

PENENTUAN PREKURSOR GEMPA BUMI MENGGUNAKAN DATA GEOMAGNET

Sarmoko Saroso
Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
email: sarmoko@bdg.lapan.go.id

Abstrak - Anomali sinyal ULF pada variasi medan geomagnet adalah merupakan salah satu fenomena yang diyakini kebenarannya dalam studi elektromagnet yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi, seperti terjadinya emisi dari kerak bumi yang berasal dari sumber gempa. Dari studi terdahulu telah banyak ditemukan pertanda anomali sinyal ULF sebelum kejadian gempa bumi berskala besar. Untuk membuktikan kebenaran fenomena tersebut dan untuk menjelaskan hubungan antara fenomena elektromagnet dan mekanisme fisis yang mundn terkait, telah dilakukan analisis data geomagnet di Kototabang dan Biak yang berhubungan dengan kejadian gempa Sumatra. Studi kasus dilakukan untuk mengamati anomali sinyal ULF yang berhubungan dengan gempa Aceh yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 (magnitudo $M_w = 9.0$ dan kedalaman = 30 km, dari katalog USGS) dan gempa Nias yang terjadi pada tanggal 28 Maret 2005 (magnitudo $M_w = 8.7$ dan kedalaman = 30 km). Dalam menentukan anomali emisi sinyal ULF digunakan tiga metode, yaitu metode polarisasi, metode fungsi transfer berbasis transformasi wavelet dan metode fraktal. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa anomali yang ditentukan dengan menggunakan metode polarisasi dan fungsi transfer menunjukkan variasi amplitudo yang sama. Variasi tersebut teramati di Kototabang beberapa minggu sebelum kejadian gempa berskala besar dengan $M > 6.5$, sedangkan data di Biak tidak terlihat adanya peubahan. Hal ini menunjukkan bahwa anomali yang teramati tersebut merupakan sinyal yang diduga berhubungan dengan fase awal terjadinya gempa di Aceh dan Nias. Sedangkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode fraktal menunjukkan terjadinya penurunan dimensi fraktal beberapa minggu sebelum kejadian gempa besar tersebut. Hal ini merupakan indikasi dari fase awal terjadinya peningkatan aktivitas seismik yang kemungkinan terkait dengan variasi geomagnet yang diakibatkan oleh aktivitas lokal yang berasal dari litosfer yang dipicu oleh kejadian gempa bumi di Aceh dan Mas.

Kata kunci: Anomali sinyal ULF, polarisasi, fungsi transfer, fraktal

Abstract - Anomalous ULF geomagnetic field change is considered to be one of the most convincing and promising phenomena among earthquake-related electromagnetic effects, because we expect emissions from the crust of the source region. There has been a great deal of accumulated and convincing evidence of ULF magnetic signatures before large earthquakes as reported in the previous studies. In order to verify these phenomena preceding torge earthquakes and to clarify the relationship between electromagnetic phenomena and possible physical mechanism, we have investigated the data of ULF geomagnetic observations at Kototabang and Biak stations associated with the 2004/2005 Sumatra earthquakes. A case study is carried out in this work to investigate the pre-earthquake ULF geomagnetic anomalies during the Sumatra-Andaman earthquake on December 26, 2004 ($M_w = 9.0$ and depth = 30km from USGS catalog), and Sumatra-Nias earthquake on March 28, 2005 ($M_w = 8.7$ and depth = 30km). For the aim of finding any precursors, we have used three methods, the spectral density ratio analysis and transfer functions analysis based on wavelet transform method, and fractal method. Results of the spectral density analysis indicate similarities in variations to those of amplitude for the induction arrow in transfer function analysis. Both of these variations at Kototabang exhibit strange or anomalous changes from a few weeks before the earthquake with $M > 6.5$, while there are no apparent changes at remote station of Biak. To make these results more convincing, the fractal analysis has been applied to the same

observed data, which also show decrease in fractal dimension a few weeks before the earthquakes. This suggests that the anomalous change might be a possible signal of geomagnetic variations due to the local activity from lithosphere related with the earthquake preparation phase of Aceh and Nias earthquakes.

