

STUDI GELOMBANG ULF: KORELASI PULSA MAGNET Pc3 DENGAN KECEPATAN ANGIN SURYA DAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET (STUDY OF ULF WAVE: CORRELATION OF Pc3 MAGNETIC PULSATIONS WITH SOLAR WIND VELOCITY AND INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD)

Setyanto Cahyo Pranoto^{1*)} dan Wahyu Srigutomo^{)}**

***) Pusat Sains Antariksa**

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjunan No. 133 Bandung 40173 Indonesia

****) Institut Teknologi Bandung**

Jl. Ganesha NO. 10 Bandung 40116 Indonesia

¹e-mail: setyanto.cahyo@lapan.go.id

Diterima; 8 April 2016; Direvisi: 13 Juni 2016; Disetujui; 30 Juni 2016

ABSTRACT

Energy for the Earth's magnetospheric processes is provided by solar wind. Pc3 magnetic pulsation is one of geomagnetic ULF wave. Pc3 magnetic pulsation has been studied to understand the dynamic of magnetosphere. Geomagnetic pulsations are quasi-sinusoidal variations in the Earth's magnetic field in the period range of 10-45 seconds. The magnitude of these pulsations ranges from fraction of a nT (nano Tesla) to several nT. These pulsations can be observed in a number of ways such as applied of ground based magnetometer. We used the magnetometer data of Manado, Parepare, and Kupang stations to studied the effect of the solar wind and interplanetary magnetic field on these pulsations. To extract Pc3 magnetic pulsations we applied second order of Butterworth filter and using Hamming windowing. The result showed that Pc3 magnetic pulsation have correlation with increasing solar wind velocity and interplanetary magnetic field-IMF, it is mean that solar wind controls Pc3 magnetic pulsations occurrence.

Keywords: Pc3 magnetic pulsations, ULF, Solar wind

ABSTRAK

Angin surya merupakan sumber energi bagi proses-proses fisis yang terjadi di magnetosfer Bumi. Untuk dapat memahami dinamika di magnetosfer Bumi dapat di tinjau dari gelombang ULF salah satunya pulsa magnet Pc3. Pulsa magnet Pc3 merupakan variasi *quasi-sinusoide* pada medan magnet Bumi dalam rentang periode 10 – 45 detik. Pulsa magnet Pc3 umumnya memiliki amplitudo rendah dengan rentang nT (nano Tesla). Terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mengamati pulsa magnet Pc3 diantaranya dengan menggunakan magnetometer landas Bumi. Dalam makalah ini kami menggunakan data pengamatan magnetometer stasiun Kupang, Manado, dan Parepare untuk mempelajari hubungan pulsa magnet Pc3 terkait dengan angin surya dan medan magnet antarplanet. Pulsa magnet Pc3 diekstrak dari data variasi medan magnet dengan menggunakan *Butterworth Filter* dan *Hamming windowing*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pulsa magnet Pc3 memiliki korelasi dengan peningkatan kecepatan angin surya dan medan magnet antarplanet. Hal ini mengindikasikan bahwa angin surya merupakan salah satu sumber yang mengontrol perubahan yang terjadi pada pulsa magnet Pc3.

Kata Kunci: *Pulsa magnet Pc3, Ulf, Angin surya*

1 PENDAHULUAN

Matahari merupakan sistem dinamis sebagai faktor utama penggerak perubahan di lingkungan antariksa Bumi. Matahari secara terus menerus melontarkan partikel bermuatan yang disebut angin surya menuju ruang antarplanet. Fluktuasi angin surya dapat mengeksitasi gelombang hidromagnetik pada berbagai rentang frekuensi pada daerah *ultra low frequency* (ULF). Berdasarkan mekanisme resonansi (Menk, 2011), gelombang ULF yang dibangkitkan melalui interaksi magnetosfer dengan angin surya yang berfluktuasi, dapat menjalar melewati magnetosfer dan ionosfer sehingga terekam oleh magnetometer di permukaan Bumi dalam bentuk pulsa magnet. Pulsa magnet yang terekam di permukaan Bumi mengindikasikan integrasi beberapa sinyal yang terdapat di magnetosfer dalam bentuk *broadband* frekuensi (Feygin *et al.*, 2009).

