**ANALISIS KARAKTERISTIK PERILAKU PARAMETER ANGIN MATAHARI DAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET SEBELUM BADAI GEOMAGNET SELAMA SIKLUS MATAHARI KE-24**

**(ANALYSIS CHARACTERISTIC OF THE SOLAR WIND PARAMETER’S AND INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD BEHAVIOR BEFORE GEOMAGNETIC STORM DURING 24-SOLAR CYCLE)**

Anwar Santoso1,

1Pusat Sains Antariksa - LAPAN, Bandung

|  |  |
| --- | --- |
| **Riwayat naskah**Diterima: DD-MM-YYYYDirevisi: DD-MM-YYYYDisetujui: DD-MM-YYYY**Korespondensi:**Anwar Santosoanwar.santoso@lapan.go.idwar92\_2000@yahoo.com | **ABSTRAK**Riset cuaca antariksa merupakan pokok kegiatan di Pusat Sains Antariksa, Lapan untuk mendukung kegiatan Space Weather Information and Forecasting Service (SWIFtS) dan amanat Undang-undang No. 21 Tahun 2013. Salah satunya adalah terkait fenomena badai geomagnet. Badai geomagnet terjadi akibat masuknya angin matahari bersamaan dengan arah selatan medan magnet antarplanet (IMF Bz(-)). Perilaku parameter angin matahari bersama IMF Bz(-) sebelum badai geomagnet dapat menentukan terbentuk tidaknya dan sekaligus besar kecilnya badai geomagnet yang ditimbulkannya. Dalam makalah ini, dilakukan analisis karakteristik perilaku parameter angin matahari dan IMF Bz (-) sebelum badai geomagnet. Hasil analisis sepanjang siklus matahari ke-24 diperoleh bahwa badai geomagnet dominan dipengaruhi parameter kecepatan angin surya (VSW) -37,58% disusul parameter kerapatan angin surya (NSW) 22,72% dan parameter tekanan angin surya (PSW) 4,88%. Dengan demikian, dalam kegiatan evaluasi dan prediksi cuaca antariksa terkait badai geomagnet kedepannya agar memperhitungkan ketiga parameter angin surya (NSW, VSW dan PSW) dalam pemodelannya. Hasil ini diharapkan dapat membantu estimasi atau pemodelan kejadian 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 Forecasting Service (SWIFtS) activities and mandated by Law No. 21 of 2013. One of them is related to the phenomenon of geomagnetic storms. Geomagnetic storms occur due to the entry of the solar wind along with the southern direction of the interplanetary magnetic field (IMF Bz (-)). The behavior parameters of the solar wind with the IMF Bz (-) before a geomagnetic storm can determine the formation of geomagnetic storms and the size of the storms they cause. This paper analyzes the behavior of solar wind and IMF Bz (-) parameters before geomagnetic storms. The analysis results during the 24th solar cycle showed that the dominant geomagnetic storm was influenced by the solar wind speed parameter (VSW) -37.58% followed by the solar wind density parameter (NSW) 22.72% and the solar wind pressure parameter (PSW) 4.88% . Thus, in future space weather evaluation and prediction activities related to geomagnetic storms, the three solar wind parameters (NSW, VSW and PSW) should be taken into account in the modeling. This results can help 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 pokok kegiatan di Pusat Sains Antariksa, Lapan untuk mendukung kegiatan Space Weather Information and Forecasting Service (SWIFtS) dan amanat Undang-undang No. 21 Tahun 2013. Matahari merupakan sumber penggerak fenomena cuaca antariksa. Salah satu fenomena di matahari yang menjadi sumber penggeraknya adalah Flare disertai lontaran matahari, Coronal Hole (CH) dan Flare disertai lontaran matahari, Corona Mass Ejection (CME). Ketika terjadi CME maka partikel-partikl berenergi terlontarkan secara radial dan yang menjalar menuju Bumi sebagai angin matahari. Pada momen tersebut, akan terjadi injeksi partikel-partikel berenergi yang terbawa angin matahari ke dalam magnetosfer Bumi. Jumlah injeksi partikel-partikel berenergi bisa menentukan intensitas badai geomagnet yang dibentuknya (Burton et al., 1975; O’Brien dan McPherron, 2000; Ballatore dan Gonzalez, 2003, Russell, 2006; Mayaud, 1980; Gonzales et al., 1994; Nagatsuma, 2002; Crooker, 2000; Kivelson dan Russell, 1995; Gopalswamy, 2009; Boudouridis, et al,, 2004; Russel, 2006; Khabarova, 2007; Santoso, 2010). Ilustrasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pembentukan dan intensitasnya ditentukan oleh perilaku parameter angin matahari bertumbukan dengan medan magnet antar planet arah selatan (Bz (-) IMF) ketika rekoneksi berlangsung.