Keywords: ULF anomaly signal, polarization, transfer function, fractal

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang memiliki wilayah tektonik sangat aktif. Karena itu, sejumlah besar kejadian gempa yang kadang disertai tsunami dan erupsi gunungapi sering terjadi. Dalam kaitan dengan bencana itu, suatu kajian sains dan teknologi yang bersifat penanggulangan dan mitigasi terhadap bencana gempa dan erupsi gunungapi tersebut sudah sangat diperlukan.

Salah satu kajian penting yang perlu dilakukan adalah upaya untuk menentukan prekursor gempa bumi. Akhir-akhir ini, kemunculan anomali medan elektromagnet yang berhubungan dengan kejadian gempa telah banyak dilaporkan. Perubahan medan magnet bumi pada pita frekuensi ULF (*ultra low frequency*, <3Hz) serta anomali transmisi gelombang elektromagnet seperti gelombang OMEGA (VLF, *very low frequency*, kHz) dan hamburan gelombang radio FM (VHF, *very high frequency*, MHz) yang disebabkan oleh terganggunya ionosfer adalah merupakan kajian untuk menentukan prekursor gempa bumi yang menjanjikan bila diaplikasikan. Dalam kaitan dengan kajian tersebut, analisis yang komprehensif terhadap perubahan pada variasi medan magnet bumi yang dikenal sebagai anomali emisi sinyal ULF merupakan kegiatan yang menjadi prioritas utama dalam penelitian ini. Pada awal 1990-an, beberapa hasil yang menarik dari penelitian medan elektromagnet ULF dilaporkan oleh Fraser-Smith *et al* (1990), Kopytenko *et al.* (1993), dan Hayakawa *et al* (1996, 2002). Dari hasil penelitian yang mereka peroleh telah dapat memotivasi beberapa peneliti lain untuk melakukan pengukuran medan elektromagnet dalam berbagai frekuensi. Kejadian gempa Kobe 1995 memberikan dampak besar, karena perubahan medan elektromagnet sebelum gempa terjadi dalam berbagai pita frekuensi dapat terdeteksi oleh beberapa peneliti yang melakukan penelitian di bidang tersebut secara independen. Hasil pengamatan tersebut boleh jadi merupakan kasus pertama yang mana beberapa metode dapat mendeteksi tanda-tanda secara bersamaan untuk satu kejadian gempa, dengan stasiun observasi mereka yang berjarak ratusan kilometer dari episenter. Data yang terkumpul berupa perubahan geopotensial DC, puncak medan magnet 223 Hz, sinyal gelombang radio VLF 1-9 kHz, sinyal puncak LF, fluktuasi komponen vertikal arus bumi frekuensi tinggi lebih dari 1 MHz, emisi 22.2 MHz, perilaku abnormal pada gelombang VLF sampai 10 kHz berupa transmisi gelombang Omega, dan gelombang balik modulasi frekuensi FM-VHF 77.1 MHz. Semua data tersebut menunjukkan anomali secara simultan pada frekuensi ULF, VLF, LF, HF, dan VHF yang terjadi 7 hari sebelum gempa Kobe terjadi, dan pada umumnya perubahan sinyal-sinyal dari frekuensi lebih tinggi terjadi lebih* dekat dengan waktu kejadian gempa. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa secara umum makin tinggi frekuensi sinyal elektromagnet yang digunakan, maka tanda-tanda atau prekursor akan semakin dekat dengan waktu kejadian gempa.

Selanjutnya dalam makalah ini akan ditinjau anomali emisi sinyal ULF yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi yang berskala besar ($M > 6$) di Indonesia, yaitu gempa Aceh yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2004 berkekuatan 9.0 SR

(Skala Richter) dan Gempa Nias yang terjadi pada tanggal 28 Maret 2005 berkekuatan 8.7 SR.

