

Analisis Karakteristik Perilaku Parameter Angin Matahari dan Medan Magnet Antarplanet Sebelum Badai Geomagnet Selama Siklus Matahari ke-24

(Behavioral Characteristics Analysis of the Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field Before Geomagnetic Storm During the 24th Solar Cycle)

Anwar Santoso

Pusat Sains Antariksa LAPAN, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 23-03-2021

Direvisi: 18-09-2021

Disetujui: 24-09-2021

Korespondensi:

Anwar Santoso

anwar.santoso@lapan.go.id

war92_2000@yahoo.com

ABSTRAK

Riset cuaca antariksa merupakan kegiatan pokok di Pusat Sains Antariksa LAPAN untuk mendukung kegiatan *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFtS) dan amanat Undang-Undang No. 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan. Salah satunya adalah terkait fenomena badai geomagnet. Badai geomagnet terjadi akibat adanya transfer partikel dari angin Matahari bersamaan dengan arah selatan medan magnet antarplanet (IMF Bz negatif). Perilaku parameter angin Matahari bersama IMF Bz negatif sebelum badai geomagnet dapat menentukan terbentuk/tidaknya sekaligus kekuatan badai geomagnet yang ditimbulkan. Dalam makalah ini dilakukan analisis karakteristik perilaku parameter angin Matahari dan IMF Bz negatif sebelum badai geomagnet. Analisis sepanjang siklus Matahari ke-24 menunjukkan bahwa parameter angin Matahari yang dominan memengaruhi badai geomagnet adalah kecepatan (V), kerapatan (N), dan tekanan (P) angin Matahari dengan korelasi masing-masing sebesar -37,58%, 22,72%, dan 4,88%. Dengan demikian, pemodelan badai geomagnet dalam kegiatan evaluasi dan prediksi cuaca antariksa selanjutnya agar memperhitungkan ketiga parameter angin Matahari tersebut. Hasil ini diharapkan dapat membantu estimasi atau pemodelan badai geomagnet untuk mendukung kegiatan SWIFtS.

Kata kunci: Parameter angin Matahari, Medan magnet antarplanet, Badai geomagnet

ABSTRACT

Space weather research is the main activity at the Space Science Center LAPAN to support the Space Weather Information and Forecast Services (SWIFtS) activities and is mandated by Law No. 21 of 2013 concerning Space. One of them is related to the phenomenon of geomagnetic storms. Geomagnetic storms occur due to the transfer of the solar wind particles along with the southern direction of the interplanetary magnetic field (negative IMF Bz). The behavior of the solar wind parameters with the negative IMF Bz before a geomagnetic storm can determine the formation and the strength of the geomagnetic storms they cause. The behavior of solar wind and negative IMF Bz parameters before geomagnetic storms is analyzed. The analysis results during the 24th solar cycle showed that the geomagnetic storm was dominantly influenced by the solar wind parameters such as speed (V), density (N), and pressure (P) with correlations of -37.58%, 22.72%, and 4.88%, respectively. Thus, in future space weather evaluation and prediction activities, these three parameters should be taken into account in the modeling of geomagnetic storms. These results can help to estimate the occurrence of geomagnetic storms to support SWIFtS activities.

Keywords: Solar wind parameters, Interplanetary magnetic field, Geomagnetic storm

1. Pendahuluan

Riset cuaca antariksa merupakan kegiatan pokok di Pusat Sains Antariksa LAPAN untuk mendukung kegiatan *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFtS) dan amanat Undang-Undang No. 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan. Matahari merupakan sumber penggerak cuaca antariksa. Beberapa fenomena di Matahari yang menjadi sumber penggerak adalah lubang korona (*CH/coronal hole*), lontaran massa korona (*CME/coronal mass ejection*), dan *flare* yang disertai CME. Ketika terjadi CME, partikel-partikel berenergi tinggi terlontarkan secara radial dan menjalar menuju Bumi sebagai angin Matahari. Pada momen tersebut, terjadi injeksi partikel-partikel berenergi tinggi yang terbawa angin Matahari ke dalam magnetosfer Bumi. Jumlah partikel berenergi tinggi yang terinjeksi menentukan intensitas badai geomagnet yang terbentuk (Adekoya *et al.*, 2012; Burton *et al.*, 1975; Futaana *et al.*, 2007; Jadeja *et al.*, 2008; Mayaud, 1980; O'Brien & McPherron, 2000; Ballatore & Gonzalez, 2003; Russell, 2000; Gonzales *et al.*, 1994; Nagatsuma, 2002; Crooker, 2000; Kivelson & Russell, 1995; Gopalswamy, 2009; Boudouridis *et al.*, 2004; Khabarova, 2007; Santoso, 2010; Santoso *et al.*, 2017). Pembentukan dan intensitasnya ditentukan oleh perilaku parameter angin Matahari yang bertumbukan dengan medan magnet antarplanet (*IMF/interplanetary magnetic field*) arah selatan (*Bz* negatif) ketika proses rekoneksi berlangsung.

Badai geomagnet terbentuk ketika geoeftivitas aktivitas Matahari dan lingkungan antariksa berlangsung secara efektif. Pada momen tersebut, terjadi injeksi partikel-partikel berenergi tinggi yang terbawa angin Matahari ke dalam magnetosfer Bumi melalui mekanisme rekoneksi. Angin Matahari yang terlibat rekoneksi terproyeksi dalam komponen kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*). Injeksi partikel-partikel tersebut akan makin intens bersamaan dengan *IMF Bz* negatif ketika rekoneksi berlangsung. Kondisi *N* dan *V* bersamaan dengan *IMF Bz* negatif

berperan dalam pembentukan badai geomagnet. Bahkan, bisa menentukan intensitas badai geomagnet yang dibentuknya.

