



BADAI GEOMAGNET SEBAGAI UKURAN GEOEFEKTIVITAS MATAHARI BERSAMA DENGAN MEDAN MAGNET ANTARPLANET B_z DALAM PEMBENTUKAN BADAI GEOMAGNET

(Geomagnetic Storm as a geo-effectiveness measure of the solar activity and B_z Interplanetary Magnetic Field During the Geomagnetic Storm Formation)

Anwar Santoso, Mamat Ruhimat, Rasdewita Kesumaningrum

Pusat Sains Antariksa-LAPAN

Email: anwar.santoso@lapan.go.id

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015

Direvisi: 16-10-2016

Disetujui: 19-10-2016

Diterbitkan: 24-10-2016

Kata kunci:

badai geomagnet,
lontaran massa korona,
angin surya, medan
magnet antarplanet,
geoeftektivitas.

Badai geomagnet sangat ditentukan oleh arah CME atau CH dan parameter angin surya serta B_z IMF pada sebelum, saat dan setelah rekoneksi. Letak posisi kejadian CME atau CH di cakram matahari yang berpotensi mengarah ke bumi dan juga dapat memicu badai geomagnet dinamakan geoeftektivitas matahari. Badai geomagnet akan semakin intens jika saat rekoneksi terjadi bersamaan dengan medan magnet antarplanet yang cenderung mengarah ke selatan (B_z). Oleh karena itu, geoeftektivitas matahari dan medan magnet antarplanet arah selatan sebelum, saat dan setelah rekoneksi menentukan kelas badai geomagnet. Dengan demikian maka badai geomagnet dapat digunakan sebagai ukuran untuk menginterpretasikan geoeftektivitas aktivitas matahari dan medan magnet antarplanet B_z sebelum rekoneksi. Untuk membuktikan hal itu, maka dalam makalah ini dilakukan olah data komponen angin surya, B_z IMF dan indeks Dst tahun 1994-2004. Hasil analisis diperoleh bahwa nilai korelasi antara nilai P_{Total} dengan kelas intensitas badai geomagnet (indeks Dst) lebih besar dibandingkan dengan korelasi antara nilai E_m (mV/m) dengan kelas intensitas badai geomagnet. Distribusi kelompok nilai P_{Total} terhadap kelas intensitas badai geomagnet juga lebih jelas daripada kelompok nilai E_m (mV) terhadap kelas intensitas badai geomagnet. Nilai $P_{Total} = -20 > P_{Total} > -50$ seluruhnya terkait dengan badai geomagnet kelas sedang ($-50 \text{ nT} > Dst > -100 \text{ nT}$). Nilai $P_{Total} = -100 > P_{Total} > -140$ terkait dengan badai geomagnet kelas kuat ($-100 \text{ nT} > Dst > -200 \text{ nT}$) dan sekaligus kelas sangat kuat ($-200 \text{ nT} > Dst > -300 \text{ nT}$). Nilai $P_{Total} < -145$ terkait dengan badai geomagnet kelas super badai ($Dst < -300 \text{ nT}$). Ada nilai P_{Total} yang menjadi irisan dari dua kelas badai geomagnet yakni nilai $P = -50$ s/d -100 yang menjadi irisan antara badai geomagnet kelas sedang dan kuat. Nilai P_{Total} di atas -100 nT berkaitan dengan kejadian badai geomagnet pada kelas kuat ke atas. Untuk keperluan prediksi, hasil ini dapat dimanfaatkan untuk estimasi awal intensitas badai geomagnet yang akan terjadi dengan terlebih dahulu ditentukan nilai P_{Total} -nya.

ABSTRACT

Keywords:

geomagnetic storm,
Coronal mass ejection,
solar wind,
interplanetary magnetic
field, geo-effectiveness.

Geomagnetic storm is strongly influenced by the direction of CME and behavior of the solar wind and the IMF Bz before, during and after reconnection. This is called the geo-effectivity parameters of solar activity and space environment represented by the notation P_{Total} and E_m (mV / m). Therefore, geomagnetic storms can be considered as a geo-effectivity parameters of solar activity and space environment. To prove this, done data processing of the solar wind component, IMF Bz and Dst index in 1994-2004. Analysis results showed that the correlation value between the P_{Total} with the geomagnetic storms intensity (Dst index) is greater than the correlation value between E_m (mV / m) with the geomagnetic storms intensity (Dst index). The distribution of P_{Total} value to the class of the geomagnetic storm intensity also more clearly than the E_m value (mV / m) to the class of the geomagnetic storm intensity. All of the P_{Total} value = $-20 > P_{Total} > -50$ associated with moderate geomagnetic storms ($-50 \text{ nT} > \text{Dst} > -100 \text{ nT}$). The P_{Total} value = $-100 > P_{Total} > -140$ associated with strong geomagnetic storm ($-100 \text{ nT} > \text{Dst} > -200 \text{ nT}$) and at once with very strong geomagnetic storm ($-200 \text{ nT} > \text{Dst} > -300 \text{ nT}$). The P_{Total} values < -145 related to the superbub geomagnetic storm ($\text{Dst} < -300 \text{ nT}$). There is the P_{Total} value which be slices of two classes geomagnetic storms that is the P_{Total} value = $-50 \text{ s / d} -100$. These values become slices between moderate and strong classes. P_{Total} values above -100 nT regard to the geomagnetic storms events on strong class an more. For the prediction purposes, these results can be used to the initial estimate the geomagnetic storms intensity that will occur after P_{Total} value was determined.

