dengan fluktuasi

medan magnet variasi harian. Dalam penelitian ini lintasan penelitian diambil arah barat-timur, dengan lintasan *crosscheck* diagonal barat daya-timur laut dan barat laut - tenggara serta utara-selatan.

Analisis anomali magnet ini dilakukan dengan menggunakan formulasi *DT* untuk mendapatkan nilai anomali total, sedangkan untuk analisis anomali regional diperoleh dengan menggunakan metode TSA. Sementara anomali residual diperoleh dari reduksi terhadap nilai anomali total pada seluruh lintasan.

Dari hasil anomali magnet residual tersebut dibuat model tiga dimensi, kemudian dipadukan (*dioverlay*) dengan peta batimetri atau morfologi dasar lautnya untuk melihat pola (*trend*) anomali magnet residual yang berada di perairan Manado dan sekitarnya.

Anomali Magnet Total

Anomali magnet total diperoleh setelah dikoreksi terhadap *IGRF* dan intensitas magnet variasi harian (*vh*). Kontur anomali ini kemudian dipadukan dengan data kontur batimetri (Gambar 3). Dari sebaran intensitas magnet total tersebut diperoleh nilai anomalnya yaitu antara -260 nT sampai dengan 141,77 nT. Secara garis besar, anomali magnet relatif tinggi terdapat di bagian timur laut daerah penelitian dan sebagian juga terdapat di bagian barat laut, sedangkan anomali relatif rendah terdapat di bagian tengah hingga ke timur daerah penelitian dan sebagian tersebar di bagian tenggaranya.

Peta kontur anomali magnet total yang diperoleh merupakan resultan dari komponen intensitas magnet yang diduga berkaitan dengan batuan beku atau batuan dasar yang mengandung kemagnetan (*susceptibilitas*) yang tinggi maupun rendah.

Distribusi anomali magnet total ini dibagi kedalam empat kelompok anomali, yaitu anomali positif mulai dari nilai 20 sampai dengan 160 nT (warna merah), anomali peralihan antara -20 hingga + 20 nT (warna kuning), anomali negatif antara - 20 hingga -120 nT (warna hijau), dan anomali negatif antara -120 hingga - 260 nT (warna biru). Dari aplikasi metode TSA ini terdapat anomali relatif tinggi (positif) yang berada di sebelah barat laut dan timur laut daerah penelitian yang ditandai dengan notasi merah. Anomali ini diduga berkaitan dengan kondisi struktur geologi di daerah tersebut dan adanya pengaruh batuan magnetik yang berasal dari batuan gunung api yang mendominasi daerah penelitian. Anomali

magnet (notasi kuning) yang tersebar di bagian timur dan tenggara ditafsirkan sebagai bidang batas batuan magnetik dan non magnetik, sedangkan anomali rendah (negatif) membentuk bulatan besar di sebelah timur dan tenggara ditafsirkan sebagai batuan yang bersifat nonmagnetik.