Khabarova & Yermolaev (2008) menyimpulkan bahwa selain parameter *V* angin Matahari, parameter *N* angin Matahari bersamaan dengan *IMF Bz* negatif juga berpengaruh terhadap pembentukan dan intensitas badai geomagnet. Parameter *P* angin Matahari juga diduga berpotensi memengaruhi pembentukan dan intensitas badai geomagnet. Dominasi perilaku parameter angin Matahari sebelum dan sesudah badai geomagnet diduga berubah setiap siklus Matahari.

Selanjutnya, dilakukan estimasi intensitas badai geomagnet berdasarkan perilaku angin Matahari dan *Bz IMF* sebelum badai geomagnet. Dengan hasil ini diharapkan estimasi peristiwa badai geomagnet terutama yang ekstrem dapat diperkirakan dan selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk mitigasi dampaknya yang merugikan.

2. Data dan Metodologi

Data yang digunakan sebagai bahan analisis adalah indeks *Dst* dari situs web http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html, parameter angin Matahari (*N*, *V*, dan *P*) dan komponen *Bz IMF* dari situs web <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> tahun 2007–2020 (siklus Matahari ke-24).

Metode yang digunakan untuk analisis adalah visual dan statistik. Data indeks *Dst* digunakan untuk identifikasi badai geomagnet mulai skala lemah ($-79,2 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -45 \text{ nT}$), dengan skala seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter angin Matahari (*N*, *V*, dan *P*) dan *IMF Bz* selatan digunakan untuk menganalisis karakteristik parameter angin Matahari, sedangkan *IMF Bz* negatif menentukan terbentuk/tidaknya dan tingkat kekuatan badai geomagnet. Selanjutnya dilakukan analisis statistik.

Tabel 1. Klasifikasi intensitas badai geomagnet berdasarkan indeks Dst dalam skala SWIFtS.

Kondisi Geomagnet	Indeks K	Gangguan ΔH (Dst, nT)
<i>Quite</i> (Tenang)	1-3	$\leq -25,4$
<i>Active</i> (Aktif)	4	-25,5-(-44,9)
<i>Minor Storm</i> (Badai Lemah)	5	-45-(-79,2)
<i>Moderate Storm</i> (Badai Sedang)	6	-79,3-(-139,6)
<i>Major Storm</i> (Badai Kuat)	7	-139,7-(-245,9)
<i>Severe Storm</i> (Badai Sangat Kuat)	≥ 8	≤ -246

3. Hasil dan Pembahasan

Dari data indeks Dst tahun 2007–2020, diidentifikasi 164 peristiwa badai geomagnet dengan rincian sebagai berikut menurut skala SWIFtS: 115 skala lemah (*minor storm*, $-79,2 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -45 \text{ nT}$); 43 skala sedang (*moderate storm*, $-139,6 \text{ nT} \leq$

$\text{Dst} \leq -79,3 \text{ nT}$); dan 6 skala kuat (*major storm*, $-245,9 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -139,7 \text{ nT}$). Dalam makalah ini, studi kasus dilakukan hanya pada 21 peristiwa badai geomagnet skala sedang hingga kuat (*moderate to strong storm*), yaitu mulai $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$, seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Daftar peristiwa badai geomagnet skala sedang hingga kuat (*moderate to strong storm*) mulai $\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$ sebagai bahan studi kasus.

No.	Tanggal Badai Geomagnet	Dst minimum (nT)	Waktu Dst-Minimum (UT)
1	06-08-2011	-115	04.00
2	26-09-2011	-118	24.00
3	09-03-2012	-145	09.00
4	24-04-2012	-120	05.00
5	15-07-2012	-139	19.00
6	01-10-2012	-122	05.00
7	09-10-2012	-109	09.00
8	15-11-2012	-108	08.00
9	17-03-2013	-132	21.00
10	01-06-2013	-124	09.00
11	29-06-2013	-102	07.00
12	19-02-2014	-119	09.00
13	17-03-2015	-222	23.00
14	23-06-2015	-204	05.00
15	07-10-2015	-124	23.00
16	20-12-2015	-155	23.00
17	01-01-2016	-110	01.00
18	13-10-2016	-104	24.00
19	28-05-2017	-125	08.00
20	08-09-2017	-124	02.00
21	26-08-2018	-174	07.00

Dari 21 studi kasus badai geomagnet, pembahasan makalah ini difokuskan pada enam peristiwa badai geomagnet dengan skala kuat ($\text{Dst} \leq -139 \text{ nT}$), yakni peristiwa tanggal 9 Maret 2012 ($\text{Dst} = -145 \text{ nT}$), 15 Juli