Angin surya

IMF Bz(+)

IMF Bz(-)

Interplanetary Magnetic Field arah selatan

Interplanetary Magnetic Field arah utara

Angin surya

Utara

Utara

**Gambar 1**. Ilustrasi mekanisme terbentuknya badai geomagnet setelah “*interplanetary shock*”. IMF mempunyai 3 komponen yaitu Bx, By dan Bz. Diantara ketiga komponen tersebut yang dominan berperan dalam pembentukan badai geomagnet adalah IMF Bz. Dalam gambar IMF Bz mengarah ke utara (ke atas, IMF Bz(+))-selatan (ke bawah, IMF Bz(-)).

Badai geomagnet terbentuk ketika geoefektivitas aktivitas matahari dan lingkungan antariksa berlangsung secara efektif. Pada momen tersebut, akan terjadi injeksi partikel-partikel berenergi yang terbawa angin matahari ke dalam magnetosfer Bumi melalui mekanisme rekoneksi. Angin matahari yang terlibat rekoneksi terproyeksi dalam komponen densitas (Nsw), kecepatan (Vsw) dan tekanan (Psw). Injeksi partikel-partikel tersebut akan semakin intens bersamaan dengan medan magnet antarplanet (Interplanetary magnetic field, IMF) mengarah selatan Bz(-) ketika rekoneksi berlangsung. Kondisi Nsw dan Vsw bersamaan dengan IMF Bz (-) berperan dalam pembentukan badai geomagnet. Bahkan bisa menentukan intensitas badai geomagnet yang dibentuknya.

Khabarova dan Yarmolev, (2008) menyimpulkan bahwa selain parameter kecepatan angin matahari (VSW), parameter densitas angin matahari (NSW) bersamaan dengan IMF Bz (-) juga berpengaruh terhadap pembentukan dan intensitas badai geomagnet. Parameter tekanan angin matahari (PSW) diduga juga berpotensi mempengaruhi pembentukan dan intensitas badai geomagnet, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Dominasi perilaku parameter angin matahari sebelum dan sesudah badai geomagnet diduga berubah setiap siklus matahari.

Berdasarkan hal ini, maka akan dilakukan Estimasi Intensitas Badai Geomagnet Berdasarkan Perilaku Angin matahari dan Bz IMF Sebelum Badai Geomagnet. Dengan hasil ini diharapkan estimasi kejadian badai geomagnet terutama yang ekstrim dapat diperkirakan. Selanjutnya, dimanfaatkan untuk mitigasi dampak merugikannya.



**Gambar 2**. Histogram kecepatan dan kerapatan angin matahari selama 2 jam sebelum dan 2 hari sesudah badai geomagnet sebanyak 1266 kejadian badai geomagnet dengan SSC saja (selama interval waktu dari 1963 hingga 2003). Area arsir abu-abu - distribusi untuk keseluruhan data penelitian (1963–2003), garis putih - distribusi sebelum SSC, garis hitam - distribusi setelah SSC.