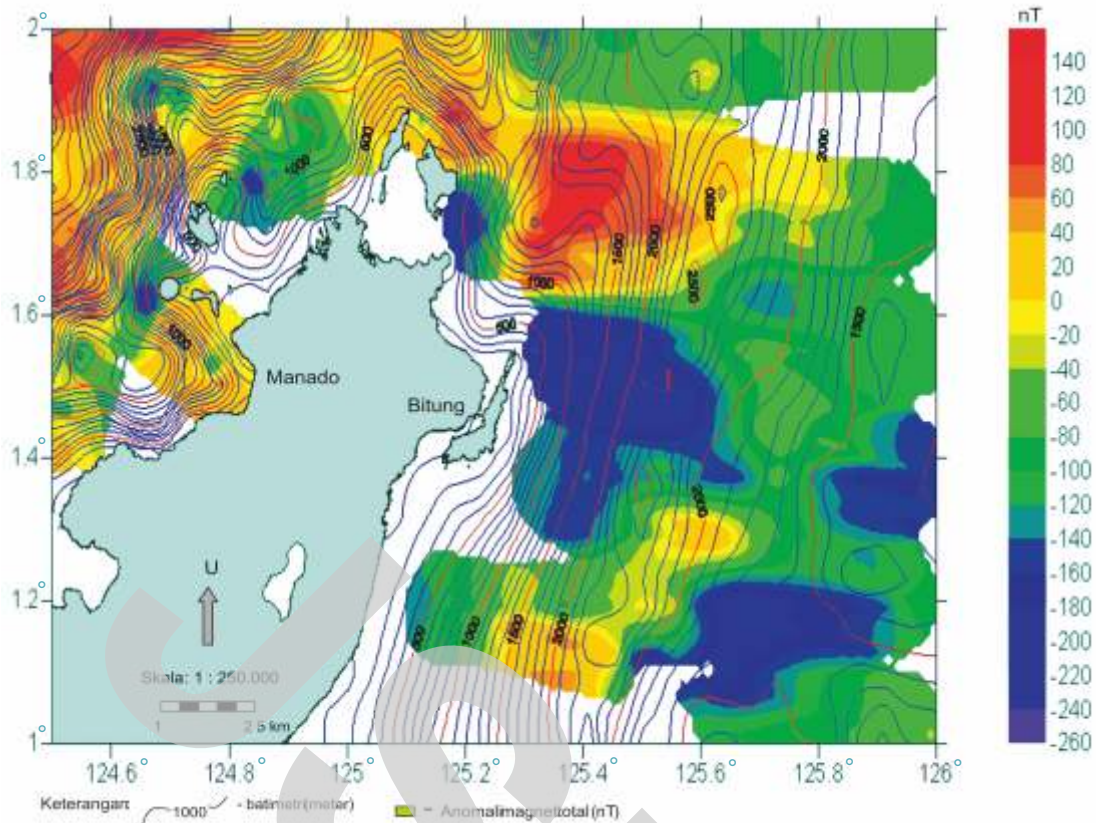
Anomali Magnet Regional

Untuk mendapatkan anomali regional maka diterapkan orde ke-2 pada formulasi TSA dengan mensubstitusikan nilai anomali magnet total di semua lintasan magnet. Hasil pemisahan dengan metode TSA orde ke-2 tersebut menghasilkan anomali regional, kemudian pola anomali ini dipadukan dengan data batimetri yang dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini (Gambar 4).