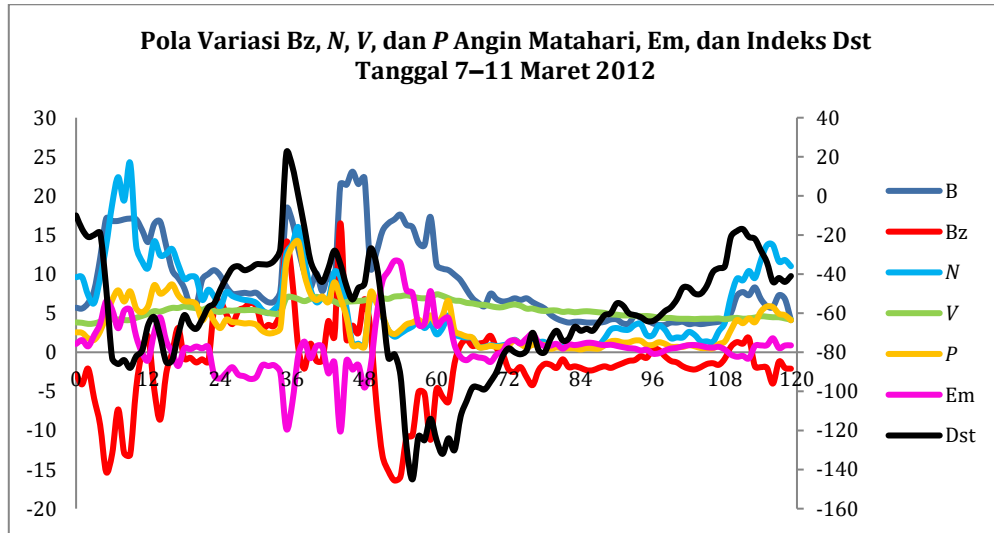
2012 ($\text{Dst} = -139 \text{ nT}$), 17 Maret 2015 ($\text{Dst} = -222 \text{ nT}$), 23 Juni 2015 ($\text{Dst} = -204 \text{ nT}$), 20 Desember 2015 ($\text{Dst} = -155 \text{ nT}$), dan 26 Agustus 2018 ($\text{Dst} = -174 \text{ nT}$).

3.1. Badai Geomagnet 9 Maret 2012 (Dst = -145 nT)

Badai geomagnet 9 Maret 2012 diduga dipicu oleh dua peristiwa CME halo berurutan tanggal 7 Maret 2012, yakni pukul 00.24 UT dan 01.30 UT. Badai geomagnet terjadi 56 jam setelah peristiwa CME tersebut. Pola variasi perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin

Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 1.

Sementara itu, perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 1. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 9 Maret 2012.

Tabel 3. Perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari (SW), *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 9 Maret 2012.

7–11 Maret 2012								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
<i>Bz</i>	10-03-2012, 05.00	-16,4 nT	09-03-2012, 11.00	14,1 nT	δBz 30,5 nT	-18		09-03-2012 pukul 11.00 UT adalah waktu puncak onset Dst
<i>N</i>	09-03-2012, 13.00	16 n/cc	09-03-2012, 09.00	5,5 n/cc	δN 10,5 n/cc	-4	19	
<i>V</i>	09-03-2012, 12.00	705 km/s	09-03-2012, 09.00	492 km/s	δV 213 km/s	-3	20	
<i>P</i>	09-03-2012, 13.00	14,1 nPa	09-03-2012, 09.00	2,5 nPa	δP 11,6 nPa	-4 -2	19	

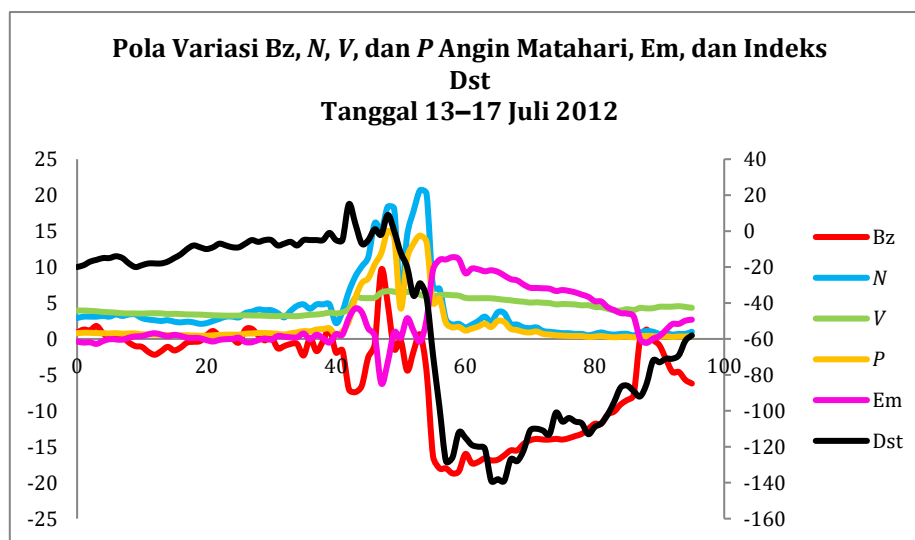
7–11 Maret 2012								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
Dst min	10-03-2012, 08.00	-145 nT	09-03-2012, 11.00	22 nT	δ Dst	167 nT	-23	
TDst_Ost(0)			09-03-2012, 09.00	-33 nT			20	
Em	10-03-2012, 05.00	11,7 mV/m	09-03-2012, 09.00	-1,7 mV/m	δ Em	13,4 mV/m	3	

Berdasarkan Gambar 1 dan Tabel 3, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 3–4 jam sebelum puncak *N*, *V*, dan *P* angin Matahari. Sementara itu, *Dst* minimum terjadi 19–20 jam setelah puncak *N*, *V*, dan *P* angin Matahari dan 3 jam setelah *Bz* negatif minimum.

