

KECEPATAN ANGIN MATAHARI DAN DAYA ULF Pc5 DI LINTANG RENDAH SEBAGAI PREKURSOR GANGGUAN DAN PENINGKATAN FLUKS ELEKTRON AKIBAT CME GEOEFEKTIF (SOLAR WIND SPEED AND Pc5 ULF POWER AT LOW-LATITUDE AS PRECURSOR OF DISTURBANCE AND ENHANCEMENT OF ELECTRON FLUX DUE TO GEOEFFECTIVE CMES)

Siska Filawati^{1,*} dan Fitri Nuraeni²

¹Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer Pasuruan, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

*e-mail: siska.filawati@lapan.go.id

Diterima 12 Desember 2018; Direvisi 27 Maret 2019; Disetujui 20 Mei 2019

ABSTRACT

Electron flux is one of the space weather parameters that needs to be monitored and predicted for the purpose of mitigating the negative effects of space weather. Solar storms caused by CME which will affect electron flux can be observed using space-based and ground-based data. The space-based data used are solar wind speed data from ACE satellite and electron flux from GOES 13 satellite. The ground-based data are magnetometer data from Biak and Parepare stations which will be used for calculating Pc5 power. Cross-correlation is used to evaluate the correlation between electron flux and two parameters which are solar wind speed and Pc5 power. The cross-correlation value of the solar wind speed with electron flux is higher than Pc5 power with electron flux. However, the maximum value of cross correlation of power Pc5 with electron flux occurs before that of solar wind speed with electron flux which means that Pc5 power is more effective as a precursor to electron flux enhancement.

Keywords: *electron flux, solar wind speed, Pc5 power, cross correlation, CME*

ABSTRAK

Fluks elektron merupakan salah satu parameter cuaca antariksa yang perlu dipantau dan diprediksi untuk keperluan mitigasi dampak negatif cuaca antariksa. Badai Matahari yang disebabkan oleh CME akan memengaruhi fluks elektron dan dapat diamati menggunakan data landas Bumi dan antariksa. Data lingkungan antariksa berupa kecepatan angin Matahari diperoleh dari satelit ACE dan fluks elektron diperoleh dari satelit GOES 13. Sedangkan data magnetometer dari stasiun Biak dan Parepare digunakan untuk perhitungan nilai daya Pc5. Korelasi silang digunakan untuk mengetahui korelasi antara fluks elektron dan dua parameter lain, yakni kecepatan angin Matahari dan daya Pc5. Nilai korelasi silang kecepatan angin Matahari dengan fluks elektron lebih tinggi dibanding dengan daya Pc5 dengan fluks elektron. Namun, nilai maksimum korelasi silang daya Pc5 dengan fluks elektron terjadi sebelum kecepatan angin Matahari dengan fluks elektron yang artinya bahwa daya Pc5 lebih efektif sebagai prekursor terhadap peningkatan fluks elektron.

Kata kunci: *fluks elektron, kecepatan angin Matahari, daya Pc5, korelasi silang, CME*

1 PENDAHULUAN

Sabuk radiasi elektron merupakan salah satu bagian dalam magnetosfer yang berisi elektron dengan ketinggian 1 hingga 7 radius Bumi (R_E).

Sabuk radiasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu sabuk radiasi elektron dalam dan sabuk radiasi elektron luar yang merupakan tempat orbit satelit telekomunikasi dan navigasi. Badai dari

Matahari dapat memengaruhi kondisi sabuk radiasi elektron.

Faktor utama yang memengaruhi fluks elektron adalah aktivitas Matahari yang menjadi sumber gangguan, yakni *Coronal Mass Ejection* (CME) atau *Corotating Interaction Region* (CIR) (Filawati dan Nuraeni, 2017; Filawati, 2018; Kataoka dan Miyoshi, 2006). CME geoeftif adalah CME tipe halo yang terjadi di meridian pusat hingga bagian barat Matahari (Oprea *et al.*, 2013), memiliki kecepatan lebih dari 1000 km/s (Scolini *et al.*, 2018), dan selalu didahului dengan *flare* setidaknya kelas M1.0 (Gopalswamy *et al.*, 2015). CIR merupakan peristiwa di wilayah antarplanet yang diakibatkan oleh interaksi antara angin Matahari berkecepatan tinggi berinteraksi dengan angin Matahari berkecepatan rendah (Heber *et al.*, 1999).

Kondisi antarplanet dapat dijadikan sebagai kondisi awal untuk menentukan kondisi magnetosfer Bumi, salah satunya adalah kondisi sabuk radiasi elektron. Beberapa besaran yang digunakan untuk mengetahui kondisi antarplanet adalah kecepatan dan kerapatan angin Matahari serta medan magnet antarplanet. Parameter untuk mengetahui kondisi sabuk radiasi elektron adalah fluks elektron. Fluks elektron diamati oleh satelit GOES 13 yang terletak di sabuk radiasi elektron bagian luar. Elektron dengan energi > 2 MeV dapat memengaruhi kondisi satelit secara signifikan. Keterkaitan wilayah antarplanet dengan fluks elektron dapat dilihat dari kondisi medan magnet antarplanet arah vertikal (B_z) dan kecepatan angin Matahari. Fluks elektron akan mengalami peningkatan sekitar 2-3 hari dari kondisi minimum ataupun maksimum B_z (Filawati, 2018) dan korelasi antara fluks elektron dengan kecepatan angin Matahari menunjukkan korelasi positif (Paulikas dan Blake, 1979; Takahashi dan Ukhorskiy, 2008; Potapov *et al.*, 2016).

Ultra Low Frequency (ULF) merupakan gelombang dengan frekuensi rendah (1 mHz hingga 5 Hz) atau pada periode 150 hingga 600 detik (Musafar *et al.*, 2014; Regi *et al.*, 2015). Frekuensi ULF pada 1,7 mHz hingga 6,7 mHz disebut sebagai pulsa kontinu pita kelima atau Pc5 yang memiliki pengaruh terhadap peningkatan fluks elektron di orbit geosinkron (Regi *et al.*, 2015).