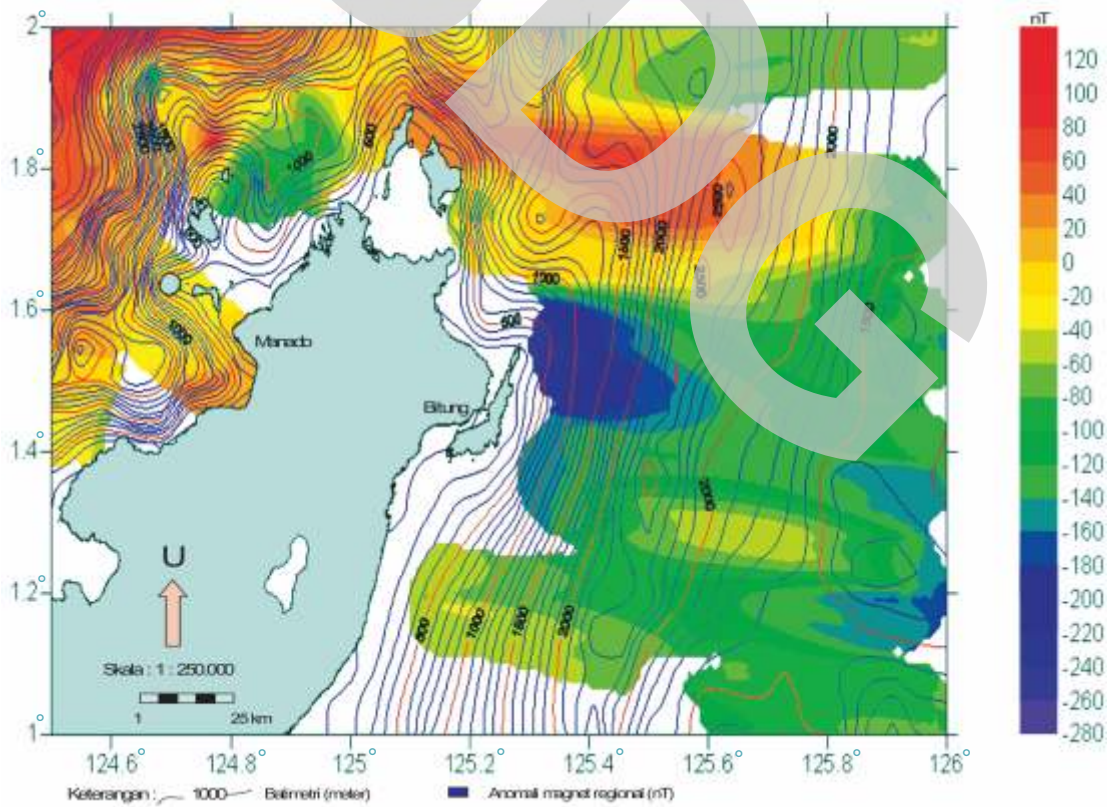
Distribusi anomali regional tersebut dibagi kedalam empat kelompok anomali yakni anomali positif mulai dari nilai 20 hingga 140 nT (warna merah), anomali peralihan antara - 40 hingga + 20 nT (warna kuning), anomali negatif antara - 40 hingga -140 nT (warna hijau) dan anomali negatif antara - 140 hingga - 280 nT (warna biru). Secara umum, pola anomali regional mempunyai banyak kemiripan dengan pola anomali total. Oleh karena itu, secara garis besar penafsiran anomali regional ini paling tidak, hampir sama dengan anomali total.

Anomali Magnet Residual (Sisa)