**Gambar 3**. Histogram kecepatan dan densitas angin matahari selama 2 hari sebelum dan sesudah awal fase utama badai magnet sebanyak 623 kejadian (baik dengan SSC maupun tanpa SSC) selama interval waktu dari tahun 1976 hingga 2000. Area abu-abu - distribusi untuk seluruh data penelitian (1976-2000), garis putih-distribusi sebelum onset fase utama, garis hitam-distribusi setelah onset fase utama.

1. **Data dan Metodologi**

Data yang digunakan sebagai bahan analisis adalah indeks Dst dari website <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html>, komponen angin matahari (densitas, Nsw; kecepatan, Vsw; tekanan, Psw) dan komponen Bz IMF dari website <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 (Dst < -45 nT), dengan skala seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter angin matahari (NSW, VSW dan PSW) dan IMF komponen Bz selatan digunakan sebagai analisis karakteristik perilaku parameter angin matahari bersama dengan IMF Bz(-) menentukan terbentuk-tidaknya dan besar-kecilnya badai geomagnet yang terbentuk. Metode tingkat pengaruh parameter angin surya bersama Bz (-) yang menentukan terbentuk-tidaknya dan besar-kecilnya badai geomagnet, diberikan seperti persamaan (1). Selanjutnya dilakukan analisis statistik.

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

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

1. **Hasil dan Pembahasan**

Hasil identifikasi terhadap data indeks Dst tahun 2007-2020 diperoleh sebanyak 164 kejadian badai geomagnet dengan rincian menurut skala SWIFtS yakni 115 skala lemah (*Minor storm*, Dst < -45 nT), 43 skala sedang (*Moderat storm*, Dst < -79 nT) dan 6 skala kuat (*strong storm*, Dst < -100 nT). Dalam makalah ini, studi kasus dilakukan hanya pada 21 kejadian badai geomagnet skala sedang (*Moderate storm*) mulai Dst ≤ -100 nT), seperti dtampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2**. Daftar Kejadian badai geomagnet sedang (*strong storm*) mulai Dst < -100 nT sebagai bahan studi kasus.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **No** | **Tanggal Badai Geomagnet** | **nT** | **T-DstMin** |
| 1 | 6 Agt 2011 | -115 | 04.00 |
| 2 | 26-Sep-11 | -118 | 24.00 |
| 3 | 9-Mar-12 | -145 | 09.00 |
| 4 | 24-Apr-12 | -120 | 05.00 |
| 5 | 15-Jul-12 | -139 | 19.00 |
| 6 | 1 Okt 2012 | -122 | 05.00 |
| 7 | 9 Okt 2012 | -109 | 09.00 |
| 8 | 15-Nov-12 | -108 | 08.00 |
| 9 | 17-Mar-13 | -132 | 21.00 |
| 10 | 1-Jun-13 | -124 | 09.00 |
| 11 | 29-Jun-13 | -102 | 07.00 |
| 12 | 19-Feb-14 | -119 | 09.00 |
| 13 | 17-Mar-15 | -222 | 23.00 |
| 14 | 23-Jun-15 | -204 | 05.00 |
| 15 | 7 Okt 2015 | -124 | 23.00 |
| 16 | 20 Des 2015 | -155 | 23.00 |
| 17 | 1-Jan-16 | -110 | 01.00 |
| 18 | 13 Okt 2016 | -104 | 24.00 |
| 19 | 28 Mei 2017 | -125 | 08.00 |
| 20 | 8-Sep-17 | -124 | 02.00 |
| 21 | 26 Agt 2018 | -174 | 07.00 |

Dari 21 studi kasus kejadian badai geomagnet yang akan ditampilkan dalam pembahasan makalah ini hanya 6 kejadian badai geomagnet skala kuat kuat (Dst ≤ -139 nT) yakni kejadian tanggal 9 Maret 2012 (Dst = -145 nT), kejadian tanggal 15 Juli 2012 (Dst = -139 nT), kejadian tanggal 17 Maret 2015 (Dst = -222 nT), kejadian tanggal 23 Juni 2015 (Dst = -204 nT), kejadian tanggal 20 Desember 2015 (Dst = -155 nT), dan kejadian tanggal 26 Agustus 2018 (Dst = -174 nT).