3.2. Badai Geomagnet 15 Juli 2012

Badai geomagnet 15 Juli 2012 diduga dipicu oleh peristiwa CME halo tanggal 12

Juli 2012 pukul 16.48 UT. Badai geomagnet terjadi 74 jam setelah peristiwa CME tersebut. Pola variasi perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 2. Sementara itu, perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 2. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 15 Juli 2012.

Tabel 4. Perilaku parameter N , V , dan P angin Matahari, Em , Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 15 Juli 2012.

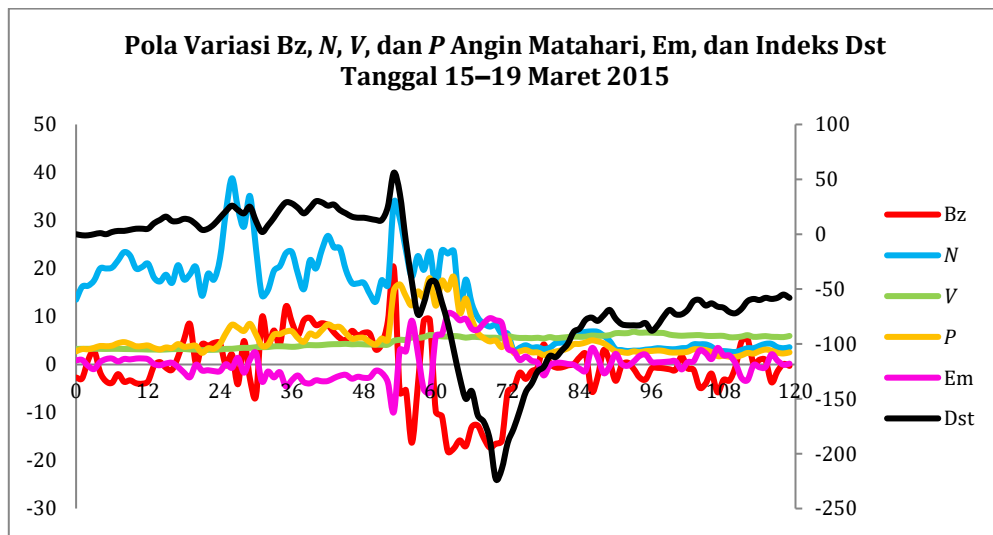
13–17 Juli 2012								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
Bz	15-07-2012, 10.00	-18,7 nT	14-07-2012, 16.00	-1,9 nT		-18		14-07-2012 pukul 18.00 UT adalah waktu puncak onset Dst
N	15-07-2012, 05.00	20,7n/cc	14-07-2012, 16.00	2,2n/cc	δN 310 n/cc	-13	11	
V	15-07-2012, 00.00	665 km/s	14-07-2012, 16.00	355 km/s	δV 9,88 km/s	-12	26	
P	14-07-2012, 04.00	11,25 nPa	14-07-2012, 01.00	1,37 nPa	δP -154 nPa	3	36	
Dst-min	15-07-2012, 16.00	-139 nT	14-07-2012, 18.00	15 nT	δDst 134 nT	-24		
TDst_Ost(0)			14-07-2012, 16.00	-5 nT				
Em	14-07-2012, 10.00	11,37 mV/m	14-07-2012, 16.00	0,59 mV/m	δEm 10,78 mV/m	-18	8	

Berdasarkan Gambar 2 dan Tabel 4, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 12–13 jam sebelum puncak N dan V , dan 8 jam setelah P angin Matahari. Sementara itu, Dst minimum terjadi 11 jam setelah puncak N angin Matahari, 26 jam setelah V angin Matahari, dan 36 jam setelah P angin Matahari, serta 6 jam setelah Bz negatif minimum.

3.3. Badai Geomagnet 17 Maret 2015

Badai geomagnet 17 Maret 2015 diduga dipicu oleh peristiwa CME tanggal 15

Maret 2015 yakni pukul 01.48 UT. Badai geomagnet terjadi 70 jam setelah peristiwa CME tersebut. Pola variasi perilaku parameter N , V , dan P angin Matahari, Em , Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 3. Sementara itu, perilaku parameter N , V , dan P angin Matahari, Em , Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 5.



Gambar 3. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 17 Maret 2015.

Tabel 5. Perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 17 Maret 2015.