Pulsa magnet Pc3 merupakan osilasi gelombang hidromagnetik pada frekuensi gelombang *Ultra Low Frequency* (ULF) dengan rentang periode 10 – 45 detik (Jacobs *et al.*, 1964). Pembangkitan pulsa magnet ini terjadi secara eksternal maupun internal di

magnetosfer. Hal ini terlihat dari variasi spasial dan temporal kejadian pulsa magnet Pc3 di daerah *quasi-parallel bow shock* (Vallee *et al.*, 2007). Sumber eksternal pulsa magnet berasal dari gelombang permukaan (*surface wave*) di *magnetopause* sebagai akibat ketidakstabilan *Kelvin-Helmholtz* dan pembangkitan gelombang di daerah *bowshock* atau *magnetosheath* yang mengalami propagasi ke magnetosfer. Sedangkan sumber internal berasal dari ketidakstabilan plasma di dalam magnetosfer. Beberapa penelitian pernah membahas hal ini diantaranya; energi gelombang Pc3-4 berasal dari aliran plasma di *magnetosheath* menuju *magnetopause* (Yumoto dan Saito, 1984). Pulsa magnet Pc3 dicirikan oleh dua mode osilasi dominan yang berasal dari sumber penggerak eksternal (*upstream waves*), dan sebuah penguatan signal (*resonant waves*) pada frekuensi osilasi fundamental pada garis medan lokal (Villante *et al.*, 2003).

Pulsa magnet Pc3 umumnya memiliki amplitudo kecil. Pulsa ini biasanya terpolarisasi di sepanjang garis medan magnet dan gelombang magnetosfer paling kuat teramati pada daerah dekat *plasmopause* pagi hari. Pudovkin dan Shumilov (1969), berpendapat bahwa medan listrik

magnetosfer tidak hanya diakibatkan oleh aliran plasma matahari melainkan dapat juga dikarenakan variasi medan magnet antarplanet. Akibatnya gangguan pada angin surya yang bergerak melintasi Bumi menambahkan nilai medan Bumi selain medan magnet antarplanet yang diakibatkan oleh arus di permukaan *magnetopause*.

Aliran angin surya akan melewati *subsolar bowshock* dan *magnetosheath* menuju ke area sekitar *subsolar magnetopause* dan mengalir sepanjang *magnetopause* pada kedua sisi baik dalam arah timur-barat maupun utara-selatan. Ketika kecepatan angin surya mengalami percepatan di atas *threshold* tertentu, maka akan mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan *Kelvin-Helmholtz* dan peningkatan amplitudo dari gelombang permukaan menuju magnetosfer dalam bentuk pulsa magnet. Semakin tinggi peningkatan kecepatan dari angin surya maka semakin besar amplitudo pulsa magnet di magnetosfer (Taroyan *et al.*, 2009).

Pada saat yang sama terjadi pembangkitan gelombang pada daerah *quasi-parallel bow shock* yang mendominasi di *magnetosheath* sekitar pagi dan menuju *magnetopause*. Mekanisme propagasi dan konveksi gelombang akan menstimulasi *magnetopause* untuk mengirimkan gelombang ke area magnetosfer di sisi siang. Ketika terjadi perubahan orientasi medan magnet antarplanet dan kecepatan angin surya, maka mengakibatkan gelombang permukaan di *sheath* memiliki periode *cyclotron* sekitar 10 – 100 detik dan terjadi pembangkitan pulsa di magnetosfer

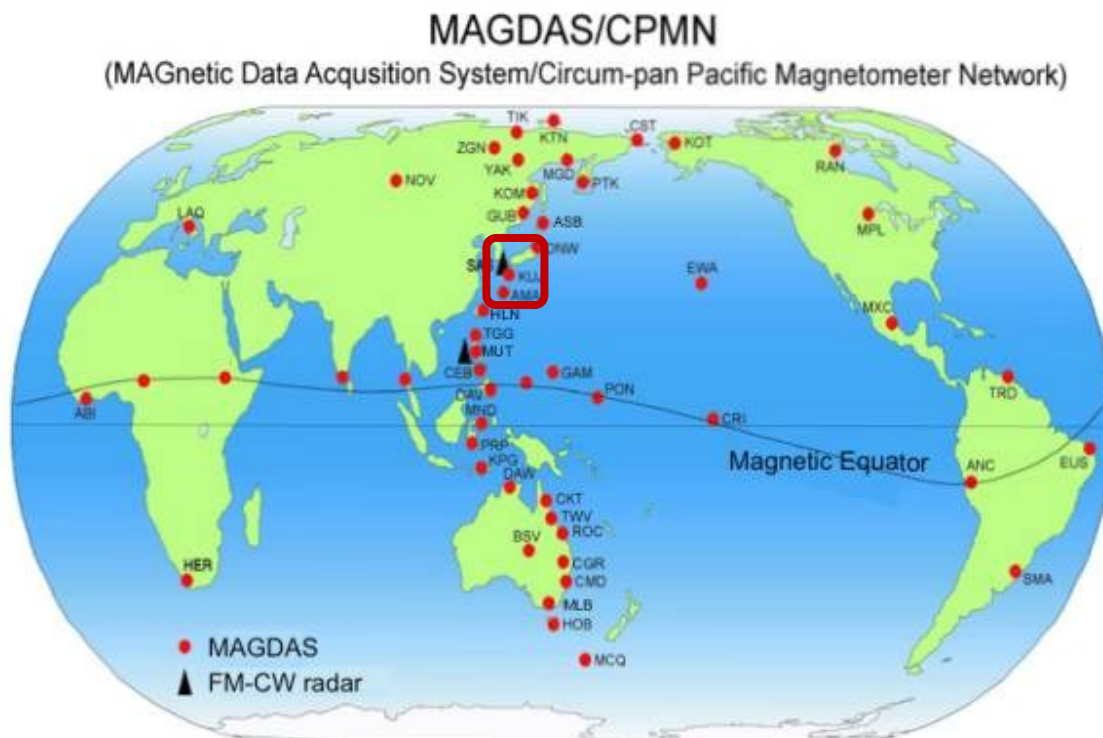
pada rentang periode yang sama. Selain meningkatkan pertumbuhan gelombang permukaan, kecepatan angin surya yang lebih tinggi juga meningkatkan efisiensi konveksi gelombang *quasi-parallel* menuju magnetosfer, serta menyediakan sumber gangguan yang diperlukan untuk memicu ketidakstabilan *Kelvin-Helmholtz* (Mazur dan Chuiko, 2013).