1. Pendahuluan

Badai geomagnet (*Magnetic storms*) adalah gangguan terhadap medan magnet bumi (geomagnet) yang disebabkan oleh *Coronal Mass Ejections* (CME) dari Matahari yang terbawa serta angin surya mengarah tepat ke Bumi dan masuk ke dalam magnetosfer melalui mekanisme rekoneksi. Efektivitas masuknya partikel angin surya ke Bumi bergantung dari orientasi komponen Bz medan magnet antar planet (*Interplanetary Magnetic Field, IMF Bz* [utara (Bz(+)) dan selatan (Bz(-))]). CME halo (sudut 360°) di bagian barat cakram matahari yang tepat mengarah ke Bumi bersamaan dengan IMF yang cenderung mengarah ke selatan dengan intensitas dan lama maka akan berpotensi menghasilkan badai geomagnet sangat kuat ($\text{Dst} \leq -100 \text{ nT}$). Fenomena ini dapat dikatakan sebagai idealnya kondisi geoeftivitas matahari dan medan magnet antarplanet Bz yang berpotensi menghasilkan badai geomagnet kuat (*Space weather geo-effectiveness*).

Sebaliknya, CME yang besar dan tepat mengarah ke Bumi bersamaan dengan IMF mengarah ke utara menghasilkan badai geomagnet kurang kuat ($\text{Dst} > -100 \text{ nT}$).

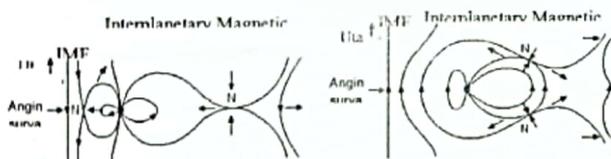
Fenomena ini dapat dikatakan sebagai kondisi kurang ideal geoeftivitas cuaca antariksa (Gopalswamy, 2009; Vats, 2006). Dengan demikian badai geomagnet yang terjadi, merupakan representasi dari geoeftivitas cuaca antariksa yang sedang berlangsung. Untuk membuktikan bahwa badai geomagnet dapat dijadikan sebagai indeks geoeftivitas cuaca antariksa maka dilakukan kajian kaitan antara fenomena cuaca antariksa dengan intensitas badai geomagnet yang dihasilkannya. Tujuannya mendapatkan hasil kajian yang membuktikan bahwa badai geomagnet dapat digunakan sebagai indeks geoeftivitas cuaca antariksa. Sasarannya mendapatkan bukti bahwa badai geomagnet dapat diklaim sebagai indeks geoeftivitas cuaca antariksa.

1. Landasan Teori

Badai geomagnet (*Magnetic storms*) adalah gangguan terhadap medan magnet bumi (geomagnet) yang disebabkan oleh *Coronal Mass Ejections* (CME) dari Matahari. Badai geomagnet merupakan salah satu fenomena alam yang terbentuk sebagai efek interaksi antara magnetosfer dan ionosfer (*coupling magnetosphere-ionosphere*) dalam cuaca

antariksa. Cuaca antariksa menggambarkan kondisi di Matahari, angin surya, magnetosfer, ionosfer, dan termosfer, yang dapat mempengaruhi kinerja dan kehandalan dari berbagai sistem peralatan berteknologi tinggi landas bumi dan landas antariksa serta dapat

mengarah ke bumi dan sampai ke bagian luar magnetosfer maka akan terjadi interaksi yang dinamakan *Interplanetary Shock* (IPS). Interaksi ini menyebabkan masuknya partikel-partikel angin surya ke dalam magnetosfer melalui mekanisme rekoneksi. Jumlah partikel yang dapat masuk ke dalam magnetosfer saat rekoneksi bergantung pada intensitas CME dan orientasi arah medan magnet antar planet (*Interplanetary Magnetic Field*, IMF). Jumlah partikel akan semakin banyak jika tumbukan angin surya dan magnetosfer bersamaan dengan IMF yang berorientasi ke selatan (IMF Bz(-)). Pada kondisi ini, umumnya rekoneksi dominan terjadi di bagian sisi siang bumi (*dayside*). Sebaliknya jumlah partikel akan semakin sedikit pada saat bersamaan dengan IMF yang cenderung berorientasi ke utara (IMF Bz(+)) ketika terjadi IPS. Pada kondisi ini, biasanya rekoneksi terjadi di bagian sisi malam bumi (*nightside*) atau bagian ekor magnetosfer (*magnetotail*). Ilustrasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1 (Russell, 2006).



Gambar 2-1. Ilustrasi mekanisme terbentuknya badai geomagnet setelah "interplanetary shock" (Russell, 2006). IMF mempunyai 3 komponen yaitu Bx, By dan Bz. Diantara ketiga komponen tersebut yang dominan berperan dalam pembentukan badai geomagnet adalah IMF Bz.

Masuknya partikel-partikel angin surya bersamaan dengan IMF Bz arah selatan menghasilkan energi medan listrik gabungan yang terproyeksikan di zona ekuator. Energi medan listrik gabungan ini proporsional dengan Bz arah selatan dan komponen kecepatan angin surya (V_{sw}) yang dilambangkan dengan E_m (Gonzalez, 1990). Besarnya energi ini proporsional dengan kecepatan angin surya (V_{sw}) dan komponen Bz IMF, dirumuskan

membahayakan kesehatan dan keselamatan manusia.

Ketika terjadi CME, partikel-partikel dan medan magnet akan dilontarkan ke angkasa terbawa serta oleh angin surya. Beberapa diantara lontaran tersebut mengarah ke Bumi. Partikel-partikel dalam angin surya yang sebagai (Kan dan Lee, 1979; Akasofu, 1981; Ballatore dan Gonzalez, 2003):

$$E_m = V_{sw} B_t \sin^2(\phi/2) \quad (2-1)$$

Dengan E_m adalah energi gabungan medan listrik proyeksi bidang ekuator, V_{sw} adalah komponen kecepatan angin surya, B_t adalah proyeksi IMF pada bidang By dan Bz (dalam koordinat GSM) dan ϕ adalah sudut yang dibentuk antara B_t dengan sumbu Z. Dalam persamaan (2-1), B_t dapat dihitung sebagai:

$$B_t = ((By)^2 + (Bz)^2)^{1/2} \quad (2-2)$$

Dengan By adalah komponen IMF arah sumbu Y (barat-timur, koordinat GSM) dan Bz adalah komponen IMF arah sumbu Z (utara-selatan, koordinat GSM).

