

Identifikasi dan Karakteristik *Co-rotating Interaction Region* Geoeftif (Identification and Characteristics of Geoeffective *Co-rotating Interaction Regions*)

A. Winarko dan F. Nuraeni

Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Riwayat naskah

Diterima: 27-12-2020

Direvisi: 09-03-2021

Disetujui: 10-03-2021

Korespondensi:

A. Winarko

anton.winarko@lapan.go.id

ABSTRAK

Co-rotating Interaction Region (CIR) dipicu oleh interaksi angin matahari berkecepatan tinggi dengan angin Matahari yang lebih lambat. Diketahui bahwa CIR merupakan salah satu penyebab terjadinya badai geomagnet. Pada studi ini diidentifikasi dan dianalisis badai geomagnet yang dipicu CIR pada periode tahun 2008–2019 (*Solar Cycle*, SC 24). Diperoleh distribusi statistik badai geomagnet CIR dan parameter-parameter CIR pada angin Matahari. Analisis korelasi dilakukan untuk melihat hubungan antarparameter. Hasil studi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (sekitar 27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Kebanyakan badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah. Meskipun plasma cepat (*high speed streamer*, HSS) adalah pemicu utama CIR, parameter komponen selatan medan magnet antarplanet dan medan listrik memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

Kata kunci: CIR, badai geomagnet, siklus Matahari ke-24.

ABSTRACT

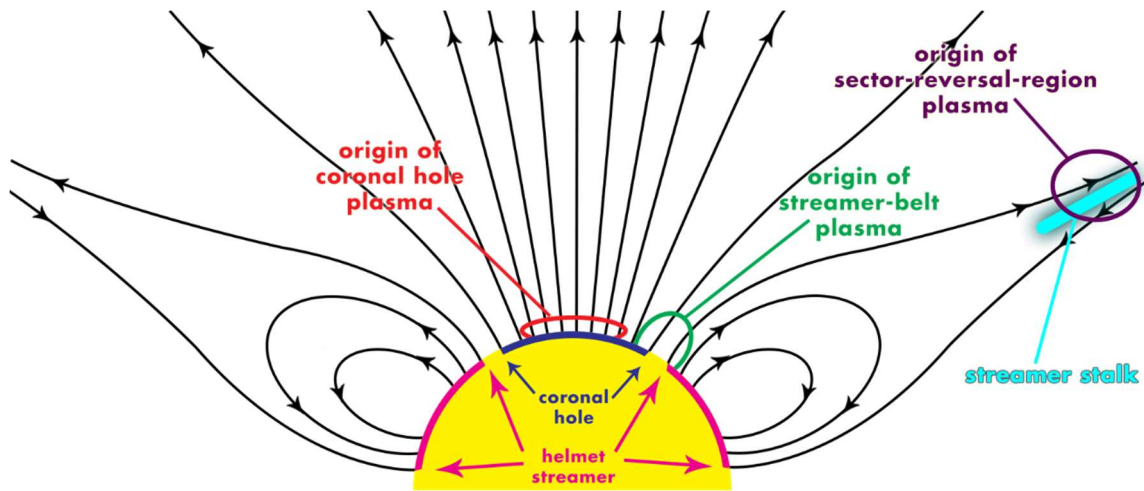
A *Co-rotating Interaction Region* (CIR) is formed by the interaction of high-speed solar wind with the preceding slower solar wind. It is well known that CIRs are one of the causes of geomagnetic storms. In this paper we have identified and analyzed geomagnetic storms triggered by CIR in the period 2008–2019 (*Solar Cycle* 24). Statistical distribution of CIR geomagnetic storm and CIR parameters in the solar wind are obtained. Correlation analysis of geomagnetic activity with solar wind parameters are conducted to inspect the relationship between parameters. Our results show that around 27% of the geomagnetic storms at Solar Cycle 24 are caused by CIRs. Most of these CIR geomagnetic storms are at minor storm levels. Although high speed streamer (HSS) is the main trigger for the CIRs, the parameters of the southern component of the interplanetary magnetic field and electric field play a more crucial role than the solar wind speed at the level of disturbance of the CIR geomagnetic storms.

Keywords: CIR, geomagnetic storm, solar cycle 24.