Dalam makalah ini memaparkan keterkaitan antara pulsa magnet Pc3 dengan peningkatan kecepatan angin surya (V_{sw}) dan perubahan medan magnet antarplanet (*Interplanetary Magnetic Field, IMF*) selama rentang periode 2010-2011. *Output* dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk membantu penelitian lebih lanjut mengenai mekanisme pembangkitan pulsa magnet Pc3.

2 METODOLOGI

2.1 Lokasi dan Data

Dalam studi ini digunakan data medan magnet Bumi hasil rekaman magnetometer stasiun pengamatan Kupang (KPG) (-10,2°S, 123,4°E), Manado (MND) (1,44°N, 124,84°E), dan Parepare (PRP) (-3,6°S, 119,4°E), rentang waktu tahun 2010-2011. Magnetometer ini mengukur tiga komponen variasi medan magnet Bumi; H (komponen horizontal arah utara-selatan), D (komponen horizontal arah timur-barat), Z (komponen arah vertikal) dengan resolusi 1 detik dan merupakan salah satu magnetometer pada jaringan magnetometer global MAGDAS (*Magnetic Data Acquisition Systems*) dan CPMN (*Circum-pan Pacific Magnetometer Network*).



Gambar 2-1: Jaringan magnetometer MAGDAS/CPMN dan lokasinya di Indonesia Sumber: http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas/MAGDAS_Project.files/image002.jpg

2.2 Metode Penelitian

Beberapa metode dalam melakukan pengolahan data medan magnet Bumi terkait dengan gelombang ULF pernah dilakukan di antaranya; pulsa magnet Pc3 diekstrak dari data variasi medan magnet Bumi menggunakan *Butterworth filter* dan *Hamming windowing* (Musafar, 2009). Fungsi *butterworth* ditunjukkan dalam persamaan (2-1), dengan z merupakan variabel kompleks, $a(n)$ dan $b(n)$ menyatakan koefisien dari polinomial pada orde ke- n . Sedangkan window *hamming* diberikan oleh persamaan (2-2), dengan n menyatakan lebar *window*.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1)+b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1+a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}} \quad (2-1)$$

$$w[k + 1] = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \frac{k}{n-1}\right) \quad (2-2)$$

Metode *fast fourier transform* (FFT) sering digunakan untuk mengidentifikasi maupun menganalisis fenomena gelombang seperti halnya

pulsa magnet (Bortnik *et al.*, 2007). Penerapan fungsi diskrit FFT satu dimensi juga digunakan untuk menghitung frekuensi dominan dan energi maksimum dari pulsa magnet Pc3 dalam rentang waktu setiap 20 menit. (Pranoto, 2011; Bortnik *et al.*, 2007). FFT diskrit dan inversinya diberikan dalam persamaan (2-3) dan (2-4).