Burton et al., (1975) memperkenalkan persamaan keseimbangan energi arus cincin sebagai:

$$\frac{\Delta Dst^*}{\Delta t} = Q - \frac{Dst^*}{\tau} \quad (2-3)$$

Dengan τ adalah konstanta waktu luruh dan Q adalah injeksi energi ke arus cincin yang diekspresikan sebagai fungsi linier dari E_m (Ballatore dan Gonzalez, 2003). Dst^* menyatakan indeks Dst terkoreksi oleh efek tekanan angin surya (atau berasosiasi dengan arus magnetopause) dan arus cincin waktu tenang yang diformulasikan sebagai:

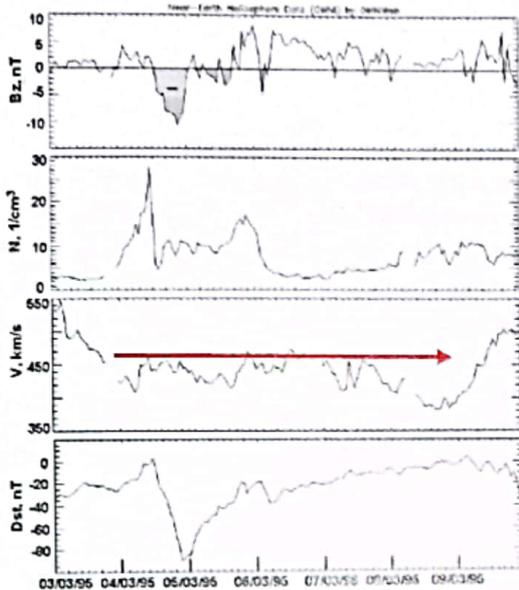
$$Dst^* = Dst - bP^{1/2} + c \quad (2-4)$$

Dengan P adalah tekanan angin surya dan b serta c adalah konstanta

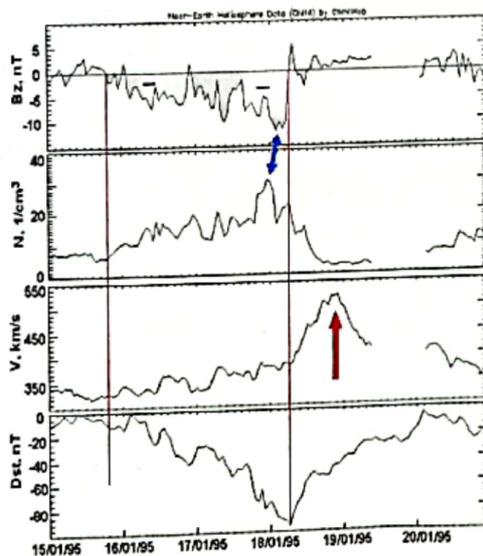
Peneliti lainnya yakni Khabarova (2007), telah menunjukkan bahwa pertumbuhan densitas maksimum (N_{sw-max}) bersamaan dengan IMF Bz negatif minimum ($Bz-min$) membangkitkan intensitas badai geomagnet (Dst). Berdasarkan kondisi tersebut, Khabarova (2007) memperkenalkan formulasi:

$$P_N = B_{z-min} - \sqrt{NdT} \quad (2-5)$$

Dengan P_N adalah linier fit yang diperoleh dari Gambar 2-2 yang dipengaruhi densitas angin surya dan dT adalah jeda waktu antara N mencapai maksimum dan B_z mencapai minimum.



Gambar 2-2. Contoh kejadian badai geomagnet yang terjadi sebagai konsekuensi dari peningkatan komponen densitas angin surya (N_{sw}) bersamaan dengan turunnya IMF B_z dengan kondisi kecepatan angin surya (V_{sw}) relatif tenang



Gambar 2-3. Contoh kejadian badai geomagnet yang terjadi sebagai konsekuensi dari peningkatan komponen densitas angin surya (N_{sw}) dan kecepatan angin surya (V_{sw}) bersamaan dengan turunnya IMF B_z

Kemudian persamaan (2-5) dikembangkan menjadi persamaan (2-6) berdasarkan analisis pengaruh perilaku kecepatan angin surya dan densitasnya terhadap pembentukan badai geomagnet, seperti ditunjukkan pada Gambar 2-3 yakni bahwa dikarenakan banyak kejadian pertumbuhan arus cincin yang membangkitkan badai geomagnet umumnya dipicu oleh komponen kecepatan angin surya atau berkolaborasi dengan densitas angin surya saat IMF mengarah ke selatan. Fenomena ini mendorong pengembangan persamaan (2-5) menjadi persamaan (2-6) dengan mengganti N_{sw} jadi V_{sw} . Hal ini (V_{sw}).

$$P_V = B_{z-min} - \sqrt{VdT} \quad (2-6)$$

Dengan P_V adalah linier fit yang diperoleh dari Gambar 2-3 yang dipengaruhi kecepatan angin surya dan dT adalah jeda waktu antara V mencapai maksimum dan B_z mencapai minimum. Kolaborasi antara persamaan (2-5) dan (2-6) kemudian diperoleh satu variabel P_{tot} seperti dalam persamaan (2-7).

$$P_{tot} = P_N + P_V \quad (2-7)$$

Energi medan listrik gabungan yang masuk magnetosfer akan menyebabkan peningkatan sistem arus diantaranya arus cincin dan arus magnetopaus. Peningkatan ini akan membangkitkan terjadinya gangguan medan magnet yaitu substorm magnetosferik (*magnetospheric substorm*) yang dapat diamati di seluruh stasiun pengamat medan geomagnet di daerah lintang tinggi dan badai magnet (*magnetic storm*) yang dapat diamati di seluruh stasiun pengamat medan geomagnet di semua lintang (Burton et al., 1975; Gonzales et al., 1994; Nagatsuma, 2002; Ballatore and Gonzales, 2003; Maltsev, 2003; Crooker, 2000; Kivelson dan Russell, 1995). Arus cincin dipercaya bertanggung jawab terhadap proses pembentukan badai geomagnet. Untuk memantau aktivitas medan geomagnet di daerah ekuator, lintang rendah dan lintang tinggi yang terkait aktivitas di matahari dapat digunakan indeks Dst.

