

ESTIMASI BADAI GEOMAGNET BERDASARKAN KONDISI KOMPONEN ANGIN SURYA DAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET (ESTIMATION OF GEOMAGNETIC STORM BASED ON SOLAR WIND COMPONENT'S AND INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD CONDITION)

Anwar Santoso, Mamat Ruhimat, Rasdewita Kesumaningrum, Siska Fillawati

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djundjuna 133 Bandung 40173 Indonesia

e-mail: anwar.santoso@lapan.go.id

Diterima 8 Mei 2016; Direvisi 18 April 2017; Disetujui 19 Juli 2017

ABSTRACT

One of the space weather phenomena is geomagnetic storms. Geomagnetic storms were caused by the entry of fast solar wind due to Coronal Mass Ejection in conjunction with the Interplanetary Magnetic Field (IMF) B_z that leads to the south. Conditions of solar wind component along southward of IMF B_z before geomagnetic storms can determine the formation of geomagnetic storms. In addition, through the solar wind conditions and B_z component of the IMF before the geomagnetic storm intensity of geomagnetic storms can be estimated through the model of geomagnetic storms as a function of the density of solar wind and geomagnetic storms models as a combined function of the density and speed of the solar wind. This case study used geomagnetic storm events data occurred in March 17, 2013; February 19, 2014; March 17, 2015; and June 23, 2015. The results of the study showed that the estimates of the geomagnetic storms (Dst index) based on the condition of the solar wind components before geomagnetic storms and geomagnetic storm models as a combined function of the density and velocity components of the solar wind were still quite good. However, the estimates of the geomagnetic storms using the model as a combined function of the density and velocity components of the solar wind with the average deviation of 17,6 nT (12.8%) were better than using the model of geomagnetic storms as a function of the solar wind density with the average deviation of 37.3 nT (27.6%).

Keywords: *solar wind parameters, Interplanetary Magnetic Field, geomagnetic storm*

ABSTRAK

Salah satu fenomena cuaca antariksa adalah badai geomagnet. Badai geomagnet terjadi akibat masuknya angin surya cepat karena lontaran massa korona bersamaan dengan Bz *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) yang mengarah ke selatan. Kondisi komponen angin surya bersama arah selatan Bz IMF sebelum badai geomagnet dapat menentukan pembentukan badai geomagnet. Selain itu, melalui kondisi komponen angin surya dan Bz IMF sebelum badai geomagnet maka intensitas badai geomagnet dapat diestimasi melalui model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan kerapatan dan kecepatan angin surya. Untuk studi kasus digunakan data kejadian badai geomagnet pada 17 Maret 2013, 19 Februari 2014, 17 Maret 2015 dan 23 Juni 2015. Hasil studi diperoleh bahwa estimasi badai geomagnet (indeks Dst) berdasarkan kondisi komponen angin surya sebelum badai geomagnet dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya masih cukup baik. Namun demikian, estimasi badai geomagnet menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya dengan deviasi rata-rata 17,6 nT (12,8%) lebih baik daripada model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dengan deviasi rata-rata 37,3 nT (27,6%).

Kata kunci: *parameter angin surya, medan magnet antarplanet, badai geomagnet*

1 PENDAHULUAN

Riset cuaca antariksa merupakan kegiatan penting di Pusat Sains Antariksa LAPAN untuk mempelajari karakteristik dan sumber pembangkitnya sehingga dapat dimanfaatkan untuk mitigasi terhadap dampak yang ditimbulkannya di lingkungan Bumi seperti diamankan dalam Undang-undang No. 21 Tahun 2013. Matahari merupakan sumber utama penggerak cuaca antariksa. Salah satu fenomena di Matahari yang menjadi sumber penggerak cuaca antariksa adalah *Coronal Mass Ejection* (CME) atau lontaran massa korona. Ketika terjadi lontaran massa korona, partikel-partikel dan medan magnet dilontarkan ke antariksa. Partikel-partikel tersebut terbawa serta oleh angin surya (*Solar Wind*, SW). Angin surya yang menuju Bumi akan bertumbukan dengan magnetosfer. Dalam tumbukan ini akan terjadi injeksi energi medan listrik melalui mekanisme rekoneksi (Burton dkk., 1975; O'Brien dan McPherron, 2000; Ballatore dan Gonzalez, 2003, Russell, 2006). Selanjut-