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j)\omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (2-3)$$

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k)\omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (2-4)$$

Pulsa magnet Pc3 yang dianalisis dalam penelitian ini diekstrak dari data medan magnet Bumi menggunakan *Butterworth filter* dan *Hamming windowing* pada rentang frekuensi pulsa magnet Pc3 (0,1 - 0,2 Hz), sedangkan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) digunakan untuk mendapatkan frekuensi dominan dari pulsa magnet

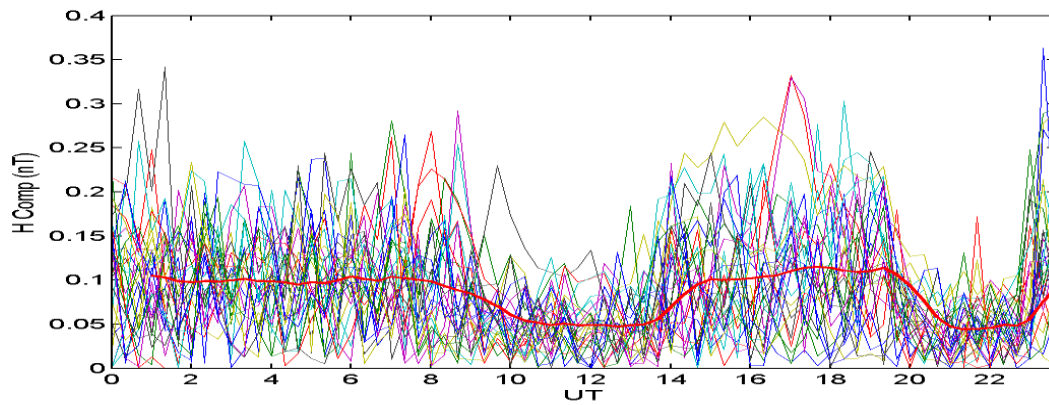
Pc3. Gangguan angin surya terhadap medan magnet bumi bersifat dominan pada bidang horizontal maka untuk analisis digunakan data komponen H saja dan parameter yang berkaitan dengan pulsa magnet Pc3 diekstrak setiap 20 menit. Selain data magnetometer landas Bumi digunakan pula data angin surya hasil pengamatan satelit *Advanced Composition Explorer* (ACE) untuk dilakukan analisis terkait hubungannya dengan pulsa magnet Pc3.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

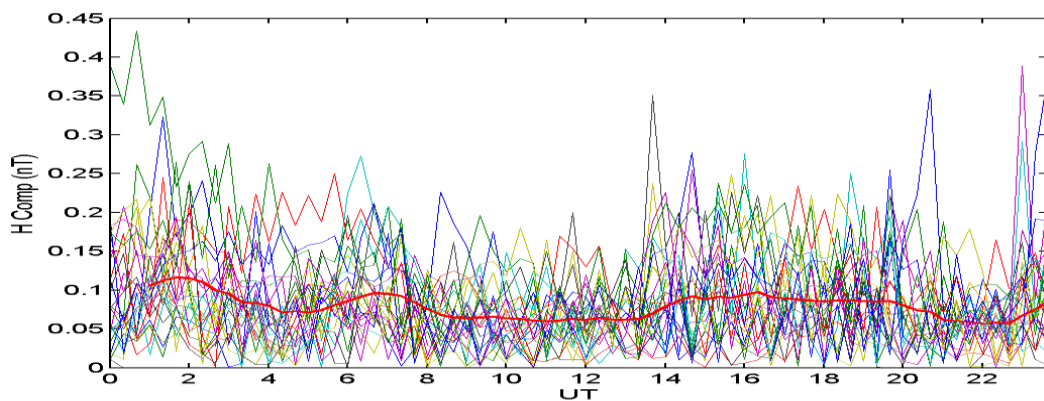
Gangguan angin surya terhadap medan magnet Bumi bersifat dominan pada komponen horizontal karenanya sifat-sifat pulsa magnet Pc3 dapat diamati dari data komponen H ataupun D. Untuk mendapatkan sinyal pulsa magnet Pc3 dilakukan ekstraksi terhadap variasi medan magnet Bumi setiap 20 menit secara berturutan. Gambar 3-1 memperlihatkan variasi harian dari pulsa magnet Pc3 untuk stasiun KPG, MND, dan PRP selama bulan Februari 2010. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa amplitudo pulsa magnet Pc3 memiliki kecenderungan mengalami peningkatan pada waktu siang dan malam serta mengalami penurunan pada waktu pagi dan petang. Masing-masing kurva dalam gambar tersebut merepresentasikan variasi harian dari amplitudo pulsa magnet Pc3. Sedangkan kurva dengan garis tebal merupakan rata-rata dari amplitudo pulsa magnet Pc3 dengan menggunakan metode *moving average*. Amplitudo pulsa magnet Pc3 diplot dalam UT (*universal time*) yang dinyatakan sebagai sumbu horisontal

sedangkan sumbu vertikalnya menyatakan amplitudo pulsa magnet Pc3 dalam satuan nT (nano Tesla).