Indeks Dst juga merupakan indikator dari pertumbuhan arus cincin di sekitar ekuator, lintang rendah dan menengah. Indeks Dst merupakan ukuran untuk badai geomagnet di sekitar daerah lintang menengah dan lintang rendah.

Adapun tingkatan kuat badai geomagnet dapat dikelompokkan seperti pada Tabel 2-1 (Kumar et al., 2010; Adekoya et al., 2012).

Tabel 2-1
Klasifikasi Intensitas Badai Geomagnet

No	Kelas Intensitas Badai Geomagnet	Rentang Nilai
1	Lemah	Dst > -50 nT
2	Sedang	-50 nT > Dst > -100 nT
3	Kuat	-100 > Dst > -200 nT
4	Sangat Kuat	-200 > Dst > -300 nT
5	Super Badai	Dst < -300 nT

2. Data dan Metode

Data kejadian CME, *Interplanetary Magnetic Field* (IMF) komponen Bz arah utara (IMF Bz(+)); arah selatan (IMF Bz(-)) dan By, komponen kecepatan (Vsw), densitas (Nsw) dan tekanan (Psw) angin surya, indeks Dst bulan Januari 2013 sampai Maret 2014. Selain itu, sebagai pendukung juga digunakan data tahun 2000 dan 2001. Dalam kegiatan ini, data indeks Dst diperoleh dari website <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> dan digunakan untuk identifikasi kejadian badai geomagnet. Data kejadian CME diperoleh dari website http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ digunakan untuk identifikasi tipe badai geomagnet. Sedangkan data IMF Bz By dan komponen angin surya diperoleh dari website <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> untuk mengidentifikasi energi medan listrik gabungan yang masuk magnetosfer saat rekoneksi.

Berdasarkan data Dst bulan Januari 2013 hingga Maret 2014 dilakukan analisis tipe badai geomagnetnya menggunakan CME. Dilanjutkan kemudian dengan melakukan analisis virtual terhadap kondisi angin surya dan IMF Bz sebelum, saat dan sesudah masing-masing kejadian badai geomagnet. Analisis virtual ini dilakukan untuk menunjukkan geoeftektivitas matahari (posisi kejadian CME) yang menimbulkan badai geomagnet, kondisi angin surya dan IMF Bz sebelum, saat dan setelah rekoneksi.

Sedangkan untuk mengetahui distribusi Em dan P_{total} terhadap masing-masing kelas badai geomagnet (ΔH BPKWA Biak) dilakukan menggunakan data angin surya dan IMF Bz By

tahun 2000 dan 2001. Dalam makalah ini sebagai bahan analisis hanya dipilih kejadian badai geomagnet dengan intensitas kuat (-50 nT > Dst > -100 nT) dan sangat kuat (Dst < -100 nT) berdasarkan klasifikasi <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr> dengan metode statistik. Nilai ΔH BPKWA Biak merepresentasikan respon komponen H medan geomagnet di BPKWA Biak saat badai geomagnet yang dihitung menggunakan formulasi (3-1).

$$\Delta H(t) = H(t) - S_{QH}(t) \quad (3-1)$$

Dengan $\Delta H(t)$ adalah respon medan geomagnet komponen H saat badai geomagnet, $H(t)$ adalah nilai variasi medan geomagnet komponen H yang terukur dan $S_{QH}(t)$ adalah rata-rata variasi medan geomagnet komponen H hari tenang yang dihitung menggunakan formulasi (3-2).

$$S_{QH}(t) = \sum_1^n \frac{H_n}{n} \quad (3-2)$$

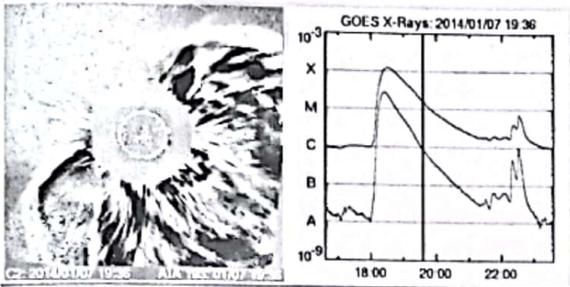
Dengan H_n adalah variasi medan geomagnet pada 5 hari paling tenang dalam tiap bulan dan n adalah jumlah hari tenang dalam setiap bulannya. Dalam hal ini, n adalah 5 hari.

3. Pembahasan

CME merupakan salah satu fenomena di permukaan matahari yang menjadi sumber gangguan medan geomagnet dalam sistem cuaca antariksa. Bersama dengan angin surya dan medan magnet antar planet (IMF) terutama komponen Bz, CME dapat dikatakan menjadi salah satu variabel dalam geoeftektivitas matahari. Hasil kombinasi perilaku dari ketiganya pada sebelum, saat dan setelah tumbukan plasma antar planet (*Interplanetary shock, IPS*) menentukan terjadi atau tidaknya badai geomagnet, bahkan menentukan intensitasnya.