nya dari energi yang dihasilkan tersebut akan menyebabkan pertumbuhan arus cincin di sekitar Bumi. Pertumbuhan arus cincin akibat masuknya energi medan listrik akan memicu gangguan medan magnet Bumi dengan skala global (Gonzales dkk., 1994; Nagatsuma, 2002; Kivelson dan Russell, 1995; Gopalswamy, 2009; Russel, 2006; Khabarova, 2007; Santoso, 2010). Peristiwa ini dinamakan badai geomagnet (*magnetic storm*). Ketika rekoneksi berlangsung, injeksi partikel-partikel yang berasal dari lontaran masa korona tersebut di atas akan semakin intens bersamaan dengan medan magnet antarplanet mengarah ke selatan (*Interplanetary Magnetic Field* arah Bz(-)). Angin surya yang terlibat rekoneksi terproyeksi dalam komponen densitas (N_{sw} dalam $1/\text{cm}^3$), kecepatan (V_{sw} dalam km/detik) dan tekanan (P_{sw} dalam nPa). Perpaduan antara aktivitas di permukaan Matahari dan komponen-komponen angin surya dengan *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) atau medan magnet antarplanet arah selatan

(Bz dalam nT) menentukan kuat atau lemahnya pertumbuhan arus cincin di magnetosfer. Bahkan bisa menentukan intensitas badai geomagnet yang dibentuknya (Yermolaev dkk., 2005; Khabarova, 2007; Futaana dkk., 2007; Jadeja dkk., 2008; Gopalswamy, 2009). Intensitas badai geomagnet di ekuator, lintang rendah dan menengah dinyatakan dengan indeks Dst (dalam nT). Tingkatan kuat badai geomagnet (melalui indeks Dst) dapat dikelompokkan menjadi lemah ($Dst > -50\text{nT}$); sedang ($-50\text{ nT} > Dst > -100\text{ nT}$); kuat ($-100\text{ nT} > Dst > -200\text{ nT}$); sangat kuat ($-200\text{ nT} > Dst > -300\text{ nT}$) dan super badai ($Dst < -300\text{ nT}$) (Loewe dan Prolls, 1997).

Umumnya, pertumbuhan arus cincin yang menimbulkan badai geomagnet dipengaruhi oleh tekanan dinamik angin surya. Vsw merupakan salah satu komponen tekanan dinamik tersebut. Namun, beberapa fenomena pertumbuhan arus cincin terjadi bersamaan kuatnya komponen densitas dan tekanan angin surya tanpa kenaikan komponen kecepatan angin surya. Berdasarkan kondisi tersebut, Khabarova (2007) memperkenalkan formulasi kaitan antara Bz dan Nsw yakni :

$$P = B_{z_{min}} - \sqrt{N dT} \quad (1-1)$$

Dengan P adalah fungsi linier antara $B_{z_{min}}$ dengan densitas angin surya (N) dan dT adalah durasi waktu antara N mencapai maksimum dan Bz mencapai minimum (jam).