**Studi Kasus I: Badai Geomagnet 9 Maret 2012 (Dst = -145 nT)**

Badai geomagnet 9 Maret 2012 diduga dipicu oleh 2 kejadian CME Halo berurutan tanggal 7 Maret 2012 yakni pukul 00.24 UT dan 01.30 UT dan 56 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 4. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 3.

**Gambar 4**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 9 Maret 2012

**Tabel 3**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **7-11 Maret 2012** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T33 = pukul 09.00 UT tanggal 9 Maret 2012T35 = pukul 11.00 UTT36 = pukul 12.00 UTT37 = pukul 13.00 UTT53 = pukul 05.00 UT tanggal 10 Maret 2012T56 = 08.00 UTδTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 53 | -16,4 | 35 | 14,1 |  |  | Start | Peak |  |
| N | 37 | 16 | 33 | 5,5 | N | 10,5 | -4 | -2 | 19 |
| V | 36 | 705 | 33 | 492 | V | 213 | -3 | -1 | 20 |
| P | 37 | 14,13 | 33 | 2,53 | P | 11,6 | -4 | -2 | 19 |
| Dst-min | 56 | -145 | 35 | 22 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 33 | -33 |  |  |  |  |  |
| Em | 53 | 11,69 | 33 | -1,67 | Em | 13,36 | 20 | 3 | 3 |

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 3, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi setelah 3-4 jam sebelum puncak N, V dan P angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi setelah 19-20 jam setelah puncak N, V dan P angin surya dan 3 jam setelah Bz(-) minimum.

**Studi Kasus II: Badai geomagnet 15 Juli 2012**

Badai geomagnet 15 Juli 2012 diduga dipicu oleh kejadian CME Halo tanggal 12 Juli 2012 yakni pukul 16.48 UT dan 74 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 5. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 4.

**Gambar 5**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 15 Juli 2012

**Tabel 4**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **13-17 Juli 2012** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T25 = pukul 01.00 UT tanggal 14 Juli 2012T28 = pukul 04.00 UTT40 = pukul 16.00 UT tanggal 14 Juli 2012T42 = pukul 18.00 UTT48 = pukul 00.00 UT tanggal 15 Juli 2012T53 = pukul 05.00 UT T58 = 10.00 UTT64 = 16.00 UTδTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 58 | -18,7 | 40 | -1,9 |  |  | Start | Peak |  |
| N | 53 | 20,7 | 40 | 2,2 | N | 310 | -13 | -9 | 11 |
| V | 48 | 665 | 40 | 355 | V | 9,88 | -12 | -6 | 26 |
| P | 28 | 11,25 | 25 | 1,37 | P | -154 | 8 | 14 | 36 |
| Dst-min | 64 | -139 | 42 | 15 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 40 | -5 |  |  |  |  |  |
| Em | 58 | 11,37 | 40 | 0,59 | Em | 10,78 | -18 | -16 | 8 |

Berdasarkan Gambar 5 dan Tabel 4, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi setelah 12-13 jam sebelum puncak N, dan V dan 8 jam setelah P angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi 11 setelah puncak N angin surya, 26 jam setelah V angin surya dan 36 jam setelah P angin surya serta 6 jam setelah Bz(-) minimum.

**Studi Kasus III: Badai geomagnet 17 Maret 2015**

Badai geomagnet 17 Maret 2015 diduga dipicu oleh kejadian CME tanggal 15 Maret 2015 yakni pukul 01.48 UT dan 70 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 6. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 5.