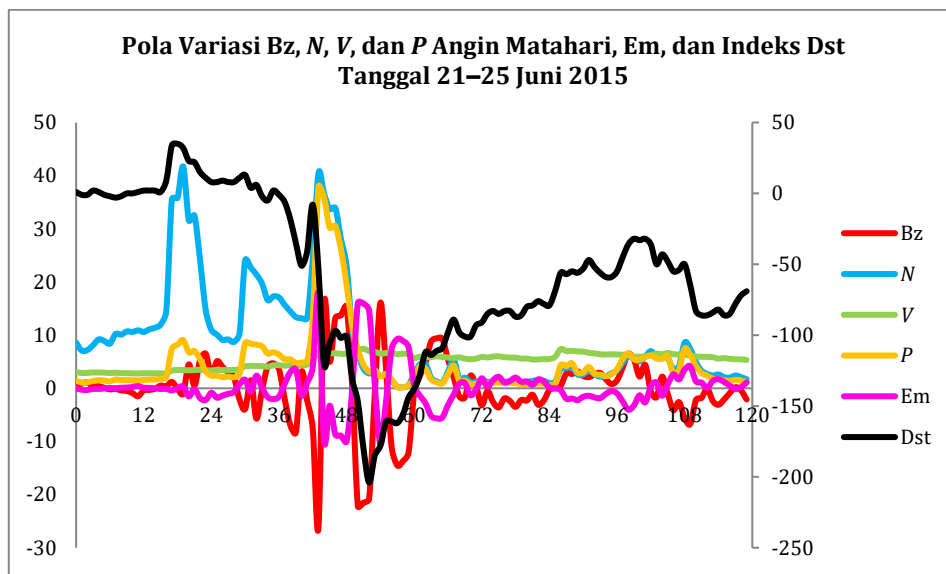
15-19 Maret 2015								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset-puncak	Deviasi waktu onset-puncak (Jam)	Deviasi waktu puncak-Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
Bz	17-03-2015, 14.00	-18,1 nT	17-03-2015, 02.00	3,1 nT	δBz	21,2 nT	-12	17-03-2015 pukul 02.00 UT adalah waktu puncak onset Dst
<i>N</i>	17-03-2015, 05.00	33,7 n/cc	17-03-2015, 02.00	13,1 n/cc	δN	20,6 n/cc	-3	
<i>V</i>	17-03-2015, 11.00	614 km/s	17-03-2015, 03.00	412 km/s	δV	202 km/s	-9	
<i>P</i>	17-03-2015, 11.00	18 nPa	17-03-2015, 02.00	5,1 nPa	δP	12,9 nPa	-9	
Dst-min	17-03-2015, 23.00	-139 nT	17-03-2015, 04.00	56 nT	δP	152 nT	-21	
TDst_Ost(0)			17-03-2015, 02.00	13 nT				
<i>Em</i>	17-03-2015, 14.00	10,55 mV/m	17-03-2015, 03.00	9,89 mV/m	δEm	20,4 mV/m	-12	

Berdasarkan Gambar 3 dan Tabel 5, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 3 jam sebelum puncak *N* angin Matahari dan 9 jam sebelum puncak *V* dan *P* angin Matahari. Sementara itu, *Dst* minimum terjadi 17 jam setelah puncak *N* angin Matahari, 11 jam setelah puncak *V* dan *P* angin Matahari serta 8 jam setelah *Bz* negatif minimum.

3.4. Badai Geomagnet 23 Juni 2015

Badai geomagnet 23 Juni 2015 diduga dipicu oleh peristiwa CME halo tanggal 22

Juni 2015 pukul 18.30 UT. Badai geomagnet terjadi 37 jam setelah peristiwa CME tersebut. Pola variasi perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 4. Sementara itu, perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 4. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 23 Juni 2015.

Tabel 6. Perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 23 Juni 2015.

21-25 Juni 2015								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset-puncak	Deviasi waktu onset-puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak-Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
<i>Bz</i>	22-06-2015, 19.00	-26,3 nT	21-06-2015, 19.00	-1 nT	δBz 25,3 nT	-24	9	21-06-2015 pukul 17.00 UT adalah waktu puncak onset Dst
<i>N</i>	21-06-2015, 19.00	41,7 n/cc	21-06-2015, 15.00	12 n/cc	δN 29,7 n/cc	-4	33	

21–25 Juni 2015								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
V	22-06-2015, 03.00	742 km/s	21-06-2015, 15.00	282 km/s	δV 460 km/s	-36	1	
P	21-06-2015, 19.00	9,1 nPa	21-06-2015, 15.00	1,8 nPa	δP 7,3 nPa	-4	33	
Dst-min	22-06-2015, 04.00	-204	21-06-2015, 17.00	34 nT	δDst 205 nT	-13		
TDst_Ost(0)			21-06-2015, 15.00	1 nT				
Em	22-06-2015, 02.00	16,1 mV/m	21-06-2015, 15.00	-0,1 mV/m	δEm 20,44 mV/m	-35	2	

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 6, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 4 jam sebelum puncak *N* dan *P* angin Matahari, dan 36 jam sebelum puncak *V* angin Matahari. Sementara itu, Dst minimum terjadi 2 jam setelah puncak *N* dan *P* angin Matahari, 34 jam setelah puncak *V* angin Matahari serta 9 jam setelah Bz negatif minimum.