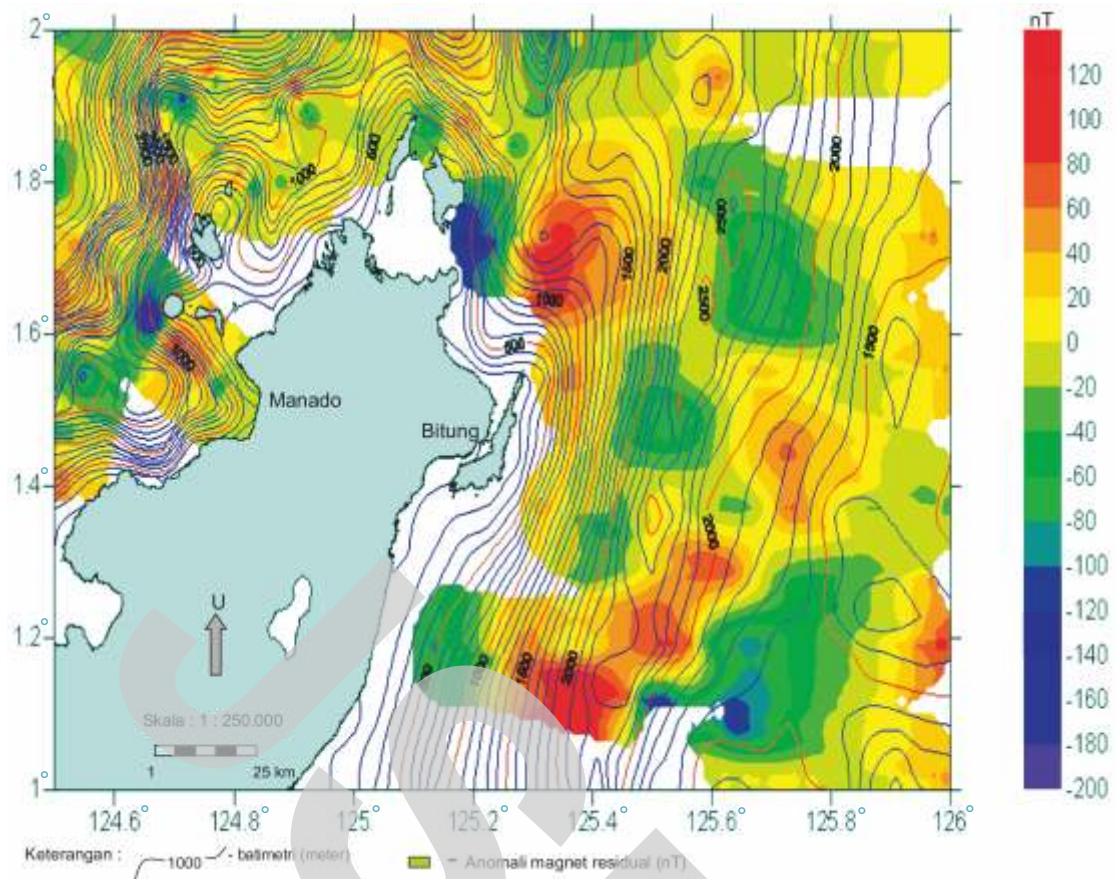
Untuk mendapatkan anomali residual dilakukan reduksi nilai anomali total terhadap anomali regional. Dari hasil reduksi tersebut diperoleh distribusi anomali magnet residual yang dapat dibagi kedalam empat kelompok anomali, yakni positif berkisar antara +20 hingga +140 nT (warna merah), anomali positif antara 0 hingga + 20 nT (warna kuning), anomali negatif antara 0 hingga -80 nT (warna hijau), dan anomali negatif antara - 80 hingga - 200 nT warna biru (Gambar 5). Secara umum, pola anomali residual ini di beberapa tempat memperlihatkan banyak kemiripan dengan pola morfologi dasar lautnya (Gambar 6). Hal ini karena anomali residual merupakan cerminan sumber anomali yang relatif dangkal. Akan tetapi di bagian tenggara daerah penelitian terdapat anomali positif relatif tinggi pada daerah morfologi cekung yang memanjang dari timur laut-barat daya.



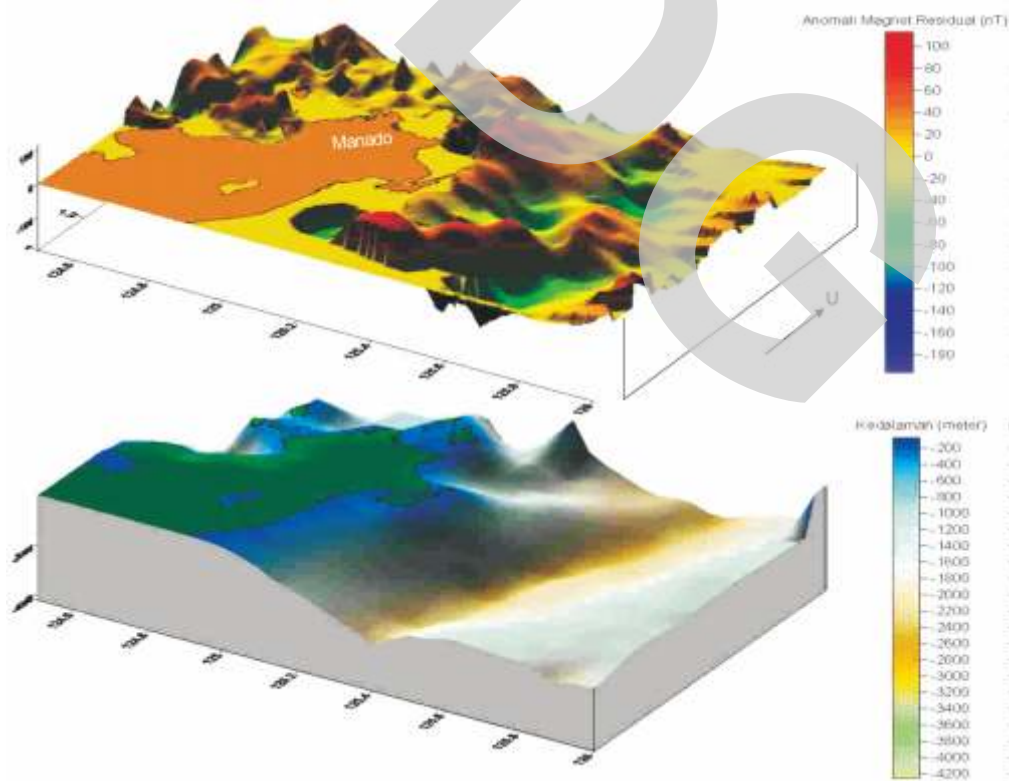
Gambar 3. Anomali magnet total daerah perairan Manado dipadukan dengan peta batimetri.