**Gambar 6**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 17 Maret 2015

**Tabel 5**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **15-19 Maret 2015** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T50 = pukul 02.00 UT tanggal 17 Maret 2015T51 = pukul 03.00 UTT53 = pukul 05.00 UT T59 = pukul 11.00 UTT62 = pukul 14.00 UTT70 = pukul 23.00 UT δTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 62 | -18,1 | 50 | 3,1 |  |  | Start | Peak |  |
| N | 53 | 33,7 | 50 | 13,1 | N | 20,6 | -3 | 0 | 17 |
| V | 59 | 614 | 51 | 412 | V | 202 | -9 | -6 | 11 |
| P | 59 | 17,99 | 50 | 5,13 | P | 12,86 | -9 | -6 | 11 |
| Dst-min | 70 | -139 | 53 | 56 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 50 | 13 |  |  |  |  |  |
| Em | 62 | 10,55 | 53 | -9,89 | Em | 20,44 | -12 | -9 | 8 |

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 5, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 3 jam sebelum puncak N angin surya, dan 9 jam sebelum puncak V, P angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi 17 jam setelah puncak N angin surya, 11 jam setelah puncak V dan P angin surya serta 8 jam setelah Bz(-) minimum.

**Studi Kasus IV: Badai geomagnet 23 Juni 2015**

Badai geomagnet 23 Juni 2015 diduga dipicu oleh kejadian CME Halo tanggal 22 Juni 2015 pukul 18.30 UT dan kemudian 37 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 7. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 6.

**Gambar 7**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 23 Juni 2015

**Tabel 6**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **21-25 Juni 2015** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T15 = pukul 15.00 UT tanggal 21 Juni 2015T17 = pukul 17.00 UTT19 = pukul 19.00 UT T43 = pukul 19.00 UT tanggal 22 Juni 2015T50 = pukul 02.00 UT tanggal 23 Juni 2015T51 = pukul 03.00 UTT52 = pukul 04.00 UTT70 = pukul 23.00 UT δTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 43 | -26,3 | 19 | -1 |  |  | Start | Peak | 9 |
| N | 19 | 41,7 | 15 | 12 | N | 29,7 | -4 | -2 | 33 |
| V | 51 | 742 | 15 | 282 | V | 460 | -36 | -34 | 1 |
| P | 19 | 9,06 | 15 | 1,78 | P | 7,28 | -4 | -2 | 33 |
| Dst-min | 52 | -204 | 17 | 34 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 15 | 1 |  |  |  |  |  |
| Em | 50 | 16,09 | 15 | -0,14 | Em | 20,44 | -35 | -32 | 2 |

Berdasarkan Gambar 7 dan Tabel 6, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 4 jam sebelum puncak N dan P angin surya, dan 36 jam sebelum puncak V angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi 2 jam setelah puncak N dan P angin surya, 34 jam setelah puncak V surya serta 9 jam setelah Bz(-) minimum.

**Studi Kasus V: Badai geomagnet 20 Desember 2015**

Badai geomagnet 20 Desember 2015 diduga dipicu oleh kejadian CME Halo tanggal 16 Desember 2015 pukul 08.30 UT dan kemudian 109 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 8. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 7.

**Gambar 8**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 20 Desember 2015

**Tabel 7**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **18-22 Desember 2015** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T35 = pukul 15.00 UT tanggal 21 Juni 2015T39 = pukul 17.00 UTT46 = pukul 19.00 UT T43 = pukul 19.00 UT tanggal 22 Juni 2015T50 = pukul 02.00 UT tanggal 23 Juni 2015T51 = pukul 03.00 UTT52 = pukul 04.00 UTT70 = pukul 23.00 UT δTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 71 | -18,3 | 35 | -0,3 |  |  | Start | Peak | -1 |
| N | 57 | 62,7 | 35 | 4 | N | 58,7 | -18 | -11 | 13 |
| V | 44 | 496 | 40 | 418 | V | 78 | -5 | 2 | 26 |
| P | 45 | 21,86 | 35 | 1 | P | 20,86 | -6 | 1 | 25 |
| Dst-min | 70 | -155 | 46 | 43 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 39 | 0 |  |  |  |  |  |
| Em | 70 | 7,43 | 39 | -0,13 | Em | 7,56 | -31 | -24 | 0 |