Peningkatan fluks elektron dikaitkan dengan kondisi daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari (Mann *et al.*, 2004). Proses dinamika tersebut dijelaskan dalam ketidakstabilan Kelvin-Helmholtz (K-H) yang diakibatkan oleh interaksi angin Matahari dengan magnetosfer. Tekanan gelombang (energi) yang disebabkan oleh ketidakstabilan K-H di magnetosfer dapat beresonansi dengan gelombang Alfvén dan berinteraksi dengan elektron sehingga dapat meningkatkan fluks elektron (Rostoker *et al.*, 1998; Mann *et al.*, 2004; Takahashi *et al.*, 2012; Regi *et al.*, 2015).

Ketidakstabilan K-H melibatkan interaksi dua gelombang dengan kecepatan yang berbeda (Hwang *et al.*, 2011). Kondisi ketidakstabilan K-H pada plasma yang termagnetisasi dijelaskan oleh Chandrasekar, 1961 sebagai

$$[\mathbf{k} \cdot (V_1 - V_2)^2] > \frac{n_1 + n_2}{4\pi m_0 n_1 n_2} [(\mathbf{k} \cdot B_1)^2 + (\mathbf{k} \cdot B_2)^2] \quad (1-1)$$

dengan \mathbf{k} menyatakan arah perambatan gelombang, V dan B adalah kecepatan dan medan magnet yang diberikan pada titik tertentu. Ketidakstabilan K-H terjadi akibat aliran energi, momentum, dan massa partikel yang besar saat *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) menunjukkan aktivitas dalam arah utara (Farfield *et al.*, 2000).

Korelasi daya Pc5 di Gillam Station (66,46° LU, 6,27 BB) dengan fluks elektron menunjukkan peningkatan aktivitas pada dini hari hingga siang hari (Rostoker, *et al.*, 1998; Vassiliadis, *et al.*, 2007). Hubungan

korelasi antara fluks elektron dengan kecepatan angin Matahari dan Pc5 menunjukkan korelasi positif (Paulikas dan Blake, 1979; Takahashi dan Ukhorskiy, 2008; Potapov, *et al.*, 2016). Dalam kurun waktu satu hari, kecepatan angin Matahari menunjukkan peningkatan setelah daya Pc5 meningkat. Sementara itu, nilai maksimum korelasi kecepatan angin Matahari dan Pc5 mencapai saat siklus Matahari minimum (Mann, *et al.*, 2004; Kellermen dan Shprits, 2012; Reeves, *et al.*, 2011) dan terjadi pada pagi hari (Mathie dan Mann, 2000).

Karakteristik Pc5 di lintang tinggi dan rendah memiliki perbedaan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lepidi *et al.* (1999) dan Lepidi dan Francia (2003), Pc5 di lintang tinggi menunjukkan aktivitas yang kompleks dan tidak mengalami perubahan arah polarisasi, sedangkan di lintang rendah polarisasi berubah arah dari berlawanan jarum jam di pagi hari menjadi searah jarum jam di siang hari dan terjadi peningkatan polarisasi saat frekuensi 2 mHz di musim panas.

Hubungan Pc5 dan kecepatan angin Matahari terhadap fluks elektron bukanlah hubungan linier (Takahashi dan Ukhorskiy, 2008). Kejadian di wilayah antarplanet merupakan peristiwa beruntun dari aktivitas Matahari. CME berkecepatan tinggi berinteraksi dengan plasma yang berkecepatan lebih rendah di wilayah antarplanet dapat dikategorikan sebagai *High Speed Stream* (HSS) dengan CME saja akan menimbulkan dampak yang berbeda terhadap magnetosfer (Vassiliadis *et al.*, 2007; Takahashi dan Ukhorskiy, 2008). Dalam prosesnya, analisis terhadap fluks elektron, parameter angin Matahari, dan Pc5 dilakukan dalam berbagai macam pendekatan ilmiah. Namun, penalaran gelombang dan energi dari Matahari ke magnetosfer dapat dijelaskan dengan ketidakstabilan K-H dan *Magnetohydrodynamics* (MHD).

Pengamatan fluks elektron diperlukan untuk mengetahui proses penalaran badai Matahari ke Bumi. Besarnya fluks elektron di magnetosfer dapat memengaruhi densitas elektron di ionosfer yang selanjutnya dapat memengaruhi ketinggian lapisan F2 (Mao *et al.*, 2015) sehingga mengakibatkan proses refraksi gelombang radio terganggu. Selain itu, pengamatan fluks elektron juga berguna untuk mitigasi satelit komunikasi dan navigasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tanda-tanda gangguan dan peningkatan fluks elektron dengan meninjau data kecepatan angin Matahari sebagai parameter kondisi wilayah antarplanet dan daya Pc5 yang merupakan data medan magnet dari magnetometer landas Bumi untuk mengetahui gangguan geomagnet yang terjadi.

2 METODOLOGI

2.1 Data

Data medan magnet komponen horisontal (H) diambil dari stasiun Parepare (PRP) pada tahun 2015-2016 dan stasiun Biak (BIK) pada tahun 2017. Data PRP dan BIK memiliki resolusi temporal 1 detik. Pemilihan data di kedua stasiun tersebut berdasarkan lokasi seperti yang tertera pada Tabel 2-1 dan ketersediaan data.

Tabel 2-1: LOKASI STASIUN PENGAMATAN

Kode Stasiun	Koordinat Geografis	Koordinat Geomagnet	Waktu Lokal
BIK	-1,08 LS, 136,05 BT	-9,15, -152,42	UT+9
PRP	-3,6 LS, 119,4 BT	-8,26, -169,02	UT+8

Data fluks elektron dengan energi > 2 MeV (dirata-ratakan setiap 5 menit) berasal dari satelit GOES 13 yang tersedia dalam arsip NOAA (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/>). Untuk analisis lebih lanjut, data tersebut diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata setiap jam. Data fluks

elektron dari satelit GOES 13 dipilih atas pertimbangan ketersediaan data.

Data kecepatan angin Matahari diambil dari arsip data OMNIWeb (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html/>). Kecepatan angin Matahari dinyatakan satuan km/detik.