3.5. Badai Geomagnet 20 Desember 2015

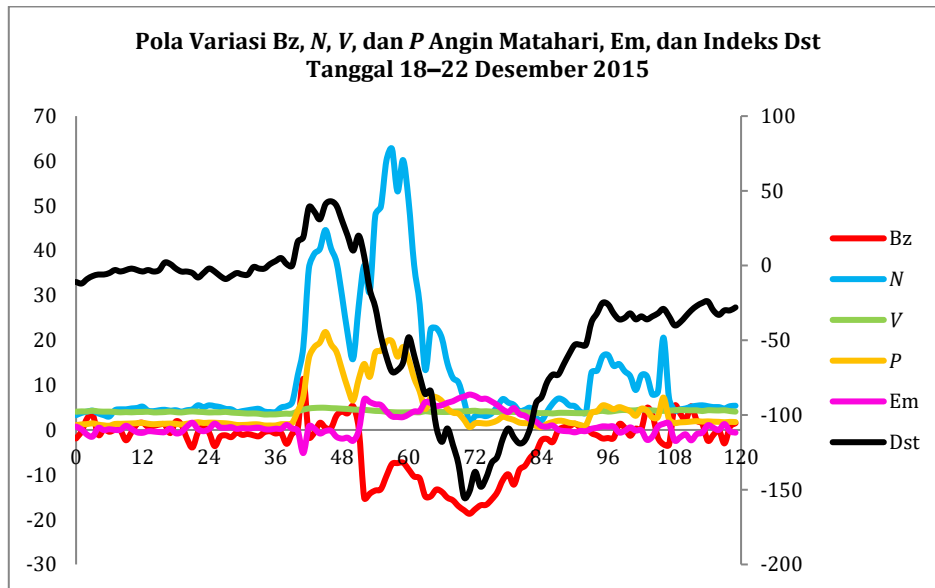
Badai geomagnet 20 Desember 2015 diduga dipicu oleh peristiwa CME halo

tanggal 16 Desember 2015 pukul 08.30 UT. Badai geomagnet terjadi 109 jam setelah peristiwa CME tersebut. Pola variasi perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, Em, Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 5. Sementara itu, perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, Em, Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, Em, Bz negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 20 Desember 2015.

18-22 Desember 2015								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
Bz	20-12-2015, 00.00	-18,3 nT	19-12-2015, 13.00	-0,3 nT	δBz 18 nT	-35	-1	Dst pukul 24.00 UT (19-12-2015) adalah waktu

18-22 Desember 2015								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset-puncak	Deviasi waktu onset-puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak-Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
<i>N</i>	20-12-2015, 11.00	62,7 n/cc	19-12-2015, 13.00	4 n/cc	δN 58,7 n/cc	-18	13	puncak onset Dst
<i>V</i>	19-12-2015, 22.00	496 km/s	19-12-2015, 17.00	418 km/s	δV 78 km/s	-5	26	
<i>P</i>	19-12-2015, 23.00	21,86 nPa	19-12-2015, 13.00	1 nPa	δP 20,86 nPa	-6	25	
Dst-min	20-12-2015, 00.00	-155	19-12-2015, 00.00	43 nT	δDst 155 nT	-31		
TDst_Ost(0)			19-12-2015, 17.00	0 nT				
Em	20-12-2015, 24.00	7,43 mV/m	19-12-2015, 17.00	-0,1 mV/m	δEm 7,6 mV/m	-31	0	



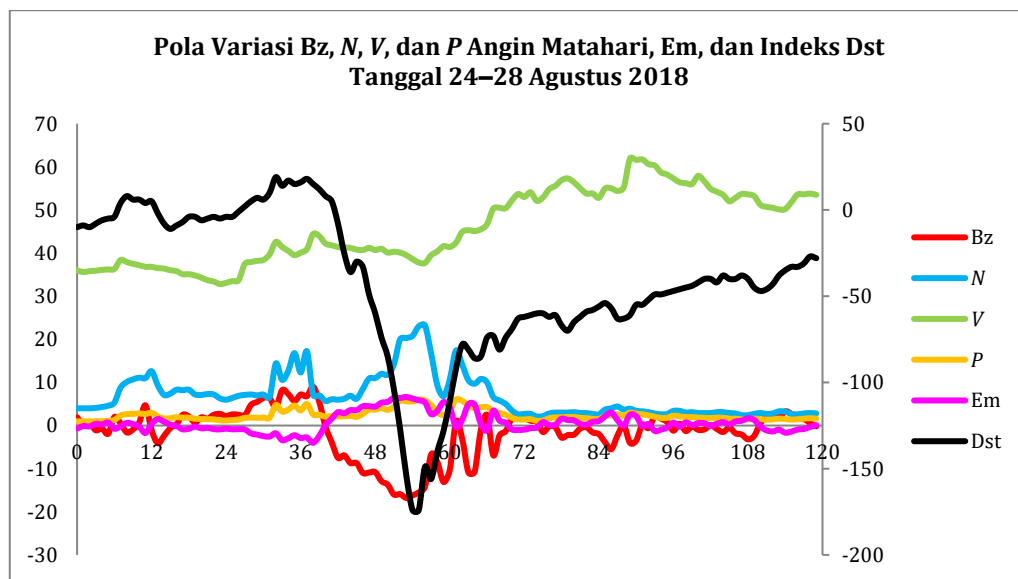
Gambar 5. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik merger (*Em*), *Bz* negatif terkait onset, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 20 Desember 2015.

Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 7, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 18 jam sebelum puncak *N*, lima jam sebelum puncak *V* angin Matahari, dan 6 jam sebelum puncak *P* angin Matahari. Sementara itu, *Dst* minimum terjadi 11 jam setelah puncak *N* angin Matahari, 23 jam setelah puncak *V* angin Matahari, dan 25 jam setelah puncak *P* angin Matahari, dan 1 jam sebelum *Bz* negatif minimum.

oleh CIR bersamaan dengan *Bz* negatif nilai yang besar. Pola variasi perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 6. Sementara itu, perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet ditunjukkan pada Tabel 8.

3.6. Badai Geomagnet 26 Agustus 2018

Badai geomagnet 26 Agustus 2018 diduga dipicu oleh adanya CH yang diikuti



Gambar 6. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (*N*), kecepatan (*V*), dan tekanan (*P*) angin Matahari, medan listrik *merger* (*Em*), *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 26 Agustus 2018.