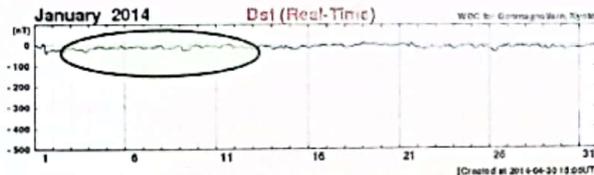
Kasus I: Kejadian CME 7 Januari 2014

Pada tanggal 7 Januari 2014 pukul 18.24 UT telah terjadi flare kuat kelas X1.2 pada koordinat S12W12. Kejadian flare yang disertai peristiwa Halo (lebar sebaran 360°) CME, dapat dilihat pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1. Kejadian flare kelas X tanggal 7 Januari 2104 yang diikuti halo CME (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/)

Estimasi waktu propagasi partikel yang dipancarkan CME sampai ke magnetosfer Bumi adalah 49,5 jam (<http://umtof.umd.edu/pm/FIGS.HTML>). Dari estimasi waktu tersebut, badai geomagnet sangat kuat ($Dst < -100$ nT) diperkirakan akan terjadi pada tanggal 9 Januari 2014 atau 10 Januari 2014. Untuk memastikannya dilakukan identifikasi indeks Dst Januari 2014, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2. Variasi indeks Dst bulan Januari 2014. Pola indeks Dst tanggal (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>)

Indeks Dst dari tanggal 7 sampai 12 Januari 2014 tidak menunjukkan adanya kejadian badai geomagnet kuat. Artinya bahwa kejadian flare kuat yang disertai dengan halo CME pada tanggal 7 Januari 2014 tidak menyebabkan badai geomagnet. Secara teori, seharusnya flare kelas X yang disertai halo CME tersebut berpotensi besar menyebabkan badai geomagnet, apalagi koordinat munculnya flare mengarah ke bumi yaitu berada di sisi barat permukaan matahari (S12W12). Untuk mengetahui sebab tidak terjadi badai geomagnet, maka dilakukan analisis terhadap kondisi angin surya dan IMF Bz sebelum, saat dan setelah IPS. Kondisi komponen-komponen angin surya (Nsw, Vsw, Psw) dan perilaku IMF Bz sebelum, saat dan setelah IPS ditunjukkan pada Gambar 4-3.

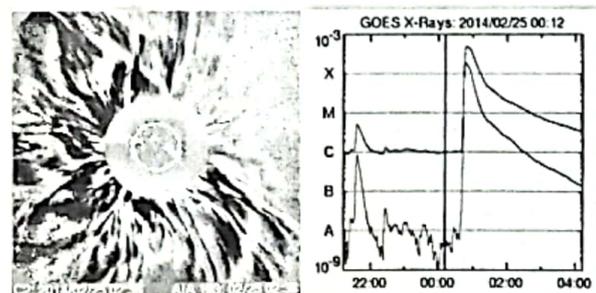


Gambar 4-3. Kondisi komponen angin surya dan IMF Bz tanggal 7-10 Januari 2014 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>)

Pada Gambar 4-3 terlihat bahwa ketiga komponen angin surya (Nsw, Vsw, Psw) mengalami kenaikan pukul 14.42 UT tanggal 7 Januari 2014. Namun, pada tanggal 8 Januari 2014 pukul 12.00 UT IMF Bz cenderung mengarah utara. Hal inilah yang diduga menyebabkan mengapa flare kelas X yang diikuti halo CME tanggal 7 Januari 2014 tidak mengakibatkan kejadian badai geomagnet. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aktivitas matahari dan lingkungan antariksa pada kasus ini kurang geoeftif karena tidak ada badai geomagnet yang timbulkannya.

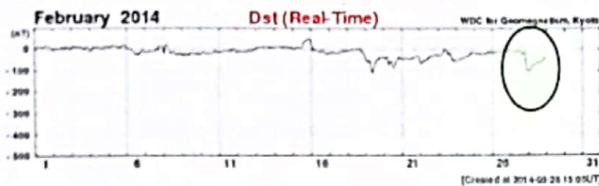
Kasus II: Kejadian CME tanggal 25 Februari 2014

Pada tanggal 25 Februari 2014 pada pukul 01.25 UT telah terjadi flare besar kelas X4.9 dari grup NOAA AR1990 dengan sebuah flare optic 2b di koordinat S12E82. Kejadian flare yang diikuti peristiwa Halo CME ini dapat dilihat pada Gambar 4-4.



Gambar 4-4. Kejadian flare kelas X tanggal 25 Februari 2104 yang diikuti halo CME (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL/)

Estimasi waktu propagasi partikel dan medan magnet yang dipancarkannya akan sampai ke magnetosfer Bumi adalah 63,5 jam (<http://umtof.umd.edu/pm/FIGS.HTML>). Dari estimasi waktu tiba tersebut maka badai geomagnet sangat kuat diperkirakan akan terjadi pada tanggal 27 Februari 2014 atau 28 Februari 2014. Untuk memastikannya dilakukan identifikasi indeks menggunakan Dst bulan Februari 2014, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-5.



Gambar 4-5. Variasi indeks Dst bulan Februari 2014. Pola indeks Dst tanggal 27 Februari 2014 telah dijumpai pola yang menunjukkan adanya kejadian Badai geomagnet kuat yaitu -99 nT (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>)

Indeks Dst bulan Februari 2014 membuktikan bahwa telah terjadi badai geomagnet tanggal 27 Februari 2014 pukul 24.00 UT, namun hanya dengan intensitas kuat (-50 nT $<$ Dst $<$ -100 nT) yaitu nilai Dst = -99 nT. Hal ini kurang signifikan. Secara teori seharusnya dengan sumber flare yang berada pada koordinat S12E82 (selatan-timur matahari) maka propagasi partikel-partikelnya tidak mengarah ke Bumi sehingga tidak akan menimbulkan badai geomagnet walaupun dengan kelas flare X4.9. Namun demikian, diduga akibat orientasi IMF Bz yang cenderung mengarah ke selatan maka masih dimungkinkan untuk terjadi badai geomagnet walau dengan intensitas kuat. Untuk mengetahui apakah benar orientasi IMF Bz yang cenderung mengarah ke selatan saat IPS sebagai pembangkit badai kuat tanggal 28 Februari 2014, maka dilakukan analisis kondisi angin surya dan perilaku IMF Bz sebelum, saat dan setelah IPS, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-6.