Data tersebut akan dianalisis berdasarkan kejadian CME dengan bentangan erupsi lebih dari 270° dan ketersediaan data komponen H medan magnet Bumi tahun 2015 hingga 2017. Berdasarkan data pengamatan LASCO pada September 2015, Januari 2016, dan September 2017, terjadi beberapa kali peristiwa CME dengan lebar sudut erupsi lebih dari 270° dalam satu hari selama beberapa hari. Oleh karena itu, peristiwa CME yang dicatat adalah CME dengan lebar sudut terbesar dalam satu hari.

2.2 Perhitungan Daya Pc5

Nilai komponen H geomagnet, fluks elektron, dan kecepatan angin Matahari diambil berdasarkan tanggal peristiwa CME. Data komponen H geomagnet diolah menjadi data daya Pc5 dengan mereduksi derau. Selanjutnya, proses transformasi Fourier dilakukan untuk mengubah data deret waktu menjadi data frekuensi.

Hasil transformasi Fourier digunakan untuk memfilter data sesuai dengan frekuensi Pc5 yang digunakan, yaitu 1/600 Hz hingga 1/150 Hz. Metode filter yang digunakan adalah *Butterworth* yang dirancang untuk mendapatkan tanggapan frekuensi datar pada wilayah frekuensi yang diloloskan. *Butterworth* memiliki *slope* dengan nilai 20n dB, n merupakan orde yang digunakan. Daya Pc5 didefinisikan sebagai

$$P = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t p_i^2 \quad (2-1)$$

Satuan daya Pc5, P, adalah nT² dan t merupakan waktu dalam satuan detik karena nilai komponen H yang digunakan dinyatakan dalam satuan

detik. P merupakan penjumlahan kuadrat nilai Pc5 tiap jam.

Interpolasi data kosong (tidak terekam) dilakukan setelah data dikumpulkan dan didapatkan nilai daya Pc5. Ada beberapa data yang diperoleh melalui proses interpolasi, baik data daya Pc5, fluks elektron, maupun kecepatan angin Matahari. Interpolasi yang digunakan adalah interpolasi *nearest*, yaitu penentuan nilai di antara dua nilai yang mendekati nilai awal.

2.3 Korelasi Silang

Metode korelasi silang dilakukan terhadap data lengkap (setelah interpolasi). Korelasi silang merupakan perhitungan korelasi terhadap dua persamaan sebagai fungsi yang saling memengaruhi satu sama lain. Selain itu, korelasi silang juga dapat menyatakan arah hubungan dua persamaan yang terkait. Dalam makalah ini, korelasi silang dilakukan pada data fluks elektron yang dipengaruhi oleh kecepatan angin Matahari dan daya Pc5. Korelasi silang didefinisikan sebagai,

$$(f * g)(k) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+k) \quad (2-2)$$

dengan f^* merupakan konjugat persamaan $f(t)$, t merupakan waktu yang digunakan dalam observasi, dan k adalah *lag time* (waktu jeda) yang dalam makalah ini berkisar antara -14 hingga +14 hari dengan resolusi 1 jam. Nilai korelasi silang yang didapatkan dari perhitungan dibandingkan dengan nilai r terhadap k - r(k) saat nilai korelasi silang maksimum.

$$r(k) = \frac{2}{\sqrt{n-|k|}} \quad (2-3)$$

Pada persamaan (2-3), n menyatakan banyaknya data observasi, dan r merupakan nilai korelasi silang pada tiap nilai k.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kecepatan angin Matahari dapat dijadikan kondisi awal untuk

mengetahui kondisi wilayah antarplanet yang disebabkan oleh badai Matahari beserta pengaruhnya di Bumi. Salah satunya adalah untukantisipasi peningkatan fluks elektron di orbit geostasioner. Peningkatan fluks elektron dapat diketahui dari peningkatan kecepatan angin Matahari (Paulikas dan Blake, 1979) dan memiliki tingkat korelasi yang tinggi dengan daya Pc5 (Regi *et al.*, 2015).

CME merupakan salah satu penyebab meningkatnya fluks elektron. CME dapat mengakibatkan badai geomagnet karena memengaruhi kondisi medan magnet antarplanet Bz menuju arah selatan dalam durasi yang lama (Crooker, 2000). Saat Bz mengarah ke selatan, energi angin Matahari dapat lolos dan berinteraksi dengan magnetosfer. Interaksi tersebut menimbulkan turbulensi di *magnetosheath* menuju magnetosfer yang mengakibatkan peningkatan aktivitas geomagnet (Singh *et al.*, 2013).

Gangguan yang diakibatkan oleh CME dipantau melalui kondisi wilayah antarplanet (dalam makalah ini adalah kecepatan angin Matahari) dan kondisi di magnetosfer dengan perhitungan daya Pc5 dari data komponen H medan magnet landas Bumi yang menunjukkan peningkatan (lonjakan). Sementara itu, fluks elektron akan menunjukkan penurunan.

Data dikelompokkan berdasarkan kecepatan angin Matahari dan daya Pc5. Pengelompokkan ini dimaksudkan untuk mengetahui penjalaran energi yang terjadi di magnetosfer dari nilai Pc5 dan kecepatan angin Matahari yang merupakan prekursor peningkatan fluks elektron. Analisis korelasi silang dilakukan untuk mengetahui hubungan kecepatan angin Matahari terhadap fluks elektron (SW-EF) dan daya Pc5 terhadap fluks elektron (Pc5-EF) tahun 2015 hingga 2017.