Dari studi kasus terhadap 30 kejadian badai geomagnet sepanjang 1995-2001, Khabarova (2007) telah memperoleh kaitan antara Dst dengan P yakni:

$$Dst = -4,5 + 6,5 P \quad (1-2)$$

Dalam makalah ini persamaan (1-2) disebut dengan model badai geomagnet sebagai fungsi komponen kerapatan angin surya. Dst sebenarnya merepresentasikan ukuran arus gabungan antara arus cincin dan arus *magnetopause*. Oleh karenanya, Dst ini harus dikoreksi dari pengaruh arus magnetopause. Dst yang terkoreksi arus magnetopause dinotasikan dengan Dst*. Dst* dirumuskan sebagai:

$$Dst^* = Dst - bP^{\frac{1}{2}} + c \quad (1-3)$$

Dengan Dst* menyatakan indeks Dst yang dibangkitkan hanya oleh arus cincin, Konstanta $b = 4,68\text{ nT}/(\text{nPa})^{1/2}$ dan $c = 7,26\text{ nT}/(\text{nPa})^{1/2}$ (Burton dkk., 1975; O'Brien dan McPherron, 2000; Ballatore and Gonzalez, 2003).

Oleh karena kenyataannya, banyak kejadian badai geomagnet dibangkitkan oleh komponen kecepatan (Vsw) angin surya, maka dalam makalah ini penulis memperkenalkan juga variabel P (*fitting factor*) sebagai fungsi Vsw dengan mengadopsi dan memodifikasi variabel P sebagai fungsi kerapatan (Nsw) angin surya yang diperkenalkan oleh Khabarova (2007) seperti ditunjukkan pada persamaan (1-1) sehingga diperoleh P sebagai fungsi Vsw dengan formulasinya sebagai,

$$P_{Bz-Vsw} = B_{z_{min}} - \sqrt{V dT} \quad (1-4)$$

Dengan dT adalah waktu antara Bz minimum dan puncak Vsw.

Banyak juga kejadian badai geomagnet dibangkitkan oleh perpaduan perilaku komponen Nsw dan Vsw sehingga P yang mewakili kombinasi pengaruh komponen Vsw dan Nsw (gabungan Persamaan (1-1) dan (1-4)) diformulasikan sebagai,

$$\begin{aligned} P_{tot} &= P + P_{Bz-Vsw} \\ P_{tot} &= P_{Bz-Nsw} + P_{Bz-Vsw} \end{aligned} \quad (1-5)$$

Dengan P sebagai fungsi N_{sw} dari Persamaan (1-1). $P_{Bz-V_{sw}}$ adalah variabel P sebagai fungsi kecepatan angin surya (V_{sw}) yang diadopsi dari Khabarova (2007).

Dengan menggunakan 64 kejadian badai geomagnet sepanjang tahun 1996-2006 maka penulis telah memperoleh kaitan antara P_{tot} dengan Dst^* minimum yakni,

$$Dst^* = 1,599(P_{total}) - 34,48 \quad (1-6)$$

Persamaan (1-6) ini disebut dengan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya.

Dalam makalah ini dilakukan estimasi badai geomagnet menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya. Dengan membandingkan kedua hasil ini diharapkan kejadian badai geomagnet terutama yang ekstrim dapat diperkirakan. Selanjutnya, dimanfaatkan untuk mitigasi terhadap dampak yang merugikannya.

2 DATA DAN METODE

Data yang digunakan adalah indeks Dst dari universitas Kyoto, Jepang (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html) tahun 2013-2015, komponen angin surya (densitas, N_{sw} ; kecepatan, V_{sw} ; tekanan, P_{sw}) dan komponen Bz IMF dari NASA/Goddard Space Flight Center, Amerika Serikat (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) tahun 2013-2015.

Dari identifikasi indeks Dst tahun 2013-2015 maka diperoleh 8 kejadian badai geomagnet kuat ($Dst < -100$ nT), seperti ditunjukkan pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1: DAFTAR KEJADIAN BADAI GEOMAGNET KUAT (Dst , -100 nT) TAHUN 2013-2015

No.	Tanggal Kejadian	$Dst_{Minimum}$
1	17 Maret 2013	-132 nT
2	1 Juni 2013	-119 nT
3	19 Februari 2014	-116 nT
4	17 Maret 2015	-132 nT
5	23 Juni 2015	-204 nT
6	7 Oktober 2015	-124 nT
7	20 Desember 2015	-170 nT
8	31 Desember 2015	-109 nT