2. ANALISIS DATA DAN HASIL

Untuk mengamati anomali pada variasi medan geomagnet yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi yang berskala besar tersebut, diperlukan metode pemrosesan sinyal yang dapat memisahkan antara gangguan yang berasal dari dalam bumi akibat adanya aktivitas seismik dengan gangguan yang ditimbulkan oleh aktivitas geomagnet yang berasal dari magnetosfer (badai magnet) dan dari matahari (variasi harian dan musiman). Untuk meminimalisasi gangguan tersebut, maka data geomagnet yang digunakan (komponen H, D, dan Z) adalah data tahun 2004 dan 2005 dari stasiun Kototabang (0.20°LS, 100.32°BT) dan Biak (1.10°LS, 136.05°BT) dalam rentang waktu 3 jam, mulai dari pukul 00 sampai 03 waktu lokal, dengan resolusi waktu satu detik. Untuk menentukan anomali pada emisi sinyal ULF digunakan analisis polarisasi dan analisis fungsi transfer, berbasis transformasi wavelet. Kemudian dilakukan perbandingan antara hasil analisis polarisasi dan hasil analisis fungsi transfer. Selanjutnya akan dibahas hasil analisis fraktal dan keterkaitannya dengan hasil analisis polarisasi dan analisis fungsi transfer.

2.1 Hasil Analisis Polarisasi

Hasil-hasil yang telah diperoleh dengan menggunakan metode polarisasi untuk menentukan anomali sinyal ULF adalah dengan menghitung perbandingan rapat spektra (*spectral density ratio*) komponen Z (S_z) dengan komponen D (S_D). Gambar 2-1 (a) menunjukkan aktivitas gempa di Indonesia pada tahun 2004-2005. Gambar 2-1 (b) dan (c) menunjukkan variasi polarisasi (S_z/S_D), masing-masing di Kototabang dan Biak untuk periode data 32 detik. Gambar 2-1 (d) dan (e) menunjukkan variasi indeks ξ_{Kp} dan indeks Dst. Oleh karena variasi spektrum komponen H sangat sensitif terhadap aktivitas geomagnet yang berasal dari sumber eksternal, maka untuk menentukan anomali sinyal ULF dengan menggunakan metode polarisasi digunakan perbandingan antara komponen Z dan D. Anomali sinyal ULF yang berhubungan dengan kejadian gempa bumi berskala besar terlihat dengan jelas di Kototabang dengan menggunakan metode polarisasi dan periode data 32 detik, beberapa minggu sebelum kejadian gempa bumi.