1. Pendahuluan

Angin Matahari adalah aliran plasma dan partikel berkecepatan supersonik yang timbul dari permukaan Matahari, yaitu pada lapisan korona yang berekspansi ke ruang antarplanet. Daerah pada Matahari dengan konfigurasi magnet yang berbeda akan menimbulkan jenis angin Matahari yang berbeda pula (Gambar 1). Angin Matahari yang berkecepatan rendah, berkepadatan sedang dan cenderung pada keadaan *steady*

state berasal dari tepi sabuk *streamer* dan atau dari tepi lubang korona dekat daerah sabuk *streamer*; angin Matahari lambat, berkepadatan tinggi dan sangat tidak homogen dihasilkan dari daerah *sector-reversal*, sedangkan Angin Matahari cepat (HSSWS/*High Speed Solar Wind Streams* atau biasa juga disingkat HSS/*High Speed Streams*) berasal dari lubang korona (Habbal *et al.*, 1997; Suess *et al.*, 2009; Borovsky, 2018).



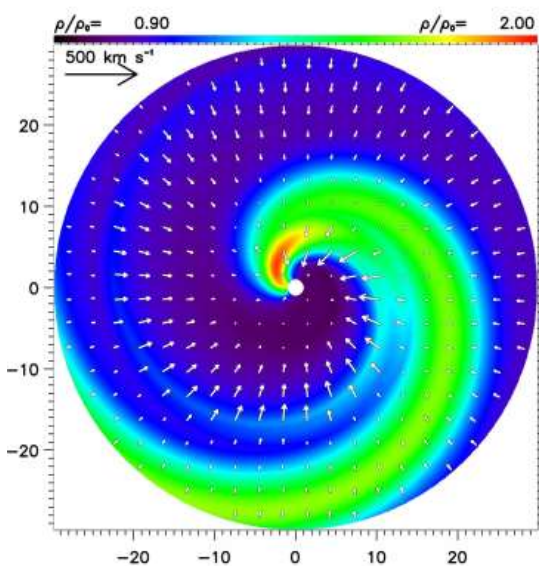
Gambar 1. Ilustrasi struktur magnetik Matahari sebagai sumber angin Matahari (Musafar & Winarko, 2020)

Angin Matahari ini menjalar dari permukaan Matahari dalam arah radial mendekati bentuk spiral Archimedes. Pada jarak tertentu plasma angin Matahari cepat akan menyusul plasma lambat yang arah medan magnetnya lebih melengkung dibandingkan dengan yang lebih cepat. Keduanya berinteraksi menghasilkan daerah terkompresi dan gelombang kejut sehingga membentuk suatu konfigurasi plasma yang tekanan dan kerapatannya lebih tinggi, disebut *solar wind Stream Interaction Region* (SIR, Richardson, 2018). Daerah yang terkompresi ini ikut berotasi dengan Matahari (*co-rotate*) sehingga lebih sering disebut sebagai *Co-rotating Interaction Region* (CIR, Gambar 2).

CIR menjalar di ruang antar planet dengan kecepatan tinggi, membawa partikel dan ion-ion berat dari Matahari serta medan magnet antarplanet (*Interplanetary Magnetic Field/IMF*) yang memengaruhi cuaca antariksa. Jika arah CIR menuju ke Bumi dan berinteraksi dengan magnetosfer Bumi saat IMF dominan ke arah selatan, maka terjadi transfer energi dari plasma angin Matahari ke magnetosfer Bumi yang dapat memicu gangguan medan magnet Bumi. Gangguan geomagnet inilah yang berpotensi menyebabkan gangguan teknologi manusia, baik yang berbasis antariksa seperti satelit, atau gangguan kelistrikan di permukaan Bumi seperti GIC (*Geomagnetically Induced Current*).

Pemicu utama CIR adalah aliran HSS. Studi analisis HSS telah dipaparkan dalam beberapa penelitian terdahulu dan didefinisikan dalam berbagai kriteria. Berdasarkan Bame *et al.*, (1976), HSS adalah variasi kecepatan angin Matahari dengan peningkatan lebih besar atau sama dengan 150 km/s pada interval 5 hari. HSS dari lubang korona lebih banyak terjadi di siklus minimum Matahari (Heinemann *et al.*, 2018), dengan laju plasma cepat rata-rata dalam 1 hari di atas 500 km/s (Broussard *et al.*, 1978). Lindblad & Lundstedt, (1981) mendefinisikan HSS sebagai kondisi saat selisih tiga jam-an terendah dan tiga jam-an tertinggi pada hari berikutnya lebih besar dari 100 km/detik, dalam waktu setidaknya dua hari, dan membangun katalog HSS pada kurun tahun 1964–1975 berdasarkan definisi tersebut.