Sebagai studi kasus dipilih kejadian badai geomagnet tanggal 17 Maret 2013, 19 Februari 2014, 17 Maret 2015 dan 23 Juni 2015. Berikutnya dilakukan penentuan penentuan $P_{Bz-N_{sw}}$ dari Persamaan (1-1) dengan input Bz , N_{sw} dan dT pada empat kejadian badai geomagnet kuat pada tanggal tersebut di atas. $P_{Bz-N_{sw}}$ yang diperoleh selanjutnya diinputkan ke model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya untuk mengestimasi Dst . Dengan input Bz , N_{sw} dan dT pada kejadian badai geomagnet tanggal 17 Maret 2013, 19 Februari 2014, 17 Maret 2015 dan 23 Juni 2015 yang sama maka dilakukan penentuan P_{Tot} dari Persamaan (1-5) yang hasilnya diinputkan ke model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya untuk estimasi Dst^* . Hasil keluaran model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya kemudian dianalisis dengan membandingkan hasil keluaran antar keduanya dan juga dengan Dst data. Dalam makalah ini penulis mengasumsikan bahwa baik model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya maupun model badai geomagnet sebagai

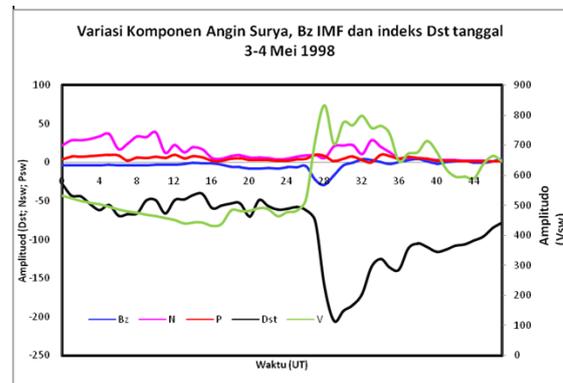
fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya akan memiliki efisiensi dan daya guna yang tinggi untuk kegiatan estimasi badai geomagnet apabila selisih waktu antara Bz mencapai minimum dan Dst mencapai minimum adalah minimal 3 jam. Hal ini karena kedua model mempunyai masukan Bz minimum sebagai salah satu faktor penentunya yakni dalam formulasi P_{Bz-Nsw} dan P_{total} . Sehingga apabila selisih waktu antara Bz mencapai minimum dan Dst mencapai minimum adalah 0 atau hanya 1 jam maka ketika Bz mencapai minimum, Dst juga sudah mencapai minimum. Estimasi badai geomagnet menggunakan kedua model tersebut dengan masukan Bz minimum menjadi tidak efisien dan tidak berdaya guna.

3 HASIL PEMBAHASAN

Dengan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya (Persamaan 1-1) dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya (Persamaan 1-6) maka estimasi kejadian badai geomagnet dan sekaligus besar intensitasnya dapat dilakukan. Sayangnya, rumus ini masih memiliki kelemahan atau kurang bermanfaat jika dT yakni durasi waktu antara Nsw atau Nsw mencapai maksimum dengan Bz minimum terjadi di sekitar Dst minimum atau puncak intensitas badai geomagnet. Hal ini dikarenakan parameter P_{total} mengandung variabel dT tersebut. Contohnya fenomena ini dijumpai pada kegiatan pengolahan data sebelumnya yakni pada kejadian badai geomagnet yang ilustrasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1.