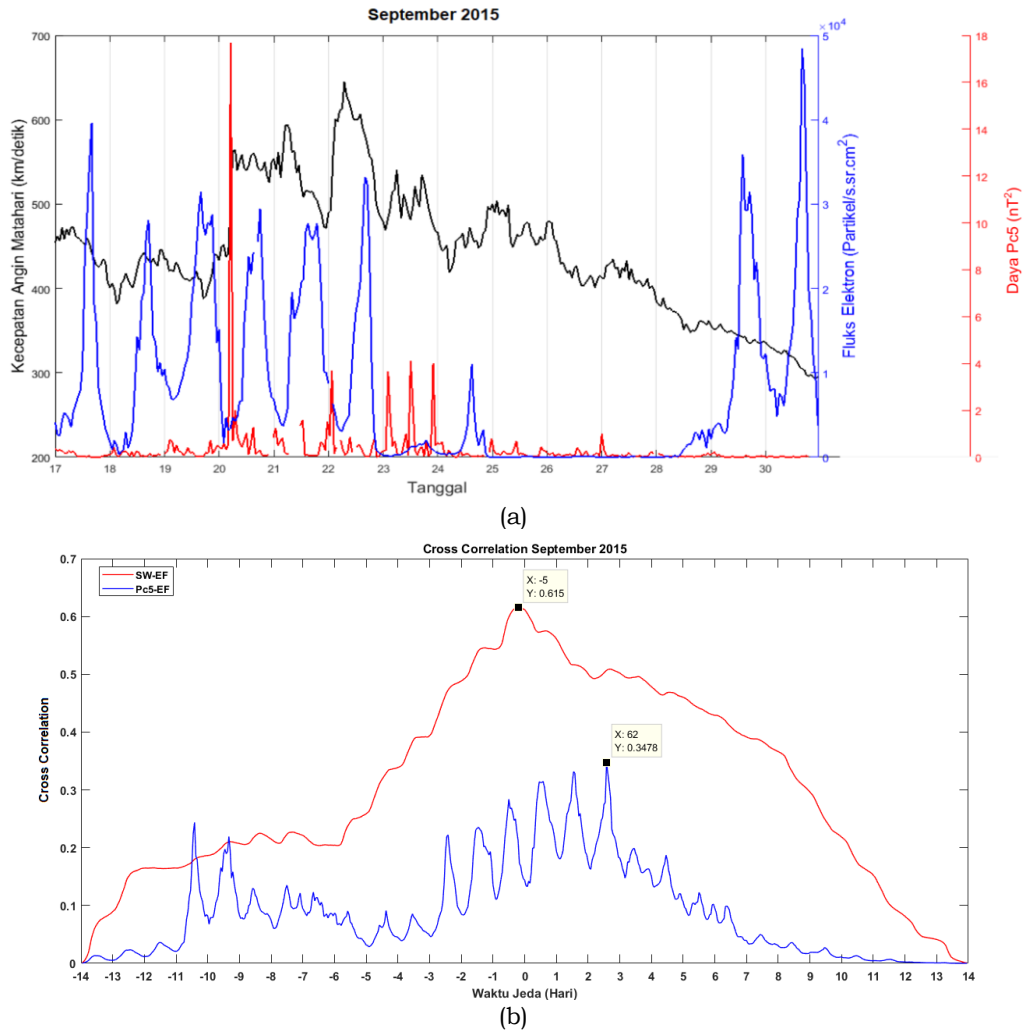
Gambar 3-1 (a) merupakan kondisi fluks elektron, daya Pc5, dan

kecepatan angin Matahari yang dibandingkan satu sama lain. Parameter yang ditunjukkan pada Gambar 3-1 berkaitan dengan peristiwa peningkatan daya Pc5 bertepatan dengan peningkatan kecepatan angin Matahari. Nilai daya Pc5 mencapai puncaknya pada 20 September 2015 dengan nilai 18 nT^2 dan bersamaan dengan nilai kecepatan angin Matahari yang meningkat hingga lebih dari 550 km/s . Namun, nilai kecepatan angin Matahari mencapai puncaknya pada 22 September 2015 sebesar 650 km/s yang bersamaan dengan nilai daya Pc5 yang meningkat hingga mencapai 4 nT^2 .

Kondisi fluks elektron dikelompokkan menjadi tiga, yaitu rendah (fluks elektron < 580 partikel/cm²/s/sr), sedang ($580\text{-}5800$ partikel/cm²/s/sr), dan tinggi (> 5800 partikel/cm²/s/sr) (Wrenn *et al.*, 2002).

Kondisi fluks elektron saat daya Pc5 mencapai 18 nT^2 tanggal 20 September 2015 menunjukkan aktivitas sedang bernilai sekitar 5000 partikel/cm²/s/sr yang terjadi pada dini hari waktu UTC (*Coordinated Universal Time*). Fluks elektron menunjukkan penurunan saat dini hari waktu UTC dan akan kembali ke kondisi awal pada siang hari waktu UTC (Reeves *et al.*, 1998), yaitu 30000 partikel/cm²/s/sr.

Fluks elektron mengalami gangguan pada 23 September 2015 karena partikel Matahari sampai di wilayah sabuk radiasi Matahari. Sabuk radiasi Matahari yang mengandung banyak elektron berinteraksi dengan partikel Matahari dan mengalami peningkatan tekanan sehingga ketinggian sabuk radiasi Matahari akan turun dan menyebabkan nilai fluks elektron rendah di ketinggian $5,5 R_E$. Fluks elektron mengalami peningkatan pada 29 September 2018 yang pada saat itu daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari menunjukkan aktivitas normal, yaitu $\sim 0 \text{ nT}^2$ dan $\sim 350 \text{ km/s}$.



Gambar 3-1: (a) Kecepatan angin Matahari (hitam), fluks elektron (biru), dan daya Pc5 (merah) pada tanggal 17-30 September 2015; (b) Hasil korelasi silang dari SW-EF (merah) dan Pc5-EF (biru)

Hasil korelasi silang pada September 2015 ditunjukkan oleh Gambar 3-1 (b) dan dirangkum dalam Tabel 3-1. Perbandingan antara nilai korelasi silang SW-EF dengan Pc5-EF adalah 0,615 : 0,347.

Nilai $r(k)$ SW-EF dan Pc5-EF lebih rendah dibanding dengan nilai maksimum korelasi silang, artinya kecepatan angin Matahari dan Pc5 memengaruhi kondisi fluks elektron secara signifikan. Semakin tinggi nilai korelasi silang, semakin tinggi pengaruhnya terhadap kondisi fluks elektron.

Nilai k SW-EF adalah -5 jam dan Pc5-EF adalah 62 jam. Jika ditinjau kembali Gambar 3-1 (b), nilai korelasi

silang mengalami lonjakan hingga 0,245 pada $k = -264$ jam. Nilai negatif (-) pada k menunjukkan bahwa kecepatan angin Matahari atau daya Pc5 mengalami peningkatan sebelum terjadi gangguan pada fluks elektron.