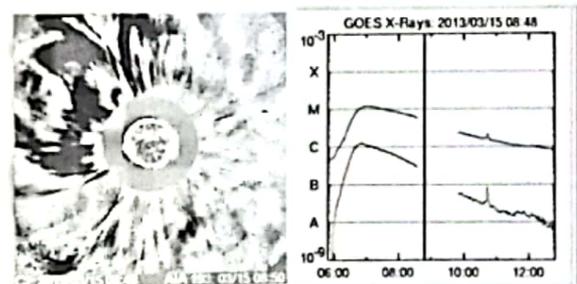


Gambar 4-6. Variasi komponen angin surya (Nsw, Vsw, Psw) dan IMF Bz tanggal 25-28 Februari 2014 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>)

Gambar 4-6 menunjukkan bukti bahwa benar orientasi IMF Bz saat IPS cenderung mengarah ke selatan dan bahkan sebelum IPS sudah mengarah ke selatan.

Kasus III: Kejadian CME tanggal 15 Maret 2013

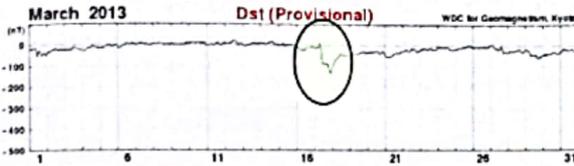
Pada tanggal 15 Maret 2013 pukul 07.12 UT telah terjadi flare kelas M1 dari grup sunspot 1692 yang mengarah ke Bumi. Kejadian flare tersebut diikuti peristiwa Halo CME. Kejadian flare yang diikuti Halo CME tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-7.



Gambar 4-7. Kejadian flare kelas M1 tanggal 13 Maret 2013 yang diikuti halo CME (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSA L/)

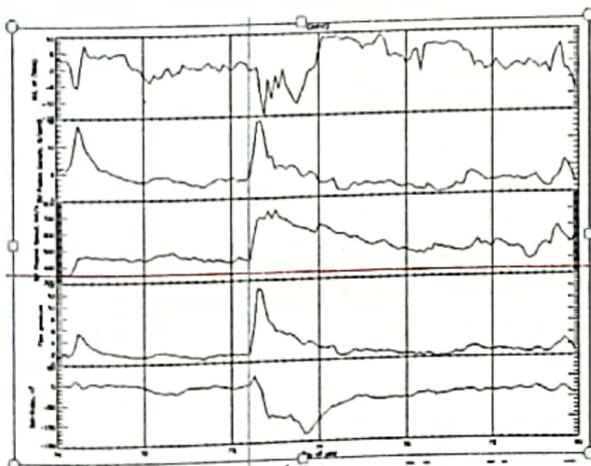
Walaupun flare yang terjadi hanya berkelas M1 namun diduga CME yang menyertainya dapat membentuk badai geomagnet sangat kuat atau ekstrim (Dst $<$ -100 nT). Untuk

memastikannya maka dilakukan identifikasi menggunakan indeks Dst bulan Maret 2013, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-8.



Gambar 4-8. Variasi indeks Dst bulan Maret 2013. Pola indeks Dst tanggal 17 Maret 2013 menunjukkan adanya kejadian Badai geomagnet ekstrim yaitu -132 nT (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>)

Gambar 4-8 telah menunjukkan adanya kejadian badai geomagnet pada tanggal 17 Maret 2013 pukul 21.00 UT dengan nilai Dst = -132 nT. Jika merujuk klasifikasi intensitas badai geomagnet, maka badai geomagnet tanggal 17 Maret 2013 ini masuk ke dalam kategori ekstrim. Melihat flare-nya yang hanya berkelas M, maka dapat dikatakan bahwa badai geomagnet tersebut merepresentasikan geoeftektivitas matahari dan medan magnet antarplanet arah ke selatan berada dalam kategori ideal. Untuk mengetahui geoeftektivitas aktivitas matahari dan lingkungan antariksa, maka dilakukan analisis kondisi angin surya dan perilaku IMF Bz sebelum, saat dan setelah IPS. Kondisi angin surya dan perilaku IMF Bz sebelum, saat dan setelah IPS ditunjukkan pada Gambar 4-9.

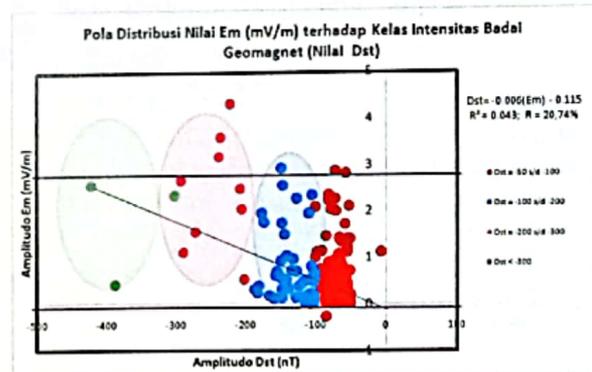


Gambar 4-9. Variasi komponen angin surya (Nsw, Vsw, Psw) dan IMF Bz tanggal 15-20 Maret 2013 (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>)

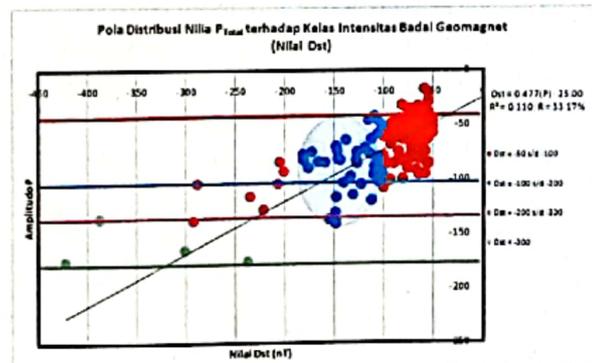
Gambar 4-9 membuktikan bahwa orientasi IMF Bz saat komponen-komponen angin surya mulai mengalami peningkatan cenderung mengarah ke selatan sampai nilai Bz = -10 nT dan bahkan saat komponen-komponen angin surya tersebut hampir mencapai puncak, Bz IMF juga mencapai puncak nilai minimumnya.