Gambar 3-1, menunjukkan perilaku komponen angin surya (Nsw , Vsw , dan Psw) dan Bz IMF sebelum

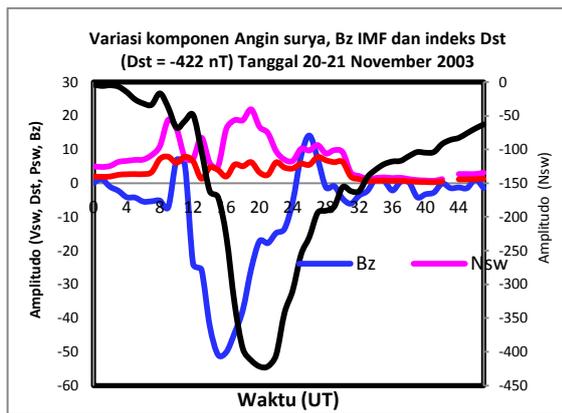
badai geomagnet 4 Mei 1998. Dari Gambar 3-1 diketahui bahwa intensitas badai geomagnet maksimum terjadi pukul 05.00 UT pada 4 Mei 1998 ($Dst = -205$ nT). Bz IMF mencapai nilai minimum pukul 04.00 UT pada 4 Mei 1998. Demikian pula komponen Nsw dan Vsw angin surya mencapai puncak pada pukul 04.00 UT, 4 Mei 1998. Selisih waktu antara Bz IMF mencapai minimum dengan Dst mencapai minimum hanya sebesar 1 jam. Dengan kondisi ini maka penerapan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya untuk estimasi Dst minimum kurang efisien.



Gambar 3-1: Perilaku parameter angin surya, Bz IMF dan indeks Dst pada saat badai geomagnet tanggal 4 Mei 1998

Sementara itu, untuk kondisi lainnya yaitu jika maksimum Vsw atau Nsw dan Bz minimum terjadi tidak di sekitar Dst minimum maka penerapan rumus model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya untuk estimasi Dst minimum akan berdayaguna tinggi. Contohnya fenomena ini dijumpai pada kegiatan pengolahan data sebelumnya yakni pada kejadian badai geomagnet yang

ilustrasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3-2.



Gambar 3-2: Perilaku parameter angin surya, Bz IMF dan indeks Dst pada saat badai geomagnet 20 November 2003

Gambar 3-2, menunjukkan perilaku komponen angin surya (Nsw, Vsw, dan Psw) dan Bz IMF sebelum badai geomagnet tanggal 20 November 2003. Dari Gambar 3-2, diketahui bahwa intensitas badai geomagnet maksimum terjadi pukul 20.00 UT pada 20 November 2003 (Dst = -422 nT). Bz IMF mencapai nilai minimum pukul 15.00 UT, 20 November 2003. Sedangkan komponen Nsw dan Vsw angin surya mencapai puncak pada pukul 09.00 UT, 20 November 2003. Selisih waktu antara Bz IMF mencapai minimum dengan Dst mencapai minimum sebesar 5 jam. Kondisi ini relatif masih cukup efisien untuk menerapkan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya untuk estimasi Dst minimum. Kondisi yang paling ideal untuk menerapkan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya yaitu jika jeda waktu Bz mencapai minimum dengan Dst mencapai minimum lebih lama lagi dan jeda waktu Bz mencapai minimum tidak terlalu besar dengan puncak nilai Nsw dan Vsw.

Dengan demikian untuk jeda waktu ketika Bz mencapai minimum sampai Dst minimum berkisar antara 2-3 jam, maka estimasi kejadian badai geomagnet dan sekaligus besar intensitasnya masih logis untuk dapat dilakukan menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi komponen kerapatan angin surya yakni $Dst = 6,5 (P_{Bz-Nsw}) - 4,5$ dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya yakni $Dst^* = 1,599 (P_{Total}) - 34,48$.

Sebagai studi kasus, dalam makalah ini dianalisis 4 kejadian badai geomagnet dengan $Dst < -100$ nT sepanjang 2013-2015.