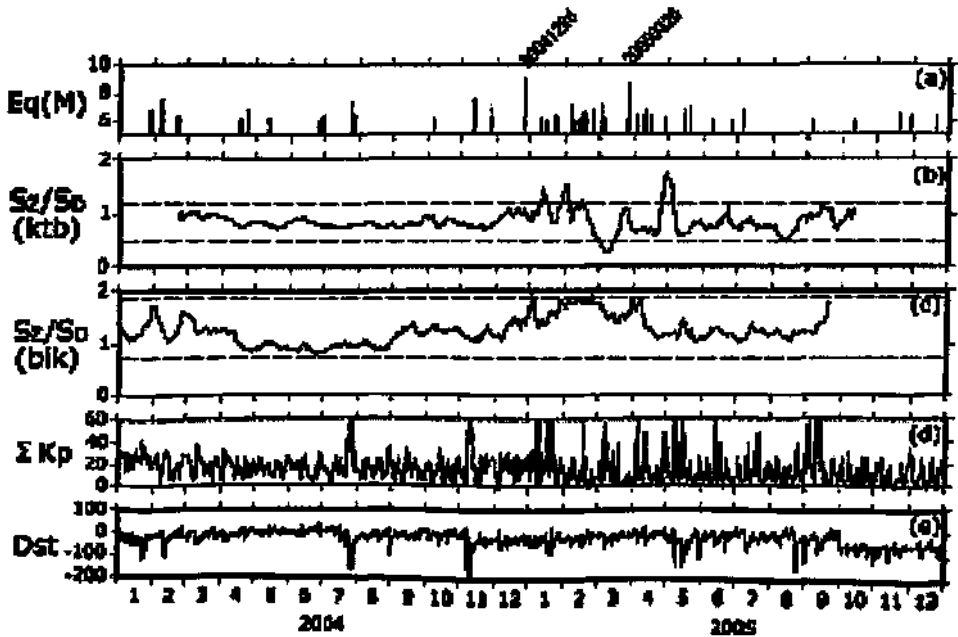
2.2. Hasil Analisis Fungsi Transfer

Fungsi transfer tersebut memberikan informasi mengenai konduktivitas listrik di dalam bumi. Studi tentang fungsi transfer ini biasanya digunakan untuk menentukan anomali pada komponen vertikal, yang juga dinyatakan sebadai anomali konduktivitas, dan *'induction arrow'* atau vektor Perkinson digunakan untuk menggambarkan anomali ini, dimana panjang dan arahnya masing-masing menunjukkan besarnya anomali magnet dan arah dari sumber gangguan (Rikitake and Honkura, 1985). Pada umumnya studi tentang anomali konduktivitas ini digunakan untuk menjelaskan distribusi konduktivitas listrik pada bagian mantel dan kerak bumi. Yanagihara and Nagano (1976) menyatakan bahwa variasi temporal dari fungsi transfer dengan gempa bumi yang berkekuatan lebih besar dari 5 SR mempunyai korelasi yang baik yang terjadi disekitar stasiun Kakioka.

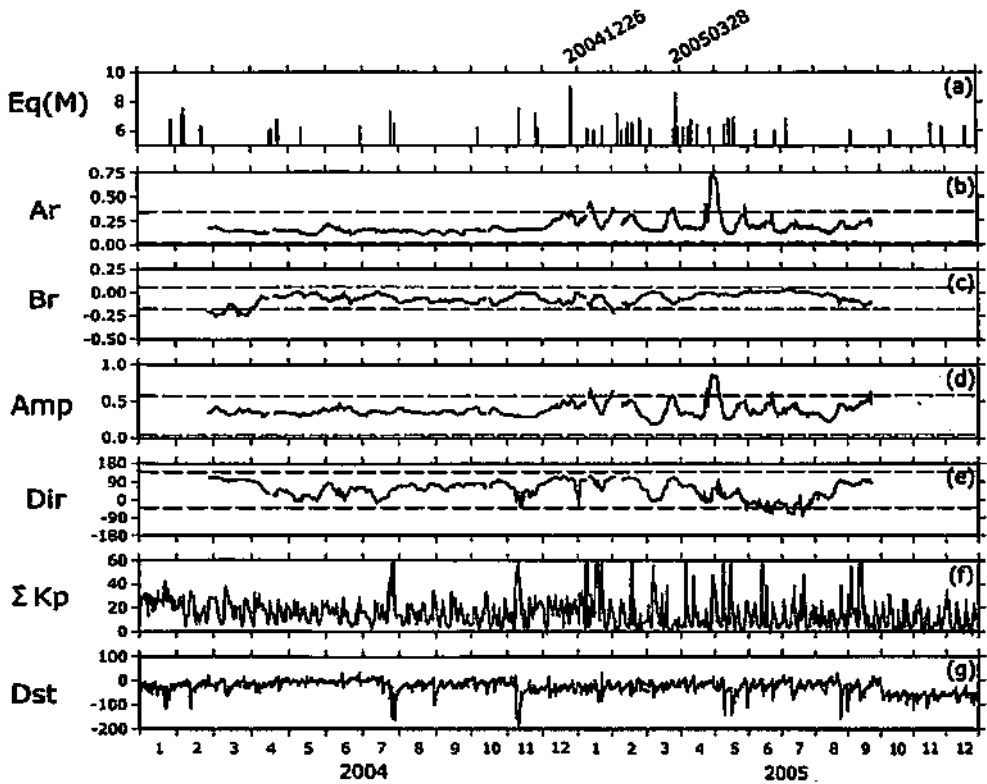
Analisis fungsi transfer ini pada umumnya dilakukan dengan menggunakan transformasi Fourier. Dalam penelitian ini digunakan transformasi wavelet Morlet

(Morlet *et al.*, 1982), karena transformasi Fourier sangat lemah untuk sinyal yang sifatnya transien, seperti pulsa magnet. Gambar 2-2 (a) menunjukkan aktivitas gempa di Indonesia pada tahun 2004-2005. Sedangkan hasil analisis fungsi transfer berbasis transformasi wavelet terlihat pada Gambar 2-2(b), (c), (d), dan (e) yang menunjukkan variasi fungsi transfer (Ar, Br, Amp, dan Dir) masing-masing untuk Kototabang dari bulan Maret 2004 sampai dengan September 2005 dengan periode data 32 detik.