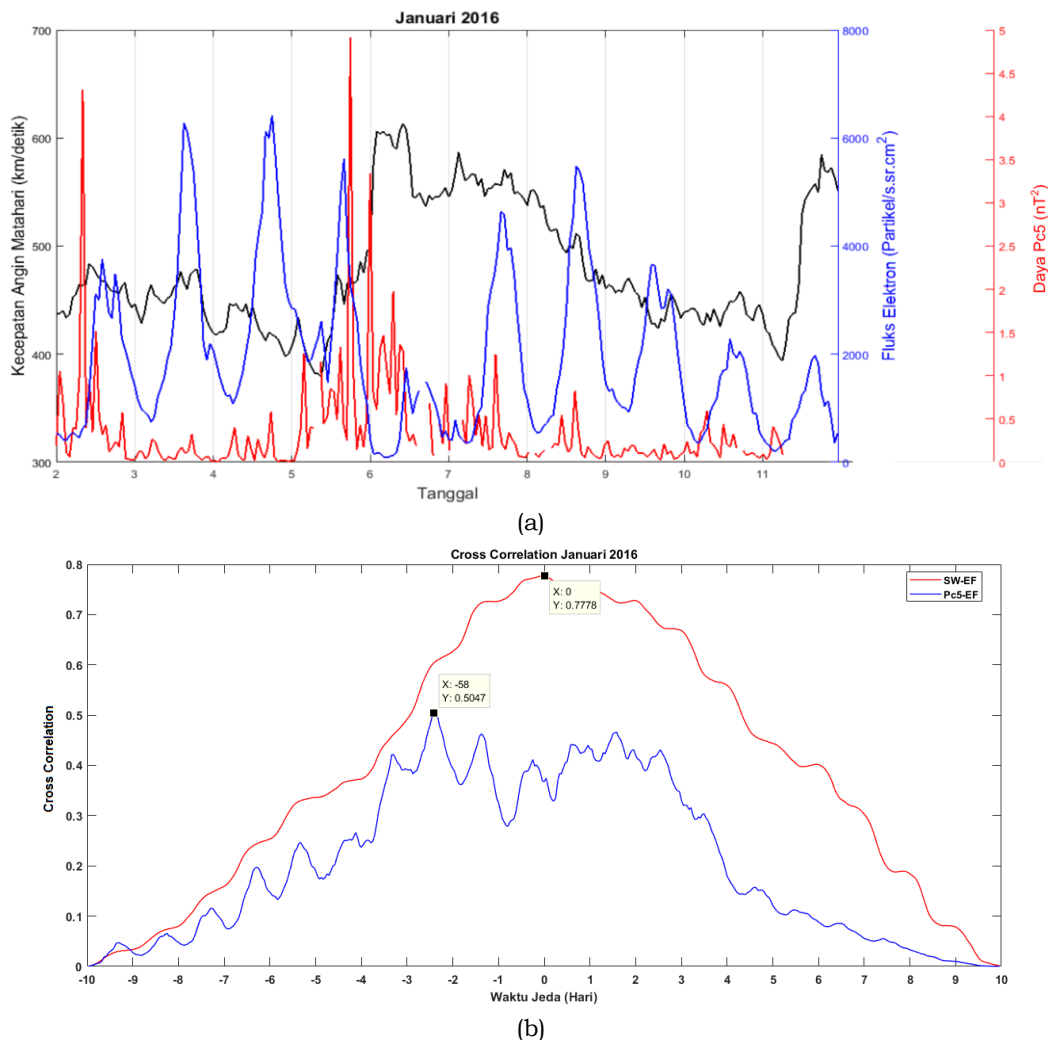
Berdasarkan hasil korelasi silang September 2015 dapat diketahui bahwa nilai k pada Pc5-EF dapat bernilai positif dan negatif. Hal ini dapat dijelaskan melalui mekanisme penjalaran gelombang Alfvén yang memengaruhi kecepatan angin Matahari di *magnetosheath* dan ketidakstabilan K-H yang memengaruhi daya Pc5. Jika densitas angin Matahari meningkat, ketidakstabilan K-H akan naik dan menyebabkan kecepatan Alfvén di

magnetosheath menurun sehingga puncak daya Pc5 akan dicapai sebelum puncak kecepatan angin Matahari (Mann *et al.*, 2004).