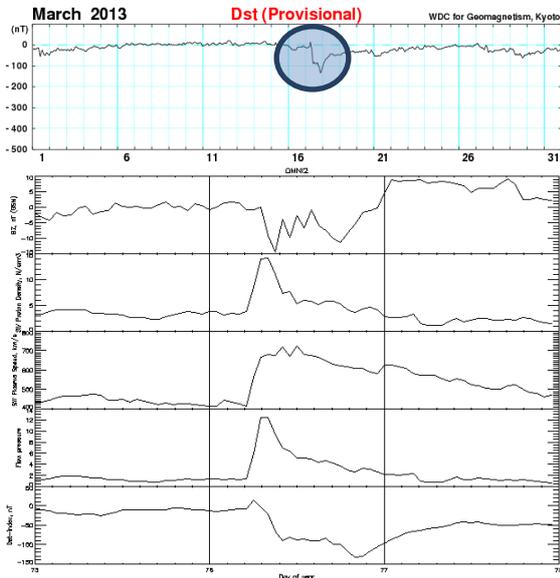
Studi Kasus I: Estimasi Badai Geomagnet (Dst = -132 nT) tanggal 17 Maret 2013

Badai geomagnet 17 Maret 2013 diduga terjadi karena dipicu oleh kejadian *flare* yang diikuti oleh lontaran massa korona pada 15 Maret 2013 pukul 17.20 UT (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/). Akibat lontaran massa korona ini maka parameter angin surya mengalami kenaikan mendadak ketika rekoneksi. Bersamaan dengan itu, medan magnet antar planet (IMF) sedang mengarah ke selatan sehingga menyebabkan badai geomagnet yang ditandai dengan terdepresinya indeks Dst sampai nilai -132 nT pada 17 Maret 2013 pukul 20.00 UT, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-3.

Identifikasi terhadap parameter angin surya, IMF Bz dan indeks Dst diperoleh $Bz = -14,4$; $Nsw = 14,2$; $Vsw = 721$ km/s; $dT (Bz-N) = 1$; $dT (Bz-V) = 1$ dan $Pa = 6,25$.

Berdasarkan data tersebut, kita hitung P_{Bz-Nsw} menggunakan Persamaan (1-1), P_{Bz-Vsw} menggunakan Persamaan (1-4) dan P_{total} menggunakan Persamaan (1-5), sehingga diperoleh $P_{Bz-Nsw} = -18,22$; $P_{Bz-Vsw} = -41,25$ dan $P_{Total} = -59,42$. Kemudian, dilakukan estimasi Dst dan Dst^* minimum untuk kejadian badai geomagnet tanggal 17 Maret 2013

menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya, maka diperoleh $Dst = 6,5 (-18,22) - 4,5 = -122,93$ dan $Dst^* = 1,599 (-59,4197) - 34,48 = -129,49$ nT.

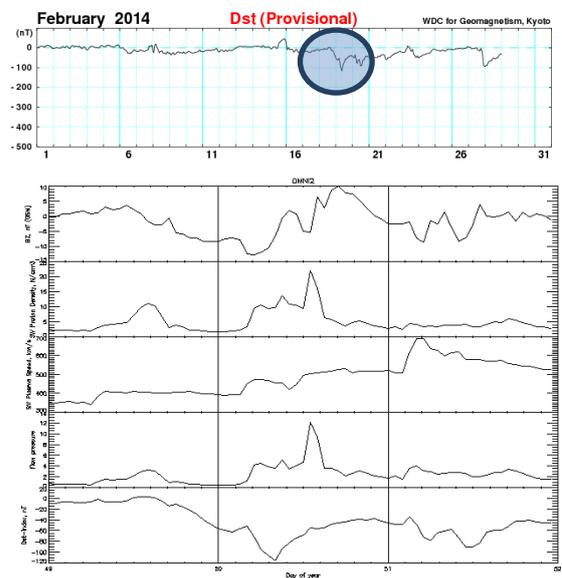


Gambar 3-3:(atas) Variasi indeks Dst Bulan Maret 2013 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201303/index.html), (bawah) Perilaku parameter angin surya, Bz IMF dan indeks Dst (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) pada saat badai geomagnet 17 Maret 2013

Dibandingkan dengan *raw* data Dst minimum (-132 nT), diperoleh deviasi antara Dst minimum *raw* data dengan hasil model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya sebesar -9,07 nT (6,87%) dan terhadap Dst^* sebesar -2,51 nT (1,90%). Yang menarik dalam kasus ini, jeda waktu antara Bz mencapai minimum sampai Dst mencapai minimum adalah 11 jam. Hal ini berarti sudah dapat diestimasi nilai Dst minimum 11 jam sebelum Dst tersebut benar-benar mencapai titik minimumnya.