Dari Gambar 2-1 dan Gambar 2-2 terlihat bahwa dengan menggunakan metoda analisis polarisasi dan analisis fungsi transfer masing-masing untuk periode 32 detik, teramati fluktuasi yang sangat mirip antara variasi polarisasi (Z/D) dengan variasi amplitudo (Amp) yang terjadi pada waktu yang bersamaan, yaitu beberapa minggu sebelum kejadian gempa Aceh dan gempa Nias. Anomali ini ternyata tidak teramati di Biak. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi tersebut kemungkinan terkait dengan variasi geomagnet yang diakibatkan oleh aktivitas lokal yang berasal dari litosfer yang dipicu oleh kejadian gempa bumi di Aceh dan Nias.



Gambar 2-1. (a) aktivitas gempa di Indonesia pada tahun 2004-2005 (b) variasi polarisasi (Sz/S_D) di stasiun Kototabang dengan periode data 32 detik, (c) variasi polarisasi (Sz/S_D), di stasiun Biak dengan periode data 32 detik, (d) variasi indeks ΣKp , (e) variasi indeks Dst. Dua garis horizontal putus-putus di (b) dan (c) menunjukkan $\pm 2\sigma$ (σ : standar deviasi)



Gambar 2-2. (a) aktivitas gempa di Indonesia pada tahun 2004-2005, (b) variasi Ar, (c) variasi Br, (d) variasi Amp, (e) variasi Dir, (f) variasi indeks ΣKp , (g) variasi indeks Dst Dua garis horizontal putus-putus di (b), (c), (d) dan (e) menunjukkan $\pm 2\sigma$ (σ : standar deviasi)

2.3 Hasil Analisis Fraktal

Dalam analisis fraktal, penentuan anomali emisi sinyal ULF dilakukan dengan menghitung dimensi fraktal dari deret waktu ULF. Untuk menentukan dimensi fraktal tersebut digunakan metode Higuchi (1988) yang memodifikasi metode BK (Burlaga and Klein, 1986) dengan cara membangun deret waktu yang baru dan didefinisikan sebagai,

$$X_m(k); X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X(m + [\frac{N-m}{k}] \cdot k) \quad (m = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (2-2)$$

dengan m adalah waktu awal dan k interval waktu. Selanjutnya didefinisikan panjang kurva $X_m(k)$ sebagai,

$$L_m(k) = \left\{ \left(\sum_{i=1}^{[\frac{N-m}{k}]} |X(m+ik) - X(m+(i-1) \cdot k)| \right) \cdot \frac{N-1}{[\frac{N-m}{k}] \cdot k} \right\} \quad (2-3)$$

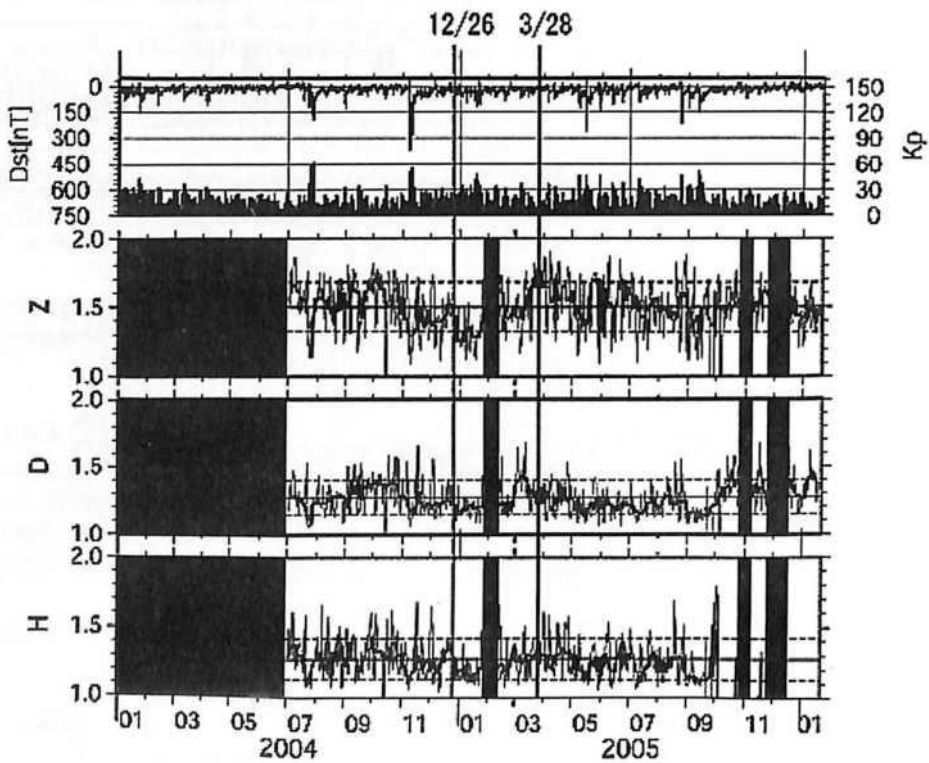
dengan $(N-1) / [\frac{N-m}{k}] \cdot k$ adalah faktor normalisasi.