Gambar 4. Anomali magnet regional daerah perairan Manado dipadukan dengan peta batimetri.



Gambar 5. Anomali magnet *residual* daerah perairan Manado dipadukan dengan peta batimetri.



Gambar 6. Model tiga dimensi anomali magnet *residual* daerah perairan Manado (atas) disejajarkan dengan pola morfologi dasar laut (bawah).

Diperkirakan anomali relatif tinggi di bagian tenggara berkaitan dengan efek polarisasi batuan bersifat magnetik yang mengalami deformasi akibat struktur geologi di daerah tersebut. Sementara anomali relatif rendah (negatif) yang mempunyai sedikit kesesuaian dengan pola morfologi dasar lautnya, diperkirakan relatif kecil mengalami deformasi. Anomali relatif tinggi tersebut tidak menutup kemungkinan disebabkan oleh pengaruh batuan magnetik batuan gunung api yang mendominasi daerah sekitarnya. Demikian juga anomali yang membentuk bulatan-bulatan yang tersebar di sebelah timur dan timur laut daerah penelitian, diduga merupakan pengaruh batuan beku yang bersifat magnetik yang terdapat di daerah tersebut. Sementara nilai anomali magnet (negatif) dengan notasi warna hijau hingga biru yang membentuk bulatan kecil di bagian barat, tenggara dan timur laut daerah penelitian, diduga merupakan batuan sedimen yang bersifat nonmagnetik yang merupakan batuan pada kedalaman relatif dangkal (Gambar 5).

Dari sebaran nilai anomali residual tersebut diperoleh gambaran bahwa nilai anomali yang menempati bagian timur, tenggara, dan barat daerah penelitian dengan notasi warna kuning hingga warna merah, mencerminkan pola kemagnetan batuan beku yang mempunyai sifat kemagnetan (*susceptibility*) yang tinggi. Diperkirakan sebaran anomali positif tersebut berasosiasi dengan batuan gunung api yang mendominasi daerah penelitian serta kondisi struktur geologi di daerah tersebut. Sementara itu anomali negatif di bagian barat, utara dan tenggara daerah penelitian (warna biru), diperkirakan batuan penyusunnya terdiri atas batuan sedimen yang mempunyai sifat kemagnetan yang rendah. Kemungkinan lain adalah sifat kemagnetan yang relatif rendah tersebut disebabkan oleh batuan beku yang bersifat asam atau batuan malihan yang mempunyai sifat kerentanan magnet yang sedang hingga rendah. Dari bentuk morfologi dasar laut terlihat bahwa daerah yang mempunyai anomali negatif berada pada cekungan morfologi bagian tenggara, ujung utara Sulawesi Utara dan bagian barat Manado (Gambar 6). Sementara anomali positif di bagian tenggara (notasi kuning-merah) terlihat membentuk pola liniasi dengan arah barat daya-timur laut yang diduga berhubungan dengan tataan geologi Sulawesi Utara bagian timur.