Pada studi ini, HSS didefinisikan sebagai peningkatan kecepatan angin Matahari di atas 100 km/detik, dengan



Gambar 2. Visualisasi CIR berdasarkan model hidrodinamik. Spektrum warna menyatakan kerapatan relatif (Lobel, 2008).

kecepatan puncak/maksimum lebih dari 400 km/detik, pada durasi setidaknya dua hari (Mavromichalaki & Vassilaki, 1998). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi plasma cepat pemicu CIR dan mengetahui karakteristik parameter angin Matahari pada badai geomagnet yang terkait CIR pada siklus Matahari (*Solar Cycle*, SC) ke-24.

2. Metodologi

2.1. Data

Data parameter angin Matahari di titik L1 diperoleh dari arsip *Global Geospace Science* (GGS) WIND dan satelit ACE pada GSFC/SPDF-OMNIWeb ([laman omniweb.gsfc.nasa.gov/](http://laman.omniweb.gsfc.nasa.gov/)), dirata-ratakan dalam setiap jam. Parameter-parameter angin Matahari yang digunakan adalah kerapatan proton (n) dalam partikel/cm³, komponen utara-selatan medan magnet antarplanet (IMF B_z) pada koordinat GSM dalam nT, Temperatur plasma dalam K, kecepatan angin Matahari dalam km/detik, Tekanan (P) dalam nPa. Medan listrik (E_y) dihitung dari persamaan diferensial koreksi Dst^* (Burton *et al.*, 1975):

$$\frac{dDst}{dt} = Q(t) = \frac{Dst^*}{\tau} \quad (1)$$

Dengan τ adalah waktu peluruhan partikel di arus cincin yang hilang ke atmosfer melalui presipitasi atau pertukaran muatan. Nilai Q sebagai fungsi waktu adalah laju energi injeksi ke arus cincin, sebanding medan listrik fajar-senja dan biasa dinotasikan dengan vB_z , dalam koordinat GSM.

Tabel 1. Konversi indeks k untuk wilayah indonesia (Juangsih, 2015).

Kondisi Geomagnet [indeks K]	Indeks Dst/ Gangguan ΔH (nT)
Tenang [1-3]	$\leq -25,4$
Aktif [4]	$-25,5 - (-44,9)$
Badai Lemah [5]	$-45 - (-79,2)$
Badai Sedang [6]	$-79,3 - (-139,6)$
Badai Kuat [7]	$-139,7 - (-245,9)$
Badai Sangat Kuat [≥ 8]	≥ 246

Data CME diperoleh dari katalog SOHO-LASCO *Coordinated Data Analysis Workshop* (CDAW) *Data Center* (cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html). Data kecepatan (km/detik) digunakan untuk

perhitungan perkiraan waktu transit CME yang geoeftif, yaitu mengarah ke Bumi dan berpotensi memengaruhi medan geomagnet. Verifikasi data visual CME menggunakan arsip citra bergerak SDO-AIA/HMI (sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/).

Aktivitas geomagnet yang digunakan dalam studi ini adalah indeks Dst (nT) dari *World Data Center* (WDC) Kyoto (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html), dengan klasifikasi tingkat gangguan berdasarkan konversi pada Tabel 1.

2.2. Metode Penelitian

HSS pada siklus Matahari ke-24 diidentifikasi dengan menggunakan kriteria Mavromichalaki & Vassilaki, (1998) dan Xystouris *et al.*, (2013). Ada beberapa pendekatan yang dilakukan jika terdapat gap data: Jika gap data terdapat pada awal HSS dengan kecepatan awal di atas 400 km/detik, kecepatan rata-rata sebelum peningkatan dianggap sebagai data pertama. Jika gap terjadi di puncak sehingga kecepatan maksimum tidak terlihat, maka kecepatan maksimum ditentukan berdasarkan nilai kecepatan tertinggi dari data yang tersedia. Sedangkan jika gap data terjadi di fase penurunan kecepatan, titik terakhir data yang tersedia dianggap sebagai akhir dari HSS. Jika HSS terjadi pada rentang kurang dari 3 jam dari HSS sebelumnya, maka dianggap hanya terjadi 1 kali HSS.