Selanjutnya didefinisikan panjang kurva untuk interval waktu k , $L(k)$ yaitu harga rata-rata dari $L_m(k)$ yang dapat dituliskan sebagai,

$$L(k) = \frac{\sum_{m=1}^k L_m(k)}{k}$$

Bila $L(k)$ diplot terhadap k , maka dimensi fraktal D dapat ditentukan dari hubungan $L(k) \propto k^D$

Dari perhitungan dimensi fraktal (D) dengan menggunakan metode Higuchi dan dengan menggunakan data variasi medan geomagnet di stasiun Kototabang untuk komponen H, D, dan Z, kemudian dihitung besarnya dimensi fraktal untuk komponen H, D, dan Z di stasiun Kototabang, pada bulan Juli 2004 sampai dengan Januari 2006, dari pukul 00.00-23.00 waktu lokal. Selanjutnya ditentukan dimensi fraktal tiap 1 jam, dalam selang waktu antara pukul 22.00 sampai dengan 02.00 waktu lokal dan dihitung



Gambar 2-3. Histogram paling atas menunjukkan indeks geomagnet Dst dan Kp, dari tanggal 1 Januari 2004 sampai dengan 31 Januari 2006. Histogram dibawahnya berturut-turut menunjukkan besarnya dimensi fraktal untuk komponen Z, D, dan H, dari bulan Juli 2004 sampai 31 Januari 2006. Garis tipis menunjukkan harga rata-rata jam-an sedangkan garis tebal menunjukkan harga median berjalan ± 5 hari. Garis horizontal menunjukkan harga rata-rata selama periode tersebut dan garis putus-putus menunjukkan $\pm \sigma$ (σ : Standard deviasi). Garis vertikal yang tebal masing-masing menunjukkan saat kejadian gempa Aceh 26 Desember 2004 dan gempa Nias tanggal 28 Maret 2005.

Dari Gambar 2-3 terlihat bahwa 1 bulan sampai beberapa minggu sebelum kejadian gempa Aceh 26 Desember 2004 dan gempa Nias 28 Maret 2005, terjadi penurunan dimensi fraktal dari komponen H, D, dan Z di stasiun Kototabang dan tidak terjadi ditempat lain yang letaknya sangat jauh dari episenter, seperti di stasiun Biak. Hal ini mengindikasikan terjadinya proses SOC (*Self Organizing Criticality*) atau kekritisian yang diatur sendiri di hiposenter dan di sekitar hiposenter dari gempa tersebut yang merupakan awal dari peningkatan aktivitas seismik sebelum kejadian gempa.

Mengenai mekanisme yang terkait dengan kejadian ini, telah banyak dikemukakan untuk menjelaskan sumber dari emisi sinyal ULF (Fraser-Smith *et al.*, 1990; Kopytenko *et al.*, 1993), seperti efek elektrokinetik, efek induksi, dan efek *microfracturing*. Meskipun demikian, dari berbagai mekanisme fisis yang paling mungkin terkait dengan kejadian gempa bumi tersebut adalah disebabkan oleh terjadinya perubahan konduktivitas yang diakibatkan oleh gerakan air bawah tanah atau mekanisme yang ditimbulkan oleh efek elektrokinetik akibat perubahan stress mekanik di sekitar lokasi gempa. Untuk mengklarifikasi berbagai mekanisme yang terkait dengan kejadian gempa tersebut, perlu dilakukan penelitian untuk kejadian gempa yang sama pada waktu yang bersamaan dengan menggunakan berbagai metode dan peralatan.