Berdasarkan Gambar 8 dan Tabel 7, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 18 jam sebelum puncak N, 5 jam sebelum puncak V angin surya dan 6 jam sebelum puncak P angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi 11 jam setelah puncak N angin surya, 23 jam setelah puncak V angin surya dan 25 jam setelah puncak P angin surya, dan 1 jam sebelum puncak Bz(-) minimum.

**Studi kasus VI: Badai geomagnet 26 Agustus 2018**

Badai geomagnet 20 Desember 2015 diduga dipicu oleh kejadian CME Halo tanggal 16 Desember 2015 pukul 08.30 UT dan kemudian 109 jam kemudian menyebabkan badai geomagnet. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditunjukkan pada Gambar 9. Sedangkan perlaku parameter N, V dan W angin surya, Em dan Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet ditujukkan pada Tabel 8.

**Gambar 9**. Pola variasi perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet 26 Agustus 2018

**Tabel 8**. Perilaku parameter kerapatan (N), kecepatan (V) dan tekanan (P) angin surya, medan listrik *merger* (Em), Bz(-) terkait *onset*, *main phase*, *recovery phase* badai geomagnet

|  |
| --- |
| **24-28 Agustus 2018** |
|  | **Tpeak** | **Nilai** | **T ost** | **Nilai** | **δost-peak** | **δTOnset-peak** | **δTSWpeak - Dst\_min** | **Ket** |
|  | **1** | **2** | **3** | **4** |  | **5** | **6** | **7** | **8** | T26 = pukul 02.00 UT tanggal 25 Agt 2018T29 = pukul 05.00 UTT32 = pukul 08.00 UT T30 = pukul 06.00 UT T38 = pukul 14.00 UT T51 = pukul 04.00 UT tanggal 26 Agt 2018T52 = pukul 05.00 UTT53 = pukul 06.00 UT T56 = pukul 12.00 UTδTOnset-peak start = Tpeak NVP – TDst\_Ost(0)δTOnset-peak Peak = Tpeak NVP- Tost peakδTSWpeak-Dst\_min = Tpeak Dst-min – Tpeak NVP |
| Bz | 53 | -16,8 | 30 | 6,4 |  |  | Start | Peak | -2 |
| N | 56 | 23,2 | 29 | 7 | N | 58,7 | -27 | -24 | -4 |
| V | 38 | 444 | 26 | 335 | V | 78 | -9 | -6 | 14 |
| P | 52 | 5,76 | 29 | 1,79 | P | 20,86 | -23 | -20 | -1 |
| Dst-min | 51 | -174 | 32 | 19 |  |  |  |  |  |
| TDst\_Ost(0) | 29 | 7 |  |  |  |  |  |
| Em | 53 | 6,64 | 38 | -4 | Em | 10,64 | -24 | -21 | -2 |

Berdasarkan Gambar 9 dan Tabel 8, diperoleh bahwa *onset* badai geomagnet terjadi 27 jam sebelum puncak N, 9 jam sebelum puncak V angin surya dan 23 jam sebelum puncak P angin surya. Sedangkan Dst minimum terjadi 4 jam sebelum puncak N angin surya, 14 jam setelah puncak V angin surya dan 1 jam sebelum puncak P angin surya, dan 2 jam sebelum puncak Bz(-) minimum.

Dari ke-6 studi kasus di atas, terlihat bahwa hampir semua perubahan onset perilaku parameter NVP angin surya dan Bz(-) bersamaan waktunya dengan onset badai geomagnet. Namun, ada juga yang perubahan onset perilaku parameter NVP angin surya dan Bz(-) terjadi sebelum onset badai geomagnet yakni pada kejadian badai geomagnet tanggal 20 Desember 2015.