Demikian juga anomali negatif (hijau - biru) membentuk pola liniasi dengan arah yang sama dengan anomali positif (kuning-merah). Dari penerapan metode TSA tersebut, pola anomali magnet residual dalam bentuk tiga dimensi mencerminkan pola kemagnetan dari batuan dasar yang mengalami imbasan magnet yang berkaitan dengan struktur geologi bawah permukaan dasar laut yang berarah barat daya-timur laut.

Kesimpulan

Aplikasi metode TSA menghasilkan bentuk anomali magnet yang cukup signifikan yang diduga berkaitan dengan struktur geologi bawah permukaan dasar laut. Anomali magnet residual memisahkan sumber penyebab anomali yang berada pada lapisan yang dalam, sedangkan anomali magnet yang tinggi dengan dimensi yang besar diperlihatkan pada anomali magnet total dan anomali regional. Anomali positif yang terdapat di bagian barat laut daerah penelitian, diduga disebabkan oleh batuan gunung api yang mendominasi daerah tersebut. Anomali residual positif merupakan sumber anomali yang relatif dangkal yang berasosiasi dengan sifat kemagnetan batuan yang tinggi di bagian timur laut dan tenggara serta tataan geologi di daerah penelitian. Di bagian barat laut, utara dan tenggara daerah penelitian terdapat anomali residual negatif. Anomali ini diduga disebabkan oleh batuan dengan sifat kerentanan magnet yang rendah. Sementara anomali residual dengan notasi (kuning-merah) yang memanjang relatif berarah barat daya-timur laut, menunjukkan kelurusan struktur yang diperkirakan berhubungan dengan jalur penunjaman ganda yang berarah relatif barat daya-timur laut di daerah tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada rekan-rekan yang tergabung dalam kerja sama penelitian dan juga kepada Kepala Puslitbang Geologi Kelautan Ir. Subaktian Lubis, M.Sc. atas izin dan dukungannya dalam penerbitan makalah ini.

ACUAN

Davis, JC 1986. Statistics and Data Analysis in Geology.

Dishidros, TNI-AL, 2006. *Peta Hidrografi Lembar 366 Skala 1 : 50.000*, Jakarta.

Grant, F.A., 1967. A problem in the analysis of geophysical data *Journal Geophysics*, 22, 309-344.

Hamilton, W., 1979. Tectonics of the Indonesian region. U.S. *Geo. Surv. Proc. Paper 1078*, pp. 245

IAGA Division V, Working Group 8, 2000. International Geomagnetic Reference Field, 2000, *Phys. Earth. Planet. Inter.* , 120 , 39-42, *Pure Appl. Geophys.* , 157 , 1797-1802, *Geophys. J. Int.* 141, 259-262.

McCaffrey, R., Silver, E.A., Raitt, R.W., 1981. Crustal structure of the Molucca Sea collision zone, Indonesia.

Silver, E.A., Joyodiwiryono, Y., McCaffrey, R., 1978. Gravity result and emplacement geometry of the Sulawesi ultramafic belt, Indonesia.

Simanjuntak, T.O., 1986. Struktur duplek (dwi unsur) sesar sungkup sesar jurus mendatar di lengan timur Sulawesi, *PIT XV, IAGI*.

Sukanto, R., 1975. The structure of Sulawesi in light of plate tectonics, Association of Indonesia Geologists, Jakarta pp.25.

Wharton, S.R., 1993. An Integrated Approach to the Study of Pliocene Gros Morne Reservoir Sands For Developing Play Concepts - Moruga East Field, Trinidad.