Studi Kasus II:Estimasi Badai Geomagnet (Dst = -112 nT) 19 Februari 2014

Peristiwa badai geomagnet pada kejadian ini diduga terjadi karena dipicu oleh dua kejadian flare yang diikuti oleh lontaran massa korona yaitu flare tanggal 16 Februari 2014 pukul 10.00 UT dan tanggal 18 Februari 2014 pukul 01.36 UT. Kedua lontaran massa korona ini mengakibatkan parameter angin surya mengalami kenaikan mendadak ketika rekoneksi. Bersamaan dengan itu, medan magnet antar planet (IMF) sedang mengarah ke selatan cukup kuat sehingga indeks Dst mencapai nilai -112 nT pada tanggal 19 Februari 2014 pukul 08.00 UT, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-4.



Gambar 3-4:(atas) Variasi indeks Dst Bulan Februari 2014 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/201402/index.html), (bawah) Perilaku parameter angin surya, Bz IMF dan indeks Dst (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) pada saat badai geomagnet tanggal 19 Februari 2014

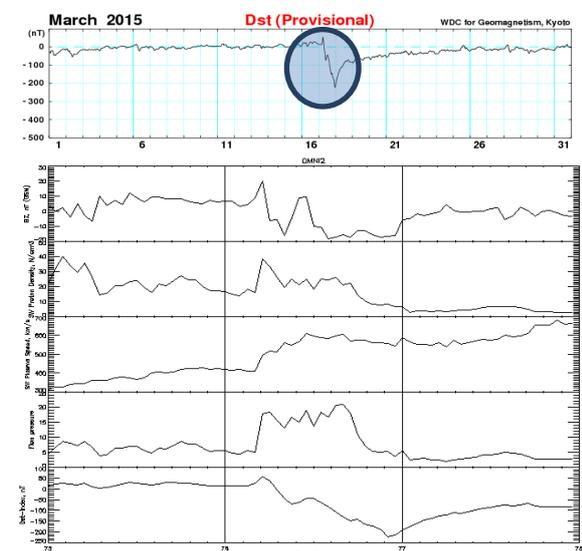
Sesudah dilakukan identifikasi terhadap parameter angin surya-diperoleh $Bz = -12,6$; $Nsw = 10,5$; $Vsw = 474$ km/s; $dT (Bz-N) = 1$; $dT (Bz-V) = 1$ dan $Pa = 4,27$.

Berdasarkan perhitungan seperti yang dilakukan pada kasus I diperoleh $P_{Bz-Nsw} = -15,84$; $P_{Bz-Vsw} = -34,37$ dan $P_{Total} = -50,21$.

Hasil estimasi terhadap Dst dan Dst* minimum didapat Dst = -107,46 dan Dst* = -114,77 nT. Deviasi antara Dst minimum *raw* data dengan Dst hasil keluaran model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya sebesar 4,54 nT (-4,05%). Sedangkan terhadap Dst* hasil keluaran model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya sebesar -2,77 nT (2,47%). Jeda waktu antara Bz mencapai minimum sampai Dst mencapai minimum adalah 4 jam.

Studi Kasus III: Estimasi Badai Geomagnet (Dst = -223 nT) 17 Maret 2015

Gambar 3-5 memperlihatkan parameter angin surya yang mengalami kenaikan mendadak ketika rekoneksi dikarenakan adanya flare yang diikuti oleh lontaran massa korona pada 15 Maret 2015. Bersamaan dengan itu, medan magnet antar planet (IMF) sedang mengarah ke selatan cukup kuat sehingga menyebabkan badai geomagnet yang ditandai dengan terdepresinya indeks Dst sampai nilai -223 nT, 17 Maret 2015 pukul 22.00 UT.