Langkah berikutnya adalah menentukan dominasi masing-masing perilaku parameter N, V dan P angin surya bersamaan dengan Bz(-) dalam pembentukan badai geomagnet.

Tabel 9. Nilai perilaku parameter N, V dan P angin surya dan korelasi antar parameter angin surya terhadap badai geomagnet

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **No** | **Tanggal Badai Geomagnet** | **nT** | **T-DstMin** | N | V | P | Korelasi (%) | Jumah N, P > V |
| NSw-Dst | VSw-Dst | PSw-Dst |
| 1 | 6 Agt 2011 | -115 | 4 | 23,4 | 215 | 19,88 | -3,50931577 | -71,68242442 | -21,7207808 |  |
| 2 | 26-Sep-11 | -118 | 24 | 10,7 | 355 | 11,56 | 34,50091125 | -84,63055454 | -16,2139359 |  |
| 3 | 9-Mar-12 | -145 | 9 | 10,5 | 213 | 11,6 | 73,35991253 | -37,19044547 | 59,51357527 | 1 |
| 4 | 24-Apr-12 | -120 | 5 | 31,5 | 71 | 9,88 | 53,60594032 | -27,17357191 | 49,64989586 | 2 |
| 5 | 15-Jul-12 | -139 | 19 | 18,5 | 310 | 9,88 | 40,20336285 | -47,18090682 | 22,21404936 |  |
| 6 | 1 Okt 2012 | -122 | 5 | 18,9 | 138 | 4,23 | 15,05671718 | -86,78806341 | -11,4360536 |  |
| 7 | 9 Okt 2012 | -109 | 9 | 17,4 | 73 | 5,16 | -13,0586124 | -30,08350818 | -27,4132709 |  |
| 8 | 15-Nov-12 | -108 | 8 | 12,5 | 43 | 3,75 | 6,913455295 | 10,71338608 | 11,32165112 |  |
| 9 | 17-Mar-13 | -132 | 21 | 11,2 | 306 | 11,24 | 32,4276962 | -49,30643346 | 20,74721044 |  |
| 10 | 1-Jun-13 | -124 | 9 | 34,5 | 352 | 10,83 | 45,22026267 | -53,91880355 | 11,93747468 |  |
| 11 | 29-Jun-13 | -102 | 7 | 25,7 | 104 | 8,91 | 29,02288857 | 37,74788803 | 34,93983439 |  |
| 12 | 19-Feb-14 | -119 | 9 | 9,9 | 104 | 8,91 | -40,3070567 | -68,79062516 | -53,0484053 |  |
| 13 | 17-Mar-15 | -222 | 23 | 20,6 | 202 | 12,86 | 66,35986174 | -61,76342145 | 20,7183632 | 3 |
| 14 | 23-Jun-15 | -204 | 5 | 29,7 | 460 | 7,28 | 16,76316403 | -90,98530321 | -43,6687964 |  |
| 15 | 7 Okt 2015 | -124 | 23 | 24,2 | 357 | 8,06 | -13,8312986 | -70,33982255 | -50,0404552 |  |
| 16 | 20 Des 2015 | -155 | 23 | 58,7 | 78 | 20,86 | -24,6921904 | 51,61814816 | 3,72973769 |  |
| 17 | 1-Jan-16 | -110 | 1 | 32,5 | 143 | -0,09 | 58,87043109 | -15,86435144 | 53,27126729 | 4 |
| 18 | 13 Okt 2016 | -104 | 24 | 24,6 | 84 | 8,89 | 77,24904065 | 25,16280886 | 73,55301811 | 5 |
| 19 | 28 Mei 2017 | -125 | 8 | 55,3 | 105 | 14,34 | 58,56590633 | -40,18315187 | 51,0492695 | 6 |
| 20 | 8-Sep-17 | -124 | 2 | 13,9 | 332 | 11,7 | 26,45622048 | -76,73232944 | -23,1975776 |  |
| 21 | 26 Agt 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 parameter kecepatan angin surya (VSW) -37,58% disusul parameter kerapatan angin surya (NSW) 22,72% dan parameter tekanan angin surya (PSW) 4,88%. Hal ini sesuai dengan hasil peneliti sebelumnya (Burton et al., 1975; Ballatore dan Gonzales, 2003; Lundt, 2003). Walaupun secara umum, kecepatan angin surya (VSW) dominan menyebabkan badai geomagnet Namun, ada 7 kejadian badai yang dominan kerapatan dan tekanan angin surya (NSW dan PSW).