4.2 Analisis statistik Hubungan dan Distribusi antara Badai Geomagnet (ΔH BPKWA Biak) dengan Geoeftektivitas Cuaca antariksa (Em)

Untuk bahan analisis, digunakan sebanyak 162 kejadian badai geomagnet dari tahun 1993 sampai 2003 yang terdiri dari badai geomagnet sedang (-50 nT > Dst > -100 nT), kuat (-100 > Dst > -200 nT), sangat kuat (-200 > Dst > -300 nT) dan super badai (Dst < -300 nT). Hasil plotting distribusi Em (mV/m) terhadap indeks Dst, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-10 dan distribusi P_{Total} terhadap indeks Dst, seperti pada Gambar 4-11.



Gambar 4-10. Pola distribusi Em (mV/m) terhadap indeks Dst pada kasus 162 kejadian badai geomagnet di sepanjang tahun 1993-2003.

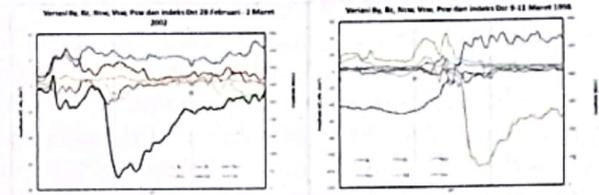


Gambar 4-11. Pola distribusi P_{Total} terhadap indeks Dst pada kasus 162 kejadian badai geomagnet di sepanjang tahun 1993-2003.

Gambar 4-10 menunjukkan pola distribusi E_m (mV/m) terhadap indeks Dst pada kasus 162 kejadian badai geomagnet di sepanjang tahun 1993-2003. Dari gambar tersebut, diperoleh bahwa nilai korelasi antara E_m (mV/m) dengan nilai indeks Dst (mewakili kelas intensitas badai geomagnet yang oleh Kumar et al., 2010; Adekoya et al., 2012) sebesar 20,74 %. Nilai korelasi ini sangat kecil. Namun demikian, kondisi ini bisa dimaklumi karena dalam penentuan E_m (mV/m) nilai komponen pendukungnya seperti kecepatan angin surya, V_{sw} dan B_z diambil pada posisi rekoneksi (saat tumbukan angin surya, B_z dan magnetosfer). Sementara itu, kenyataannya, nilai V_{sw} dan B_z terus mengalami kenaikan setelah rekoneksi, umumnya puncak kenaikannya terjadi bersamaan dengan nilai Dst mencapai minimum (fase utama badai geomagnet). Selain itu, juga diperoleh bahwa pola distribusi E_m (mV/m) terhadap kelas badai geomagnet tidak berubah. Nilai $E_m = 0 - 3$ mV/m terdistribusi merata untuk nilai Dst = 0 - 400 nT. Dengan kata lain, tidak ada nilai E_m (mV/m) yang berkorelasi tegas dengan nilai Dst dalam tiap kelas badai geomagnet.

Gambar 4-11 menunjukkan pola distribusi P_{Total} terhadap indeks Dst pada kasus 162 kejadian badai geomagnet tahun 1993-2003. Dari gambar tersebut, diperoleh bahwa nilai korelasi antara P_{Total} dengan nilai indeks Dst hanya sebesar 33,17 %. Nilai korelasi ini relatif masih sangat kecil dan tidak jauh berbeda dengan hasil sebelumnya yaitu nilai korelasi antara E_m (mV/m) dengan indeks Dst. Namun demikian, kondisi ini tetap masih bisa dimaklumi karena dalam penentuan P_{Total} nilai komponen pendukungnya seperti kecepatan dan kerapatan angin surya, V_{sw} dan N_{sw} serta B_z diambil pada saat posisi mereka masing-masing mencapai puncaknya. Jadi besar kecilnya nilai P_{Total} juga sangat dipengaruhi oleh selisih waktu antara N_{sw} mencapai puncak dan V_{sw} mencapai puncak dengan B_z (-) mencapai minimum (dT_{Bz-N} dan dT_{Bz-V}). Untuk mendapatkan gambaran jelas terhadap fenomena di atas maka dilakukan studi. Sebagai studi kasusnya digunakan kejadian badai geomagnet sedang (Dst = -71 nT)

tanggal 1 Maret 2002 dan kejadian badai geomagnet kuat (Dst = -116 nT) tanggal 10 Maret 1998, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-12.



Gambar 4-12. Pola variasi komponen B_y , B_z IMF dan komponen kerapatan, kecepatan, tekanan angin surya (N_{sw} , V_{sw} , P_{sw}) serta indeks Dst pada tanggal (kiri) 28 Februari - 2 Maret 2002, (kanan) 9-11 Maret 1998.

Gambar 4-12 kemudian ditentukan nilai masing-masing komponen angin surya, IMF dan indeks Dst untuk menghitung E_m (mV/m) dan P_{Total} pada persamaan (2-1) dan (2-7). Hasilnya seperti ditampilkan pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2

Tabulasi nilai komponen angin surya, IMF B_z dan indeks Dst untuk penentuan nilai E_m (mV/m) dan P_{Total} kejadian badai geomagnet tanggal 10 Maret 1998 dan 1 Maret 2002.