Gambar 3-5:(atas) Variasi indeks Dst, Maret 2015 (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/201503/index.html), (bawah) Kondisi komponen angin surya, Bz IMF dan indeks Dst (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) pada saat badai geomagnet tanggal 17 Maret 2015

Hasil identifikasi terhadap parameter angin surya, IMF Bz dan indeks Dst diperoleh Bz = -16,3; Nsw = 26,2; Vsw = 609 km/s; dT (Bz-N) = 7; dT (Bz-V) = 8 dan Pa = 20,76. Berdasarkan Persamaan (1-1), (1-4) dan (1-5) diperoleh $P_{Bz-Nsw} = -29,84$; $P_{Bz-Vsw} = -86,10$ dan $P_{Total} = -115,94$. Selanjutnya dilakukan estimasi terhadap Dst dan Dst* minimum untuk kejadian badai geomagnet 17 Maret 2015 menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya, maka diperoleh Dst = -198,48 dan Dst* = -219,87 nT.

Deviasi antara Dst minimum *raw* data dengan Dst hasil keluaran model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya sebesar 24,52 nT (-11%). Sedangkan deviasi antara Dst minimum *raw* data dengan Dst* hasil keluaran model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya sebesar 3,13 nT (-1,40%). Adapun jeda waktu antara Bz mencapai minimum sampai Dst mencapai minimum adalah 14 jam.

Studi Kasus IV:Estimasi Badai Geomagnet (Dst = -204 nT) 23 Juni 2015

Kejadian badai geomagnet, 23 Juni 2015 diduga karena ditimbulkan oleh dua kejadian flare yang diikuti oleh lontaran massa korona. Akibatnya parameter angin surya mengalami kenaikan mendadak ketika rekoneksi. Pada saat itu, medan magnet antar planet (IMF) sedang mengarah ke selatan cukup kuat sehingga menyebabkan indeks Dst terdepresi mencapai nilai -204 nT pada tanggal 23 Juni 2015 pukul 05.00 UT, seperti ditunjukkan pada Gambar 3-6.

surya ke magnetosfer Bumi bersamaan dengan Bz IMF yang mengarah ke selatan. Perilaku komponen angin surya bersama Bz IMF sebelum badai geomagnet dapat menentukan terbentuknya badai geomagnet yang ditimbulkannya. Dari analisis dapat disimpulkan bahwa estimasi badai geomagnet (indeks Dst) berdasarkan kondisi komponen angin surya sebelum badai geomagnet dan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya masih cukup baik. Namun demikian, estimasi badai geomagnet menggunakan model badai geomagnet sebagai fungsi gabungan komponen kerapatan dan kecepatan angin surya dengan deviasi rata-rata 17,6 nT (12,8%) lebih baik daripada model badai geomagnet sebagai fungsi kerapatan angin surya dengan deviasi rata-rata 37,3 nT (27,6%).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Kyoto, Jepang dan NASA-Goddard Space Flight Center, Amerika Serikat atas penggunaan data indeks Dst dan angin surya serta IMF. Terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Pusat Sains Antariksa dan tim penelaah serta dewan penyunting JSD LAPAN atas saran dan masukannya untuk penyempurnaan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

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.

Futaana, Y., S., Barabash, M., Yamauchi, R., Lundin, and S. 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, 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, 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 C. T., Russell 1995. *Introduce of Plasma Physics*, Prentice-Hall, 1.

Loewe, C. A., and G. W., Prolls, 1997. *Classification and Mean Behavior of Magnetic Storms*, J. Geophys. Res. Vol. 102, 14209-14213.

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

O'Brien, T. P., and R. L., McPherron, 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., 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 Surya (Solar Wind) Untuk Prediksi Badai Geomagnet*, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng & DIY, Semarang, 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.