Tabel 8. Perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari, *Em*, *Bz* negatif terkait *onset*, fase utama, dan fase pemulihan badai geomagnet 26 Agustus 2018.

24–28 Agustus 2018									
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan	
	1	2	3	4	5	6	7		
<i>Bz</i>	26-08-2018, 06.00	-16,8 nT	25-08-2018, 06.00	6,4 nT	δBz 23,2 nT	-24	-2	25-08-2018	pukul 08.00 UT adalah waktu puncak onset Dst
<i>N</i>	26-08-2018, 09.00	23,2 n/cc	25-08-2018, 05.00	7 n/cc	δN 58,7 n/cc	-27	-4		

24–28 Agustus 2018								
	Waktu puncak (UT)	Nilai	Waktu onset (UT)	Nilai	Deviasi nilai onset–puncak	Deviasi waktu onset–puncak (Jam)	Deviasi waktu SW puncak–Dst minimum (Jam)	Keterangan
	1	2	3	4	5	6	7	
V	25-08-2018, 14.00	444 km/s	25-08-2018, 02.00	335 km/s	δV 78km/s	-9	14	
P	26-08-2018, 05.00	5,8 nPa	25-08-2018, 05.00	1,79 nPa	δP 20,9 nPa	-23	-1	
Dst-min	26-08-2018, 04.00	-174 nT	25-08-2018, 08.00	19 nT	δDst 181nT	-23		
TDst_Ost(0)			25-08-2018, 05.00	7				
Em	26-08-2018, 06.00	6,6 mV/m	25-08-2018, 14.00	-4 mV/m	δEm 10,6 mV/m	-24	-2	

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 8, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 27 jam sebelum puncak *N*, 9 jam sebelum puncak *V* angin Matahari, dan 23 jam sebelum puncak *P* angin Matahari. Sementara itu, *Dst* minimum terjadi 4 jam sebelum puncak *N* angin Matahari, 14 jam setelah puncak *V* angin Matahari, 1 jam sebelum puncak *P* angin Matahari, dan 2 jam sebelum puncak *Bz* negatif minimum.

Dari keenam studi kasus di atas, terlihat bahwa hampir semua perubahan *onset* perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin

Matahari dan *Bz* negatif terjadi bersamaan dengan *onset* badai geomagnet. Namun, ada juga peristiwa dengan perubahan *onset* perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari dan *Bz* negatif yang terjadi sebelum *onset* badai geomagnet, yakni peristiwa badai geomagnet tanggal 20 Desember 2015. Langkah berikutnya adalah menentukan dominasi masing-masing perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari bersamaan dengan *Bz* negatif dalam pembentukan badai geomagnet.

Tabel 9. Nilai perilaku parameter *N*, *V*, dan *P* angin Matahari dan korelasinya dengan badai geomagnet.

No	Tanggal Badai Geomagnet	Dst (nT)	Waktu Dst Minimum (Jam)	δN (n/cc)	δV (km/s)	δP (nPa)	Korelasi (%)			Jumlah <i>N, P > V</i>
							<i>N</i> -Dst	<i>V</i> -Dst	<i>P</i> -Dst	
1	06-08-2011	-115	4	23,4	215	19,88	-3,50931577	-71,68242442	-21,7207808	
2	26-09-2011	-118	24	10,7	355	11,56	34,50091125	-84,63055454	-16,2139359	
3	09-03-2012	-145	9	10,5	213	11,6	73,35991253	-37,19044547	59,51357527	1
4	24-04-2012	-120	5	31,5	71	9,88	53,60594032	-27,17357191	49,64989586	2
5	15-07-2012	-139	19	18,5	310	9,88	40,20336285	-47,18090682	22,21404936	
6	01-10-2012	-122	5	18,9	138	4,23	15,05671718	-86,78806341	-11,4360536	
7	09-10-2012	-109	9	17,4	73	5,16	-13,0586124	-30,08350818	-27,4132709	

No	Tanggal Badai Geomagnet	Dst (nT)	Waktu Dst Minimum (Jam)	δN (n/cc)	δV (km/s)	δP (nPa)	Korelasi (%)			Jumlah $N, P > V$
							N-Dst	V-Dst	P-Dst	
8	15-11-2012	-108	8	12,5	43	3,75	6,913455295	10,71338608	11,32165112	
9	17-03-2013	-132	21	11,2	306	11,24	32,4276962	-49,30643346	20,74721044	
10	01-06-2013	-124	9	34,5	352	10,83	45,22026267	-53,91880355	11,93747468	
11	29-06-2013	-102	7	25,7	104	8,91	29,02288857	37,74788803	34,93983439	
12	19-02-2014	-119	9	9,9	104	8,91	-40,3070567	-68,79062516	-53,0484053	
13	17-03-2015	-222	23	20,6	202	12,86	66,35986174	-61,76342145	20,7183632	3
14	23-06-2015	-204	5	29,7	460	7,28	16,76316403	-90,98530321	-43,6687964	
15	07-10-2015	-124	23	24,2	357	8,06	-13,8312986	-70,33982255	-50,0404552	
16	20-12-2015	-155	23	58,7	78	20,86	-24,6921904	51,61814816	3,72973769	
17	01-01-2016	-110	1	32,5	143	-0,09	58,87043109	-15,86435144	53,27126729	4
18	13-10-2016	-104	24	24,6	84	8,89	77,24904065	25,16280886	73,55301811	5
19	28-05-2017	-125	8	55,3	105	14,34	58,56590633	-40,18315187	51,0492695	6
20	08-09-2017	-124	2	13,9	332	11,7	26,45622048	-76,73232944	-23,1975776	
21	26-08-2018	-174	7	16,2	109	3,97	-62,1214617	-1,835125304	-63,4222706	7
Rerata							22,71694455	-37,58126719	4,880180983	