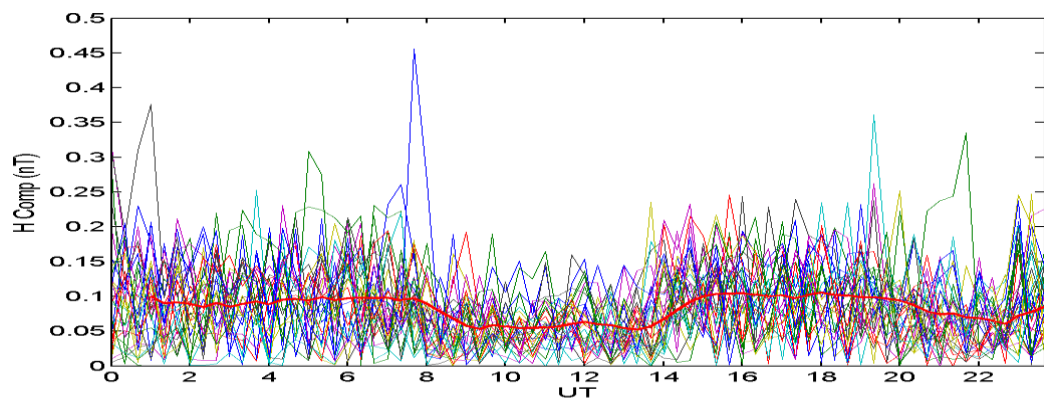
Dari Gambar 3-1 terlihat bahwa pada rentang waktu ~23-07 UT (~07-15 LT) dan ~13-20 UT (~21-04 LT) amplitudo pulsa magnet Pc3 mengalami peningkatan. Sedangkan, pada rentang waktu ~07-13 UT (~15-21 LT) dan ~20-23 UT (~04-07 LT) amplitudo pulsa magnet Pc3 mengalami penurunan. Peningkatan dan penurunan amplitudo pulsa magnet Pc3 ini berkaitan dengan kekuatan sumber pulsa magnet Pc3 yaitu angin surya. Pembangkitan pulsa magnet Pc3 dipicu oleh interaksi antara angin surya dengan medan magnet Bumi yang selanjutnya mengakibatkan ketidakstabilan *Kelvin-Helmholtz* di permukaan *magnetopause*. Ketidakstabilan tersebut mengalami penguatan dari daerah magnetosfer sekitar tengah hari dan menjalar menuju daerah magnetosfer belahan pagi (*dawn*) dan petang (*dusk*). Selama penjarannya terjadi pelemahan energi sehingga gelombang ULF yang mencapai daerah pagi dan petang tersebut mengalami penurunan. Pada sisi lain, garis medan magnet Bumi beresilasi dengan frekuensi-eigen tertentu. Peningkatan amplitudo pulsa magnet Pc3 di belahan siang dan malam yang teramati pada permukaan Bumi ini bersesuaian dengan peningkatan ketidakstabilan yang terjadi pada permukaan *magnetopause*. Gelombang ULF yang terbangkitkan di *magnetopause* menjalar menuju permukaan Bumi melalui resonansi antara gelombang tersebut dengan osilasi garis medan magnet di magnetosfer.



(a) Stasun Kupang (KPG)



(b) Stasun Manado (MND)