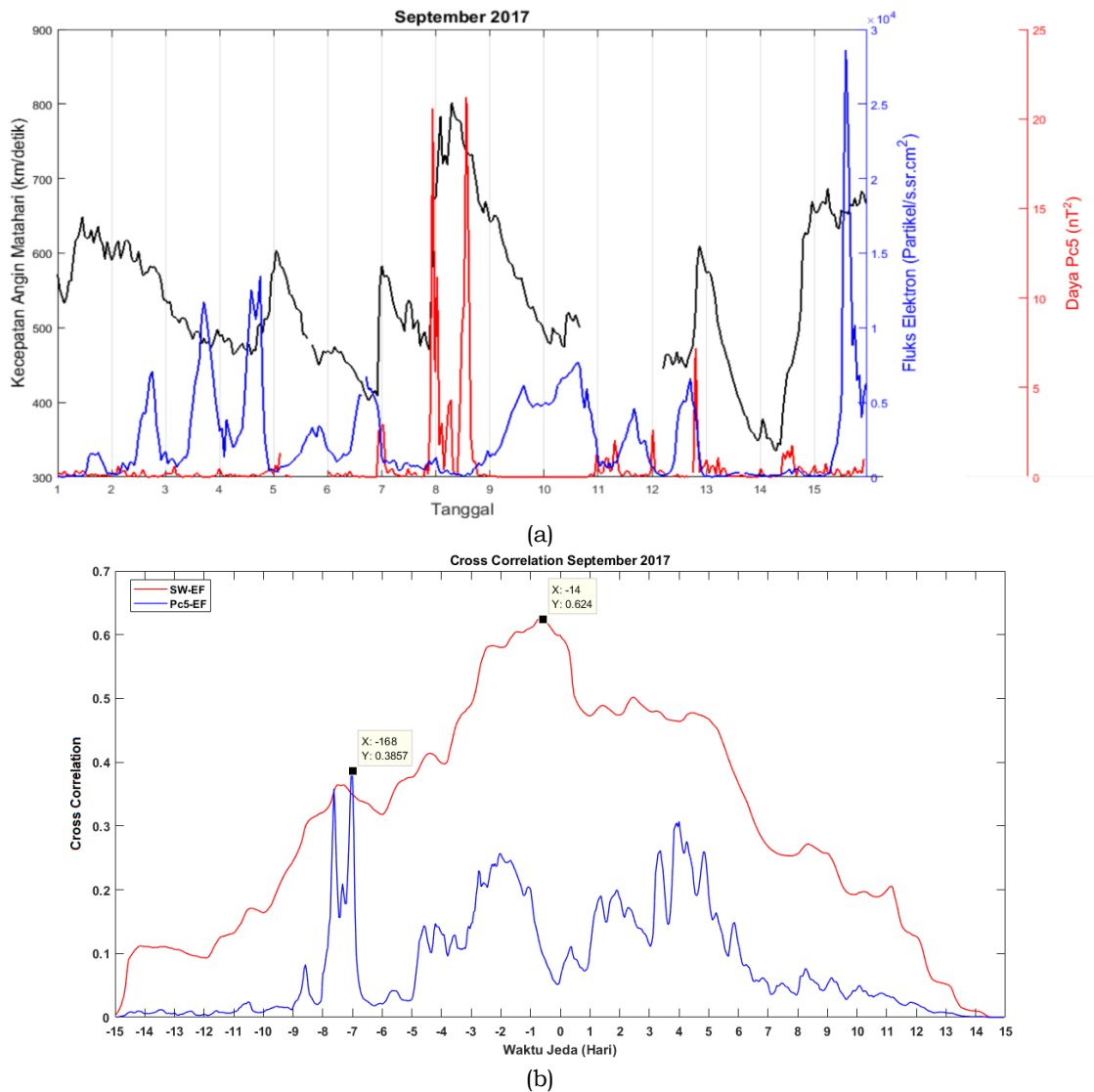
Daya Pc5 pada bulan Januari 2016 meningkat tajam sebelum kecepatan angin Matahari mengalami peningkatan yang ditunjukkan oleh Gambar 3-2 (a). Daya Pc5 meningkat pada tanggal 2 dan 5 Januari 2016, sedangkan kecepatan angin Matahari meningkat pada tanggal 6 Januari 2016. Gangguan fluks elektron teramati pada 6

Januari 2016 tepat saat kecepatan angin Matahari meningkat. Daya Pc5 mencapai $4,5 \text{ nT}^2$ pada tanggal 2 Januari 2016 dan 5 nT^2 pada tanggal 5 Januari 2016.

Kondisi kecepatan angin Matahari menunjukkan penurunan dari tanggal 2 Januari 2016 dengan nilai sekitar 490 km/jam ke 380 km/jam pada tanggal 5 Januari 2016. Kondisi ini berubah pada tanggal 6 Januari 2016, yaitu terjadi peningkatan tajam dari 380 km/s menuju lebih dari 600 km/s yang diikuti oleh penurunan nilai fluks elektron.



Gambar 3-2: (a) Kecepatan angin Matahari (hitam), fluks elektron (biru), dan daya Pc5 (merah) pada tanggal 2-11 Januari 2016; (b) Hasil korelasi silang dari SW-EF (merah) dan Pc5-EF (biru)



Gambar 3-3: (a) Kecepatan angin Matahari (hitam), fluks elektron (biru), dan daya Pc5 (merah) pada tanggal 1-15 September 2017; (b) Hasil korelasi silang dari SW-EF (merah) dan Pc5-EF (biru)

Kondisi fluks elektron saat daya Pc5 meningkat pada tanggal 2 Januari 2016 adalah pada kondisi sedang, yaitu pada nilai 3000 partikel/cm²/s/sr hingga kondisi tinggi, yaitu lebih dari 6000 partikel/cm²/s/sr pada tanggal 4 Januari 2016 dini hari waktu UTC dan terpantau menurun pada tanggal berikutnya. Fluks elektron mengalami peningkatan pada tanggal 7 Januari 2016 saat kondisi kecepatan angin Matahari menurun dan daya Pc5 pada kondisi normal.

Hasil korelasi silang Januari 2016 pada Gambar 3-2 (b) dan dirangkum pula

dalam Tabel 3-1 menunjukkan bahwa nilai korelasi silang SW-EF lebih besar dibanding dengan Pc5-EF.

Nilai $r(k)$ SW-EF dan Pc5-EF lebih rendah dibanding nilai maksimum korelasi silang yang artinya kecepatan angin Matahari dan daya Pc5 memengaruhi kondisi fluks elektron secara signifikan.

Nilai k SW-EF adalah 0 jam dan Pc5-EF adalah -58 jam yang dapat diartikan bahwa Pc5 dapat mendeteksi gangguan yang akan terjadi pada fluks elektron lebih awal dibanding dengan kecepatan angin Matahari.

Tabel 3-1: HASIL KORELASI SILANG

Tanggal		Nilai Maksimum Korelasi Silang	k [jam]	$r(k)$
17-30 September 2015	SW-EF	0,615	-5	0,110
	Pc5-EF	0,347	62	0,121
2-11 Januari 2016	SW-EF	0,778	0	0,123
	Pc5-EF	0,505	-58	0,139
1-15 September 2017	SW-EF	0,624	-14	0,101
	Pc5-EF	0,386	-168	0,144

Pada bulan September 2017, lonjakan terjadi pada daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari pada tanggal yang sama, yaitu tanggal 7 September 2017 dengan nilai masing-masing sekitar 4 nT^2 dan 600 km/s yang disertai dengan penurunan fluks elektron yang sebelumnya bernilai kurang dari $3000 \text{ partikel/cm}^2/\text{s}/\text{sr}$.