Berdasarkan Tabel 9 diperoleh bahwa secara umum badai geomagnet dominan dipengaruhi oleh parameter V , N , dan P angin Matahari dengan koefisien korelasi masing-masing sebesar -37,58%, 22,72%, dan 4,88%. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya (Burton *et al.*, 1975; Ballatore & Gonzales, 2003; Lundstedt & Wintoft, 1994). Walaupun secara umum kecepatan angin Matahari paling dominan mengakibatkan badai geomagnet, tetapi ada 7 peristiwa badai yang didominasi oleh kerapatan dan tekanan angin Matahari.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan di atas, sepanjang siklus Matahari ke-24 diperoleh bahwa badai geomagnet dominan dipengaruhi parameter angin Matahari V , disusul N dan P dengan koefisien korelasi masing-masing sebesar -37,58%, 22,72%, dan 4,88%.

Namun, ada beberapa peristiwa badai geomagnet yang didominasi oleh N dan P angin Matahari. Dengan demikian, dalam kegiatan evaluasi dan prediksi cuaca antariksa terkait badai geomagnet ke depannya agar memperhitungkan ketiga

parameter angin Matahari (N , V dan P) dalam pemodelannya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Tim Pengelola situs web: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>; http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/200110/index.html; dan http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/2014_02/univ2014_02.html

Ketersediaan Data

Penelitian ini menggunakan data dari <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> untuk pusat data aktivitas geomagnet, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/200110/index.html untuk identifikasi badai geomagnet dengan indeks Dst, dan http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL.html untuk pusat data peristiwa CME.

Rujukan

- Adekoya B.J., Chukwuma V.U., Bakare N.O., & David T.W. (2012). Effects of geomagnetic storm on middle latitude ionospheric F2 during storm of 2-6 April 2004. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 41, pp 606–616.
- Ballatore, P. & Gonzalez, W.D. (2003). On the estimates of ring current injection and decay. *Earth Planets Space*, 55, 427–435.

- Boudouridis, A., Zesta, E., Lyons, L.R., Anderson, P.C., & Lummerzheim, D. (2004). Magnetospheric reconnection driven by solar wind pressure fronts. *Ann. Geophys.*, 22, 1367–1378.
- Burton, R. K., McPherron, R.L., & Russell, C.T. (1975). An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst. *J. Geophys. Res.*, 80, 4204–4214.
- Crooker N.U. (2000). Solar and Heliospheric Geoeffective disturbances. *J. Atm. Sol. Terr.*, 62, pp. 1071–1085.
- Futaana, Y., Barabash, S., Yamauchi, M., Lundin, R., & McKenna-Lawlor, S. (2007). Geo-effective solar flare events in December 2006: Space weather effect on Mars and Venus oxygen loss to space. *EosTrans. AGU.88, Fall Meet. Suppl., Abstract P23A-1087*.
- Gonzales, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., & et al. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, 99, pp. 5771–5792.
- Gopalswamy, N. (2009). Halo coronal mass ejections and geomagnetic storm. *Earth Planet Space*, 61, 1–3.
- Jadeja, A.K., Iyer, K.N., Vats, H.O., & Manoharan, P.K. (2008). Geo-effectiveness of CMEs. *J. Astrophys. Astr.*, 29, pp 287–291.
- Khabarova, O.V. (2007). Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving. *Sun and Geosphere*, 32–37, 2(1).
- Khabarova, O.V. & Yermolaev, Y.I. (2008). Solar wind parameter's behavior before and after magnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physic*, Vol. 70, Issues 2–4, ISSN 1364-6826.
- Kivelson, M.G. & Russell, C.T. (1995). *Introduce of plasma physics*, Prentice-Hall, 1.
- Lundstedt, H. & Wintoft, P. (1994). Prediction of geomagnetic storms from solarwind data with the use of a neural network. *Ann. Geophys.*, 12, 19–24.
- Mayaud, P.N. (1980). Derivation, meaning and use of geomagnetic indices. *Geophys. Monograph*, vol. 22, AGU, Washington, DC.
- Nagatsuma, T. (2002). Geomagnetic storm. *Journal of the communications research laboratory*, 49, No. 3.
- O'Brien, T.P. & McPherron, R.L. (2000). An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay. *J. Geophys. Res.*, 105, 7707–7720.
- Russell, C.T. (2000). The solar wind interaction with the Earth's magnetosphere: a tutorial. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 28, no. 6, pp. 1818–1830, Dec. 2000.
- Santoso, A. (2010). Identifikasi kondisi angin Matahari (solar wind) untuk prediksi badai geomagnet. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY*, Semarang, pp. 275–283.
- Santoso, A., Ruhimat, M., Kesumaningrum, R., & Filawati, S. (2017). *Bunga rampai hasil riset cuaca antariksa: Estimasi badai geomagnet berdasarkan perilaku parameter angin surya dan Bz IMF sebelum badai geomagnet*.