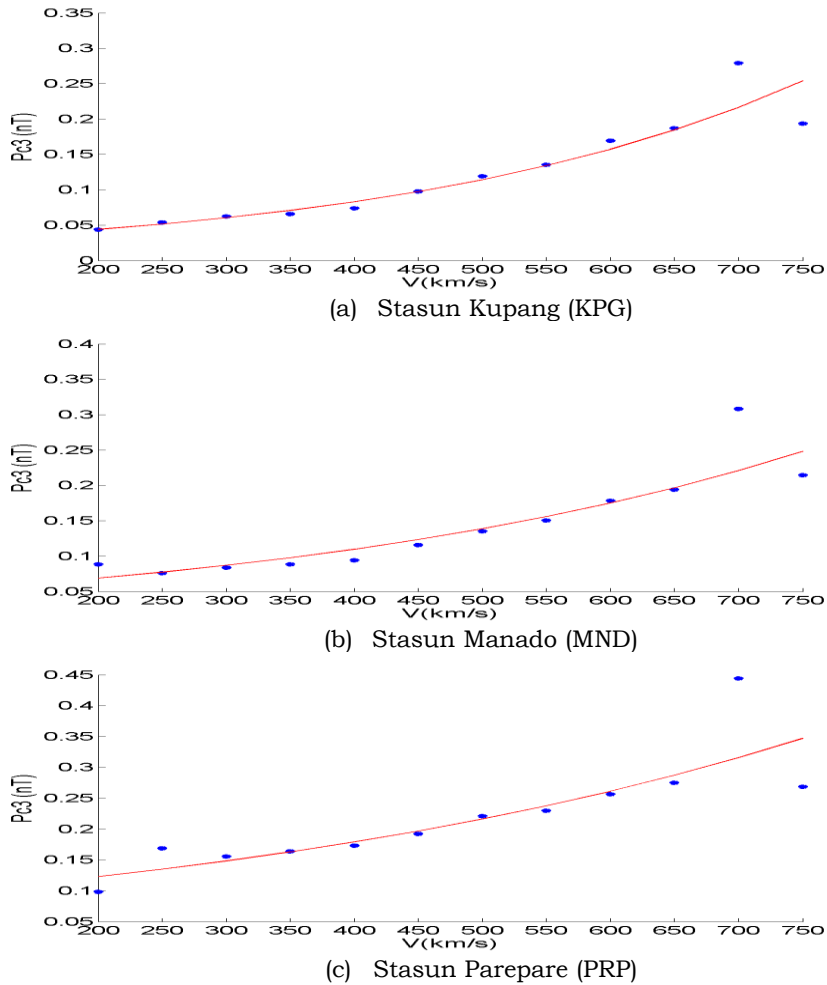


(c) Stasun Parepare (PRP)

Gambar 3-1: Variasi harian pulsa magnet Pc3 rentang waktu Februari 2010. Kurva dengan garis tebal merupakan rata-rata variasi harian dalam satu bulan

Pulsa magnet Pc3 digerakkan oleh perubahan dinamis angin surya. Interaksi antara angin surya dengan magnetosfer Bumi mengimplikasikan adanya transfer energi angin surya ke dalam magnetosfer Bumi. Untuk menyelidiki hal tersebut dilakukan uji hubungan antara amplitudo pulsa magnet Pc3 dengan kecepatan angin surya. Distribusi amplitudo pulsa magnet Pc3 yang teramati di stasiun

KPG, MND, dan PRP terhadap perubahan kecepatan angin surya ditunjukkan pada Gambar 3-2. Kecepatan angin surya diplot dalam satuan (km/s) yang dinyatakan sebagai sumbu horisontal sedangkan sumbu vertikalnya menyatakan amplitudo pulsa magnet Pc3 dalam satuan nT (nano Tesla).



Gambar 3-2: Hubungan amplitudo pulsa magnet Pc3 terhadap kecepatan angin surya rentang waktu 2010-2011. Plot (•) dan (–) merupakan amplitudo pulsa magnet Pc3 dan interpolasinya

Pada Gambar 3-2 untuk kecepatan lebih kecil dari 700 km/detik hubungan antara amplitudo pulsa magnet Pc3 dengan kecepatan angin surya hampir bersifat linier atau merupakan fungsi eksponensial dengan koefisien kecil. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai berikut. Jika amplitudo pulsa magnet Pc3 memenuhi hubungan linear dengan kecepatan angin surya, maka ini dapat diartikan bahwa energi gelombang pulsa magnet Pc3 adalah kuadrat dari amplitudonya dan sebanding dengan energi kinetik partikel angin surya yang ditentukan oleh kuadrat kecepatannya.

Jika amplitudo pulsa magnet Pc3 didekati oleh fungsi eksponensial dari kecepatan angin surya dengan koefisien kecil maka dapat diartikan bahwa amplitudo pulsa magnet Pc3 sebanding

dengan energi kinetik angin surya dan koefisien yang kecil dapat menyatakan bahwa energi pulsa magnet Pc3 sangat sensitif terhadap perubahan kecepatan angin surya. Kedua pendekatan tersebut memiliki implikasi adanya transfer energi angin surya ke magnetosfer Bumi menentukan besar atau kecilnya amplitudo pulsa magnet Pc3 yang menjalar di magnetosfer dan yang terekam di permukaan Bumi.