Peningkatan daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari mencapai puncaknya pada tanggal 8 dan 9 September 2017. Pada tanggal tersebut daya Pc5 meningkat hingga lebih dari 20 nT^2 dan kecepatan angin Matahari mencapai lebih dari 800 km/s serta kondisi fluks elektron masih tergolong rendah. Fluks elektron mengalami peningkatan lebih dari $25000 \text{ partikel/cm}^2/\text{s}/\text{sr}$ pada tanggal 15 September 2017 yang pada saat itu kondisi daya Pc5 menunjukkan aktivitas normal, sedangkan kecepatan angin Matahari masih tinggi, yaitu mencapai lebih dari 600 km/s .

Hasil korelasi silang bulan September 2017 pada Gambar 3-3 (b) menunjukkan bahwa nilai korelasi silang SW-EF lebih besar dibanding dengan Pc5-EF. Nilai $r(k)$ SW-EF dan Pc5-EF lebih rendah dibanding nilai maksimum korelasi silang yang artinya kecepatan angin Matahari dan daya Pc5 memengaruhi kondisi fluks elektron secara signifikan.

Nilai k SW-EF adalah -14 jam dan Pc5-EF adalah -168 jam yang dapat diartikan bahwa kecepatan angin Matahari dan daya Pc5 telah

menunjukkan tanda-tanda (prekursor) akan memengaruhi fluks elektron dalam 14 jam dan 168 jam sebelum fluks elektron mengalami gangguan, yaitu dengan menurunnya nilai fluks elektron. Selain itu, Pc5 dapat mendeteksi gangguan yang akan terjadi pada fluks elektron lebih awal dibanding dengan kecepatan angin Matahari.

Tiga peristiwa yang terjadi pada tahun 2015, 2016, dan 2017 menunjukkan bahwa peningkatan daya Pc5 tidak selalu bertepatan dengan peningkatan kecepatan angin Matahari. Daya Pc5 dalam beberapa kejadian akan menunjukkan peningkatan lebih awal. Hal ini disebabkan oleh terjadinya peningkatan densitas di wilayah antarplanet yang akan meningkatkan ketidakstabilan K-H sehingga menyebabkan menurunnya kecepatan Alfvén di *magnetosheath*. Oleh karena itu, gelombang permukaan ketidakstabilan K-H yang diterima oleh magnetometer landas Bumi akan meningkat (Mann *et al.*, 2004).

Hasil korelasi silang menunjukkan bahwa nilai maksimum korelasi silang SW-EF lebih besar dibanding dengan Pc5-EF. Hal ini menandakan bahwa kecepatan angin Matahari lebih memengaruhi kondisi fluks elektron dibanding dengan daya Pc5. Di lain pihak, nilai maksimum korelasi silang Pc5-EF terjadi sebelum SW-EF, artinya daya Pc5 dapat dijadikan prekursor gangguan fluks elektron.

Fluks elektron menunjukkan peningkatan sekitar 2 hari setelah

kecepatan angin Matahari meningkat (Mann *et al.*, 2004). Namun, dalam makalah ini peningkatan fluks elektron terjadi sekitar 2-6 hari setelah kecepatan angin Matahari dan daya Pc5 meningkat. Hal ini terjadi karena hubungan kecepatan angin Matahari dan daya pc5 terhadap fluks elektron bukanlah hubungan linear, melainkan melibatkan parameter dan perhitungan lainnya. Selain itu, setiap peristiwa antariksa memiliki karakter yang tidak dapat dinyatakan sama persis dampaknya meskipun sumber gangguannya sama (Vassiliadis *et al.*, 2007; Takahashi dan Ukhorskiy, 2008). Oleh karena itu, tiga peristiwa ini belum menggambarkan secara umum karakteristik daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari memengaruhi fluks elektron. Namun, pengetahuan mengenai karakter prekursor daya Pc5 dan kecepatan angin Matahari yang telah dipaparkan melalui makalah ini diharapkan dapat dijadikan referensi untuk mitigasi bencana antariksa, terutama dalam pengoperasian satelit.

4 KESIMPULAN

Kecepatan angin Matahari lebih berpengaruh terhadap peningkatan fluks elektron dibanding dengan daya Pc5 karena besarnya nilai maksimum korelasi silang kecepatan angin Matahari dan fluks elektron lebih besar dibandingkan dengan daya Pc5 dan fluks elektron. Namun, sebagai prekursor kondisi fluks elektron, daya Pc5 lebih efektif dibanding dengan kecepatan angin Matahari yang ditunjukkan oleh nilai korelasi silang daya Pc5 dan fluks elektron meningkat sebelum kecepatan angin Matahari dan fluks elektron.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NOAA atas ketersediaan data kecepatan angin Matahari dan fluks elektron serta kepada Pussainsa atas ketersediaan data magnetometer dari stasiun Biak dan Parepare tahun 2015, 2016, dan 2017.

DAFTAR RUJUKAN

- Chandrasekar, S., 1961. *Hydromagnetic Stability*, Clarendon Press.
- Crooker, N.U., 2000. *Solar and Heliospheric Geoeffective Disturbances*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 62, 1071-1085.
- Farfield, D.H., A. Otto, T. Mukai, S. Kokubun, R.P. Lepping, J.T. Steinberg, A.J. Lazarus, dan T. Yamamoto, 2000. *Geotail Observations of the Kelvin-Helmholtz Instability at the Equatorial Magnetotail Boundary for Parallel Northward Fields*, Journal of Geophysical Research, 105, 159-173.
- Filawati, S., 2018. *Analysis of Electron Flux Condition in Outer Electron Radiation Belt Based on Interplanetary Magnetic Field (Bz) and Solar Wind Speed*. Jurnal Sains Dirgantara, 15(1), 39-50.
- Filawati, S. dan F. Nuraeni, 2017. *Pengaruh CIR dan CME Terhadap Fluks Elektron Sepanjang Tahun 2011*, Prosiding Seminar Nasional Sains Antariksa. Bandung, 22 November 2016.
- Gopalswamy, N., H. Xie, S. Akiyama, P. Makela, S. Yashiro, dan G. Michalek, 2015. *The Peculiar Behavior of Halo Coronal Mass Ejection in Solar Cycle 24*, The Astrophysical Journal Letters, 80 4.
- Heber, B., T.R. Sanderson, dan M. Zhang, 1999. *Corotating Interaction Region*, Advances in Space Research, 23 (3): 567-579.
- Hwang, K.J., M.M. Kuznetsova, F. Suhrroui, M.L. Goldstein, E. Lee, dan G.K. Parks, 2011. *Kelvin-Helmholtz Waves under Southward Interplanetary Magnetic Field*, Journal of Geophysical Research, 116, A08210.
- Kataoka, R., dan Y. Miyoshi, 2006. *Flux Enhancement of Radiation Belt Electrons during Geomagnetic Storms Driven by Coronal Mass Ejections and Corotating Interaction Regions*, Space Weather: The International Journal of Research and Applications, 4, S09004.
- Kellermen, A.C. dan Y.Y. Shprits, 2012. *On The Influence of Solar Wind Conditions on the Outer-Electron Radiation Belt*, Journal of Geophysical Research, 117, A05217.