No	Tanggal Kejadian Badai Geomagnet												
1	1 Maret 2002												
	B_t	B_y	B_z	ϕ	$\sin 2(\phi/2)$					E_m (mV/m)			
	1,56	-1,2	-0,9	0,18						0,096			
2	10	Maret	1998	B_z	N_{sw}	V_{sw}	P_{sw}	dT_{Bz-V}	dT_{Bz-N}	P_{Total}	Dst		
				-14,5	16,8	397	6,75	2	0	-5,38	Dst = -71		
				10 Maret 1998									
2	10	Maret	1998	B_t	B_y	B_z	ϕ	$\sin 2(\phi/2)$					E_m (mV/m)
				5,83	2,46	1,18	0,31						0,50
				B_z	N_{sw}	V_{sw}	P_{sw}	dT_{Bz-V}	dT_{Bz-N}	P_{Total}	Dst		
-15	44,9	519	4,52	0	6	-46,41	Dst = -116						

Dari tabel 4-2 terbukti bahwa besar kecilnya nilai P_{Total} juga sangat dipengaruhi oleh selisih waktu antara N_{sw} mencapai puncak dan V_{sw} mencapai puncak dengan B_z (-) mencapai minimum (dT_{Bz-N} dan dT_{Bz-V}). Demikian juga dengan nilai E_m (mV/m).

Selain hasil-hasil di atas, dari Gambar 4-11 juga diperoleh bahwa pola distribusi P_{Total} terhadap kelas badai geomagnet menunjukkan sedikit keterkaitan. Nilai $P_{Total} = 20 - 50$ seluruhnya terkait dengan badai geomagnet kelas sedang (-50 nT > Dst > -100 nT). Nilai $P_{Total} = 100-140$ terkait dengan badai geomagnet kelas kuat (-100 nT > Dst > -200 nT) dan sekaligus kelas sangat kuat (-200 nT > Dst > -300 nT). Nilai

$P > -145$ terkait dengan badai geomagnet kelas super badai ($Dst < -300$ nT). Ada nilai P yang menjadi irisan dari dua kelas badai geomagnet yakni nilai $P = -50$ s/d -100 menjadi irisan antara badai geomagnet kelas sedang dan kuat bahkan sedikit kelas sangat kuat. Jika terdapat suatu kondisi matahari dan lingkungan antariksa yang berada di daerah nilai P_{Total} irisan ini maka penentuan kelas badai geomagnet akan sedikit menemui kesulitan. Namun sebaliknya, jika kita peroleh suatu kondisi matahari dan lingkungan antariksa yang berada di daerah nilai P_{Total} di bawah nilai -100 maka kita akan lebih yakin untuk menetapkan bahwa badai geomagnet yang terjadi berada pada kelas kuat ke atas.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa badai geomagnet dapat digunakan sebagai ukuran yang merepresentasikan geoeftektivitas matahari dan lingkungan antariksa (*Space weather Geoeffectiveness*) yang berpotensi menyebabkan badai geomagnet (dinotasikan dengan E_m (mV/m) dan P_{Total}). Diantara kedua notasi, P_{Total} menunjukkan hasil yang lebih baik daripada E_m (mV/m). Hal ini dibuktikan dengan nilai korelasi antara nilai P_{Total} dengan kelas intensitas badai geomagnet (indeks Dst) lebih besar dibandingkan antara nilai E_m (mV/m) dengan kelas intensitas badai geomagnet (indeks Dst). Distribusi kelompok nilai P_{Total} terhadap kelas intensitas badai geomagnet juga lebih jelas daripada kelompok nilai E_m (mV/m) terhadap kelas intensitas badai geomagnet. Nilai $P_{Total} = 20 - 50$ seluruhnya terkait dengan badai geomagnet kelas sedang (-50 nT $> Dst > -100$ nT). Nilai $P_{Total} = 100-140$ terkait dengan badai geomagnet kelas kuat (-100 nT $> Dst > -200$ nT) dan sekaligus kelas sangat kuat (-200 nT $> Dst > -300$ nT). Nilai $P > -145$ terkait dengan badai geomagnet kelas super badai ($Dst < -300$ nT). Ada nilai P yang menjadi irisan dari dua kelas badai geomagnet yakni nilai $P = -50$ s/d -100 menjadi irisan antara badai geomagnet kelas sedang dan kuat bahkan sedikit kelas sangat kuat. Nilai P_{Total} di atas -100 berkaitan dengan kejadian badai geomagnet pada kelas kuat ke atas. Dengan kata lain, pada kasus kejadian geomagnet kelas kuat, sangat kuat dan super badai maka geoeftektivitas aktivitas matahari dan lingkungan antariksa yang menjadi sumbernya termasuk dalam kategori efektif dan bahkan sangat efektif. Untuk keperluan praktis, jika dibalik maka hasil ini

dapat dimanfaatkan untuk estimasi awal intensitas kejadian badai geomagnet yang bakal terjadi setelah diketahui nilai P_{Total} -nya.

Terima kasih disampaikan kepada Drs. Jiyo, M.Si selaku Kepala Bidang Geomagnet dan Magnet Antariksa, Pusat Sains Antariksa-LAPAN atas diperkenankannya menggunakan data geomagnet BPKWA Biak. Terima kasih juga disampaikan kepada tim pengelola data antariksa terutama data geomagnet di Pusat Sains Antariksa

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.
- Akasofu, S.-I. (1981). Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, **28**, 121-190.
- 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.
- Crooker N. U. (2000). Solar and heliospheric geoeffective disturbances, *J. Atmos. Sol-Terr. Physics*, **64**, 231.
- Gonzalez, W. D. (1990). A unified view of solar wind-magnetosphere coupling functions, *Planet. Space Sci.*, **38**, 627-632.
- Gonzales, W.D., J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani, and V.M. Vasylunas. (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.
- Khavarova O. V. (2007). *Current problems of magnetic storm prediction and Possible ways of their solving*, *Sun and Geosphere*, **32-37**, 2(1).
- Kan, J. R. and L. C. Lee. (1979). Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo, *Geophys. Res. Lett.*, **6**, 577-580.

- 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.
- Maltsev Y. P. (2003). The points of controversy in Magnetic Storm study (Review), Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXVI Annual Seminar, Apatity, pp. 33-40, Russian.
- Nagatsuma T. (2002). "Geomagnetic storm", Journal of the communications research laboratory, 49, No. 3.
- 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.
- Vats H. O. (2006). *Geo-Effectiveness of Solar Wind Extremes*, Journal of Astrophysics and Astronomy, June & September 2006, Volume