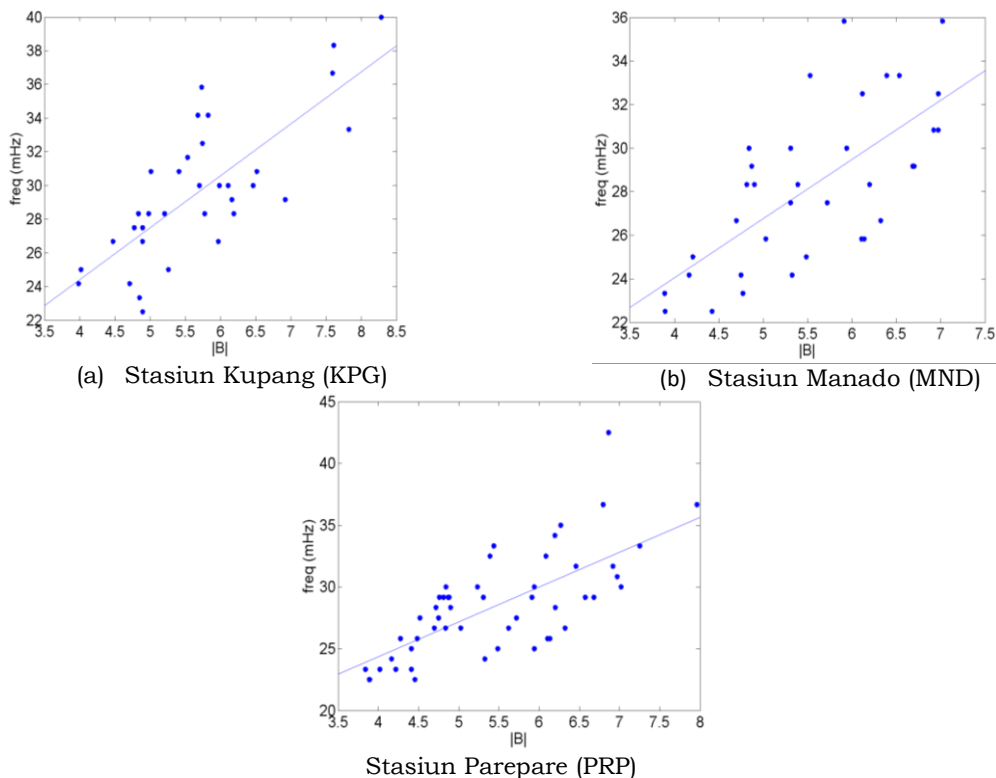
Pada sisi lain, untuk kondisi angin surya dengan kecepatan lebih besar dari 700 km/detik amplitudo pulsa magnet Pc3 mengalami penurunan. Akan tetapi kami tidak dapat menguji hal ini lebih lengkap karena pada rentang tahun 2010-2011 sangat sedikit peristiwa angin surya dengan kecepatan melebihi 750 km/detik. Penurunan amplitudo pulsa magnet Pc3 akibat peningkatan

kecepatan partikel angin surya berenergi tinggi dapat terjadi dikarenakan partikel-partikel yang memiliki kecepatan tinggi biasanya disertai oleh *shock* dalam angin surya. Pada saat kecepatan partikel angin surya mengalami peningkatan, maka kerapatan partikel mengalami penurunan. Namun analisis lebih lanjut terkait hal ini tidak dapat dilakukan karena tidak lengkapnya data kerapatan angin surya yang tersedia dari satelit.

Untuk memahami sumber utama dari mekanisme pembangkitan pulsa magnet Pc3 maka dapat dilakukan dengan melihat karakteristik dari pulsa magnet Pc3 tersebut dalam keterkaitannya dengan *interplanetary* dan struktur magnetosfer. Hubungan antara frekuensi dominan dari pulsa magnet Pc3 ($20\text{mHz} < f < 100\text{ mHz}$) dengan magnitudo (**B**) dari medan magnet antarplanet-IMF dapat menjelaskan keterkaitan antara pulsa magnet dengan ion *cyclotron* dari sumber penggerak eksternal (*upstream waves*) yang dibangkitkan di *foreshock region* selama garis medan magnet antarplanet-IMF terhubung dengan *quasi-parallel bow shock* (Yumoto, 1986; Yumoto dan Saito,

1984). Dari beberapa penelitian yang pernah dilakukan (Troitskaya dan Bolshakova, 1988) didapatkan hubungan empiris antara frekuensi dominan pulsa magnet Pc3 dengan medan magnet antarplanet-IMF, $f(\text{mHz}) \sim 6(\text{nT})$.

Analisis tentang hubungan antara frekuensi dominan dari pulsa magnet Pc3 dengan magnitudo (**B**) dari medan magnet antarplanet-IMF telah dilakukan dengan seleksi paket-paket pulsa untuk semua stasiun yang teramati. Estimasi frekuensi diperoleh dari power spektrum pada saat puncak maksimum setiap rentang waktu 20 menit. Hubungan antara frekuensi dominan pulsa magnet Pc3 dengan medan magnet antarplanet-IMF ditunjukkan pada Gambar 3-3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk setiap stasiun menunjukkan nilai korelasi sebesar ($r = 0,7688$, KPG; $r = 0,6862$, MND; $r=0,7088$, PRP) dan berdasarkan regresi linier diperoleh hubungan empiris pada masing-masing stasiun KPG $f(\text{mHz}) = \sim 5,2B(\text{nT})$, MND $f(\text{mHz}) = \sim 4,9B(\text{nT})$, PRP $f(\text{mHz}) = \sim 4,7 B(\text{nT})$.