3. KESIMPULAN

Dengan memproses dan menganalisis data geomagnet dari stasiun Kototabang dan Biak tahun 2004 dan 2005, dapat ditentukan keterkaitan anomali sinyal ULF yang teramati di Kototabang dan Biak dengan kejadian gempa di Aceh dan Nias». Dari hasil analisis polarisasi dan analisis fungsi transfer berbasis transformasi wavelet serta analisis fraktal untuk menentukan anomali emisi sinyal ULF dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Oleh karena variasi spektrum komponen H sangat sensitif terhadap aktivitas geomagnet yang berasal dari sumber eksternal, maka untuk menentukan anomali sinyal ULF dengan menggunakan metode polarisasi digunakan perbandingan antara komponen Z dan D (Z/D), sedangkan untuk analisis fungsi transfer digunakan variasi amplitudonya (Amp).
2. Anomali yang ditentukan dengan menggunakan metode analisis polarisasi dan analisis fungsi transfer masing-masing untuk periode 32 detik, teramati di Kototabang pada waktu yang bersamaan, yaitu beberapa minggu sebelum kejadian gempa Aceh dan Nias. Anomali ini ternyata tidak teramati di Biak. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi tersebut kemungkinan terkait dengan variasi geomagnet yang diakibatkan oleh aktivitas lokal yang berasal dari litosfer yang dipicu oleh kejadian gempa bumi di Aceh dan Nias.
3. Terjadi penurunan variasi dimensi fraktal beberapa minggu sebelum kejadian gempa Aceh 26 Desember 2004. Hal ini kemungkinan merupakan awal dari peningkatan aktivitas seismik sebelum kejadian gempa. Variasi temporal dari dimensi fraktal kemungkinan terkait dengan variasi geomagnet yang diakibatkan oleh aktivitas lokal yang berasal dari litosfer yang dipicu oleh kejadian gempa bumi di Aceh dan Nias.

DAFTAR RUJUKAN

Burlaga, L. F. and Klein, L. W., 1986, Fractal structure of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 91, A1, 347-350.

SARMOKO SAROSO

- Fraser-Smith, A., Bernardi, C. A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Hellowell, R.A., and Villard Jr., O. G., 1990, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1465-1468.
- Fujiwara, S. and Toh, H., 1996, Geomagnetic transfer functions in Japan obtained by first order geomagnetic survey, *J. Geomag. Geoelectr.* **48**, pp. 1071-1101.
- Harada, M., Hattori K., and Isezaki, N., 2004, Transfer function analysis approach for anomalous ULF geomagnetic field change detection. *Phys. Chem. Earth*, **29**, pp. 409-417.
- Hayakawa, M., Kawate, R., Molchanov, O. A. and Yumoto, K., 1996, Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993, *Geophys. Res. Lett.* **23**, pp. 241-244.
- Hayakawa, M. and Molchanov, O. A. (Eds), 2002, Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, Terra Scientific Publishing Company (TERRA-PUB), Tokyo, p. 477.
- Higuchi, T. (1988), Approach to an irregular time series on the basis of fractal theory, *Physica D* **31**, 277-283. 13.
- Honkura, Y. and Koyama, S., 1978, Observation of short-period geomagnetic variations at Nakaizu, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **53**, pp. 925-930.
- Honkura, Y., 1979, Observation of short-period geomagnetic variations at Nakaizu (2). Changes in transfer functions associated with the Izu-Ohsima-Kinkai earthquake of 197, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **54**, pp. 477-490.
- Kopytenko, Y.A., Matishvili, T. G., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A. and Molchanov, O. A., 1993, Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories, *Phys. Earth Planet. Inter.* **77**, pp. 85-95.
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E. and Giard, D., 1982, Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media, *Geophysics* **47**, pp. 203-221.
- Rikitake, T. and Honkura, Y., 1985, Magnetic and electric signals precursory to earthquake: An analysis of Japanese data, *J. Geomag. Geoelectr.*, **39**, 47-61.
- Yanagihara, K. and Nagano, T., 1976, Time change of transfer function in the central Japan anomaly of conductivity with special reference to earthquake occurrences., *J. Geomag. Geoelectr.* **28**, pp. 157-163.