1. **Kesimpulan**

Berdasarkan pembahasan di atas, sepanjang siklus matahari ke-24 diperoleh bahwa badai geomagnet dominan dipengaruhi parameter kecepatan angin surya (VSW) -37,58% disusul parameter kerapatan angin surya (NSW) 22,72% dan parameter tekanan angin surya (PSW) 4,88%. Namun, ada beberapa kejadian badai geomagnet yang didominasi oleh kerapatan dan tekanan angin surya (NSW dan PSW). Dengan demikian, dalam kegiatan evaluasi dan prediksi cuaca antariksa terkait badai geomagnet kedepannya agar memperhitungkan ketiga parameter angin surya (NSW, VSW dan PSW) dalam pemodelannya.

**Ucapan Terima Kasih**

Penulis wajib menyampaikan ucapan terima kasih kepada Tim Pengelola website:

<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 (Pilihan)**

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 kejadian CME

**Pernyataan Kontribusi**

P. Pertama adalah peneliti/ kontributor utama yang merancang penelitian, menulis semua makalah ini dan mengolah serta menganalisis data.

**Rujukan**

Adekoya B. J., Chukwuma V. U., Bakare N. O., and 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. and W. D. Gonzalez, 2003, *On the estimates of ring current injection and decay*, Earth Planets Space, **55**, 427-435.

Burton, R. K., R. L. McPherron, and C. T. Russell, 1975, *An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst*, *J. Geophys. Res.,* ***80, 4204–***4214.

Chapman S., 1951, *The equatorial electrojet as detected from the abnormal electricurrents distribution above Huancayo*, Peru and elsewhere: Arch. Metrol. Geophys. Bioklimatol, **A4**, 368-390.

Futaana, Y., S. Barabash, M. Yamauchi, R. Lundin, andS. McKenna-Lawlor, 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., J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, and V.M. Vasyliunas, 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., K.N. Iyer, Hari Om Vats and P. K. Manoharan, 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).

Kivelson M. G., and Russell C. T., 1995, “*Introduce of plasma* physics”, Prentice-Hall, 1.

Kumar P., Uddin W., Taori A., Chandra R., and Bisht S., 2010, *Ionospheric response to the space weather event of 18 November 2003- An investigation*, Indian Journal of Radio & Space Physics, Vol 39, pp 290-295.

Nagatsuma T., 2002, “*Geomagnetic storm*”, Journal of the communications research laboratory, **49**, No. 3.

O’Brien, T. P. and R. L. McPherron, *An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay*, J. Geophys. Res., **105,** 7707-7720, 2000.

Russell C.T., 2006, *The solar wind interaction with the Earth’s Magnetosphere* : Tutorial, Department of Earth and space sciences and Institute of Geophysics and Space Physics of University of California, Los Angeles.

Santoso A., 2010, *Identifikasi Kondisi Angin matahari (Solar Wind) Untuk Prediksi Badai Geomagnet*, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY, Semarang, pp. 275-283.

Yermolaev, Y. I., M. Y. Yermolaev, G. N. Zastenker, L. M. Zelenyi, A. A. Petrukovich, and J. A. Sauvaud, 2005, *Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: A review*, Planet Space Sci., 53, 189-196.