Gambar 3-3: Hubungan frekuensi dominan pulsa magnet Pc3 terhadap medan magnet antarplanet-IMF

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan data medan magnet Bumi stasiun Kupang, Manado dan Parepare pada 2010-2011, diperoleh bahwa amplitudo pulsa magnet Pc3 memiliki kecenderungan mengalami peningkatan pada waktu siang dan malam serta mengalami penurunan pada fajar dan petang. Hal ini terkait penjalaran gelombang ULF menuju arah-barat atau arah-timur yang dipengaruhi oleh ketidakstabilan *Kelvin-Helmoltz* di permukaan *magnetopause*. Perubahan kecepatan angin surya yang mempengaruhi amplitudo pulsa magnet Pc3 mengindikasikan peningkatan energi gelombang ULF pulsa magnet sebanding dengan energi kinetik partikel angin surya. Dari analisis terhadap frekuensi pulsa magnet Pc3 terkait dengan kondisi medan magnet antarplanet-IMF menunjukkan bahwa frekuensi dominan Pc3 berada pada rentang frekuensi 0,03-0,05 Hz dengan koefisien korelasi sebesar ($r = 0,7688$, KPG; $r = 0,6862$, MND; $r = 0,7088$, PRP). Dari hasil tersebut mengindikasikan bahwa angin surya merupakan salah satu sumber yang mengontrol perubahan yang terjadi pada pulsa magnet Pc3.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Kiyohumi Yumoto sebagai peneliti utama dari proyek CPMN/MAGDAS *International Center for Space Weather Science and Education* (ICSWSE) yang telah menginstal magnetometer di Indonesia.

DAFTAR RUJUKAN

- Bortnik, J., J. W. Cutler., C. Dunson., and T. E. Bleier, 2007. *An Automatic Wave Detection Algorithm Applied To Pc1 Pulsations*, Journal of Geophysical Research, Volume 112, A04204, Doi: 10.1029/2006JA011900.
- Feygin, F.Z., Karel Prikner., and Jorma Kangas, 2009. *Pc1 With a Broad Frequency Spectrum - Goose Pulsations*, Studia Geophysica et Geodaetica, Volume 53, Issue 4, 519-536.
- Jacobs, J. A., Y. Kato., S. Matsushita., and V. A. Troitskaya, 1964. *Classification of Geomagnetic Micropulsations*, Journal of Geophysical Research, Volume 69, 180.
- Mazur, V. A., and D. A. Chuiko, 2013. *Kelvin-Helmholtz Instability on The Magnetopause, Magnetohydrodynamic Waveguide in The Outer Magnetosphere, and Alfvén Resonance Deep in The Magnetosphere*, Plasma Physics Reports Book Series, Volume 39, Issue 6, p: 488-503.
- Menk, F.W, 2011. *Magnetospheric ULF Waves: A Review*, the Dynamic Magnetosphere IAGA Special Sopron Book Series, Volume 3, 223-256.
- Musafar, L. M, 2009. *Pc3 Magnetic Pulsations Observed by Ground-Based Magnetometer At Biak*, Prosiding Seminar Nasional, Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA, FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, 449-452.
- Pranoto, S. C, 2011. *Identifikasi Karakteristik Pulsa Magnet Pc3 Menggunakan Data Magnetometer Landas Bumi Stasiun Biak*, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Pusat Sains Antariksa, LAPAN, 464-473.
- Pudovkin, M.I., and Shumilov, O.I, 1969. *On The Theory of Polar Substorms*, Annales de Geophysique, Volume 25, N 1, 125-134.
- Taroyan, Y., and M. S. Ruderman, 2011. *MHD Waves and Instabilities in Space Plasma Flows*, Space Science Reviews Book Series, Volume 158, Issues 2-4, 505-523.
- Troitskaya, V. A., and O. V. Bolshakova, 1988. *Diagnostics of The Magnetosphere Using Multipoint Measurements of ULF-Waves*, Advances in Space Research, Volume 8, Issues 9-10, 413-425.
- Vallee, M.A., Larry Newitt., Ian R. Mann., Mouhamed Moussaoui., Re´ Gis Dumont., and Pierre Keating, 2007. *The*

- Spatial and Temporal Characteristics of Pc3 Geomagnetic Activity over Canada in 2000, as a Guide to Planning the Times of Aeromagnetic Surveys*, Pure Appl. Geophys, Volume 164, Issue 1, 161–176.
- Villante, U., P. Francia., M. Vellante, and P. di Giuseppe, 2003. *Some Aspects of the Low Latitude Geomagnetic Response under Different Solar Wind Conditions*, Space Science Reviews, Volume 107, 207–217.
- Yumoto, K., And Saito, T, 1984. *Relationship Between The IMF Magnitude And Pc3 Magnetic Pulsations In The Magnetosphere*, Journal of Geophysical Research, Volume 89, A11, 9731-9740.
- Yumoto, K, 1986. *Generation And Propagation Mechanisms Of Low-Latitude Magnetic Pulsations*, A review, Journal of Geophysical Research, Volume 60,79-105.