- Lepidi, S., P. Francia, U. Villante, L.J. Lanserotti, dan A. Meloni, 1999. *Polarization pattern of Low-Frequency Geomagnetic Field Fluctuations (0.8-3.6 mHz) at High and Low Latitude*, Journal of Geophysical Research, 104, A1, 305-310.
- Lepidi, S. dan P. Francia, 2003. *Diurnal Polarization Pattern of ULF Geomagnetic Pulsations in the Pc5 Band from Low to Polar Latitudes*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65, 1179-1185.
- Mann, I.R., T.P. O'Brien, dan D.K. Milling, 2004. *Correlations Between ULF Wave Power, Solar Wind Speed, and Relativistic Electron Flux in the Magnetosphere: Solar Cycle Dependence*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66, 187-198.
- Mao, T., L. Sun, L. Hu, Y. Wang, dan Z. Wang, 2015. *A Case Study of Ionospheric Storm Effects in the Chinese Sector During the October 2013 Geomagnetic Storm*, Advances in Space Research, 56, 2030-2039.
- Mathie, R.A. dan I.R. Mann, 2000. *A Correlation Between Extended Intervals of ULF Wave Power and Storm-time Geosynchronous Relativistic Electron Flux Enhancements*, Geophysical Research Letters, 27 (20), 3261-3264.
- Musafar, L.M., Triyanta, W. Sugitomo, T. Djamaluddin, A. Yishikawa, dan T. Uozumi, 2014. *Pc5 Magnetic Pulsations During the Outer Electron Radiation Belt*, International Journal of Technology, 3, 269-276.
- Oprea, C., M. Mierla, D. Besliu-Ionescu, O. Stere, dan G.M. Muntean, 2013. *A Study of Solar and Interplanetary Parameters of CMEs causing Geomagnetic Storms During SC 23*, Ann. Geophys., 31, 1285-1295.
- Paulikas, G.A. dan J.B. Blake, 1979. *Effects of the Solar Wind on Magnetospheric Dynamics: Energetic Electrons at the Synchronous Orbit*, American Geophysical Union, 21, 180-202.
- Potapov, A., L. Ryzhakova, dan B. Tsegmed, 2016. *A New Approach to Predict and Estimate Enhancements of "Killer" Electron Flux at Geosynchronous Orbit*, Acta Astronautica, 126, 47-51.
- Regi, M., M.D. Lauretis, dan P. Francia, 2015. *Pc5 Geomagnetic Fluctuations in Response to Solar Wind Excitation and Their Relationship with Relativistic Electron Fluxes in the Outer Radiation Belt*, Earth, Planets and Space, 67, 1-9.
- Reeves, G.D., R.H.W. Friedel, R.D. Belian, M.M. Meier, M.G. Henderson, T. Onsager, H.J. Singer, D.N. Baker, X. Li, and J.B. Blake, 1998. *The Relativistic Electron Response at Geosynchronous Orbit During the January 1997 Magnetic Storm*, Journal of Geophysical Research, 103 (A8), 17559-17570.
- Reeves, G.D., S.K. Morley, R.H.W. Friedel, M.G. Handerson, T.E. Cayton, G. Cunningham, J.B. Blake, R.A. Christensen, dan D. Thomsen, 2011. *On the Relationship Between Relativistic Electron Flux and Solar Wind Velocity: Paulikan and Blake Revisited*, Journal of Geophysical Research, 116, A02213.
- Rostoker, G., S. Skone, dan D.N. Baker, 1998. *On the Origin of Relativistic Electrons in the Magnetosphere Associated with Some Geomagnetic Storms*, Geophysical Research Letters, 25, (19), 3701-3704.
- Scolini, C., M. Messerotti, S. Poedts, dan L. Rodriguez, 2018. *Halo Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 24: Reconstruction of The Global Scenario and Geoeffectiveness*, J. Space Weather Space Clim., 8, A09.
- Singh, A.K., S. Mishra, dan R. Singh, 2013. *ULF Wave Index as Magnetospheric and Space-Weather Parameters*, Advances in Space Research, 52, 1427-1436.
- Takahashi, K., K. Yumoto, S.G. Claudepierre, E. R. Sanchez, O.A. Troshicev, dan A.S. Janzhura, 2012. *Dependence of the Amplitude of Pc5-band Magnetic Field Variations on the Solar Wind and Solar Activity*, Journal of Geophysical Research, 117, A04207.
- Takahashi, K. dan A.Y. Ukhorskiy, 2008. *Timing Analysis of the Relationship Between Solar Wind Parameters and*

- Geosynchronous Pc5 Amplitude*, Journal of Geophysical Research, 113, A12204.
- Vassiliadis, D., I.R. Mann, S.F. Fung, dan X. Shao, 2007. *Ground Pc3-Pc5 Wave Power Distribution and Response to Solar Wind Velocity Variations*, Planetary and Space Science, 55, 743-754.
- Wrenn, G.L., D.J. Rodgers, dan K.A. Ryden, 2002. *A Solar Cycle of Spacecraft Anomalies due to Internal Charging*, Annales Geophysics, 20, 953-956.
- <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/>. Diakses tanggal 27 Mei 2018.
- <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html/>. Diakses tanggal 27 Mei 2018.