Klasifikasi badai geomagnet ditampilkan pada Tabel 1. Studi difokuskan pada badai geomagnet yang dipicu hanya oleh CIR, oleh karena itu, kontribusi dari CME perlu dieliminasi. Kategori CME geoeftif berdasarkan Ravishankar & Michalek, (2019), dengan pendekatan perkiraan waktu transit diturunkan dari model empirik propagasi CME (Gopalswamy *et al.*, 2001):

$$a = 2,193 - 0,0054v_0 \quad (2)$$

dengan a adalah percepatan efektif (m/s²), diperoleh dari selisih antara kecepatan CME dan ICME dibagi waktu transit dari Matahari ke wahana pengamat, dan v_0 adalah kecepatan awal. Jika percepatan efektif terhenti di jarak tertentu dari matahari (d_1) dan kemudian dari titik tersebut mencapai jarak sekitar Bumi (d_2) dengan kecepatan konstan, maka waktu transit dihitung menggunakan

$$t = t_1 + t_2; \text{ dengan}$$

$$t_1 = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2ad_1}}{a} \tag{3}$$

$$t_2 = \frac{d_2}{\sqrt{v_0^2 + 2ad_1}}$$

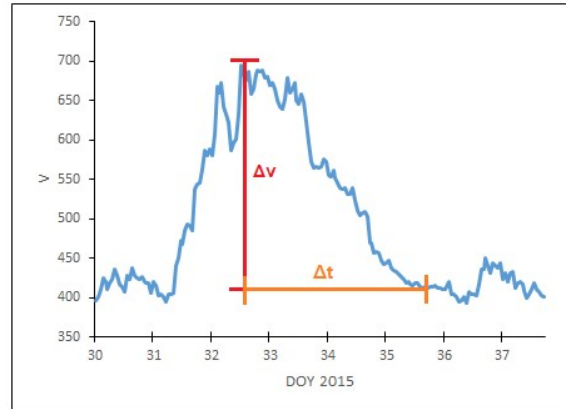
Kejadian badai geomagnet nonCME kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik badai geomagnet yang dipicu CIR. Analisis korelasi silang dilakukan untuk melihat keterkaitan antarparameter. Seluruh data yang digunakan adalah data pada siklus Matahari ke-24, yaitu Desember 2008–Desember 2019.

3. Hasil dan Pembahasan

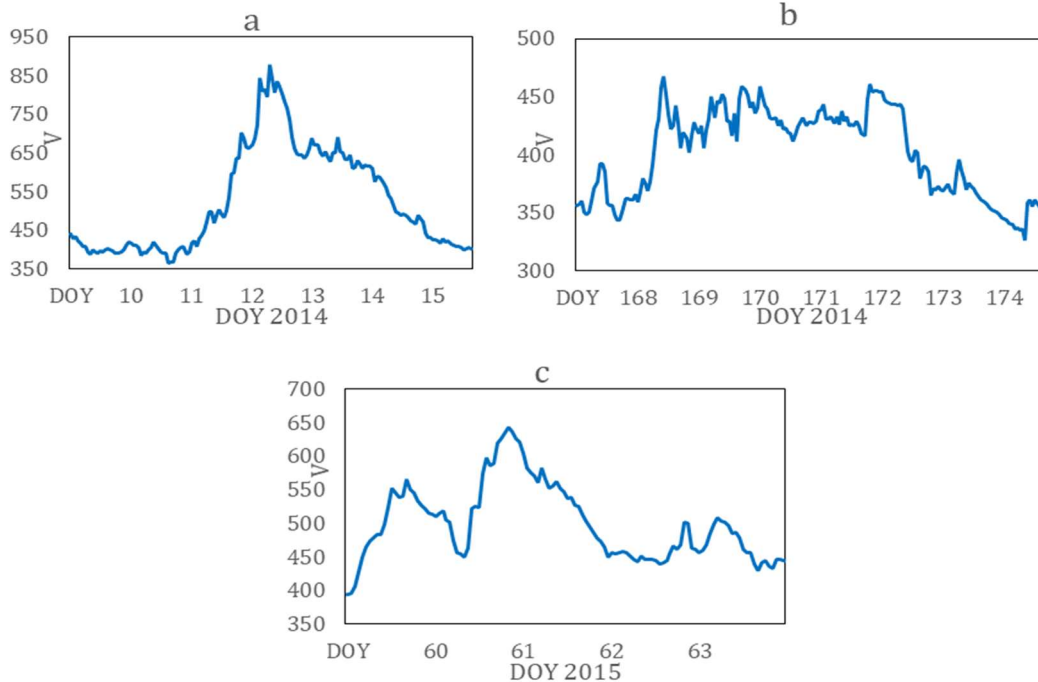
3.1. Identifikasi HSS

HSS pada studi ini didefinisikan sebagai peningkatan kecepatan angin Matahari lebih dari 100 km/detik dengan durasi 2 hari atau lebih, dengan nilai maksimum > 400 km/detik. Contoh ilustrasi HSS yang terjadi pada 31 Januari–5 Februari 2015 sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Suatu HSS dapat memiliki puncak tunggal, rangkap, atau beruntun. HSS dengan puncak tunggal adalah kejadian HSS dengan 1 nilai maksimum, HSS

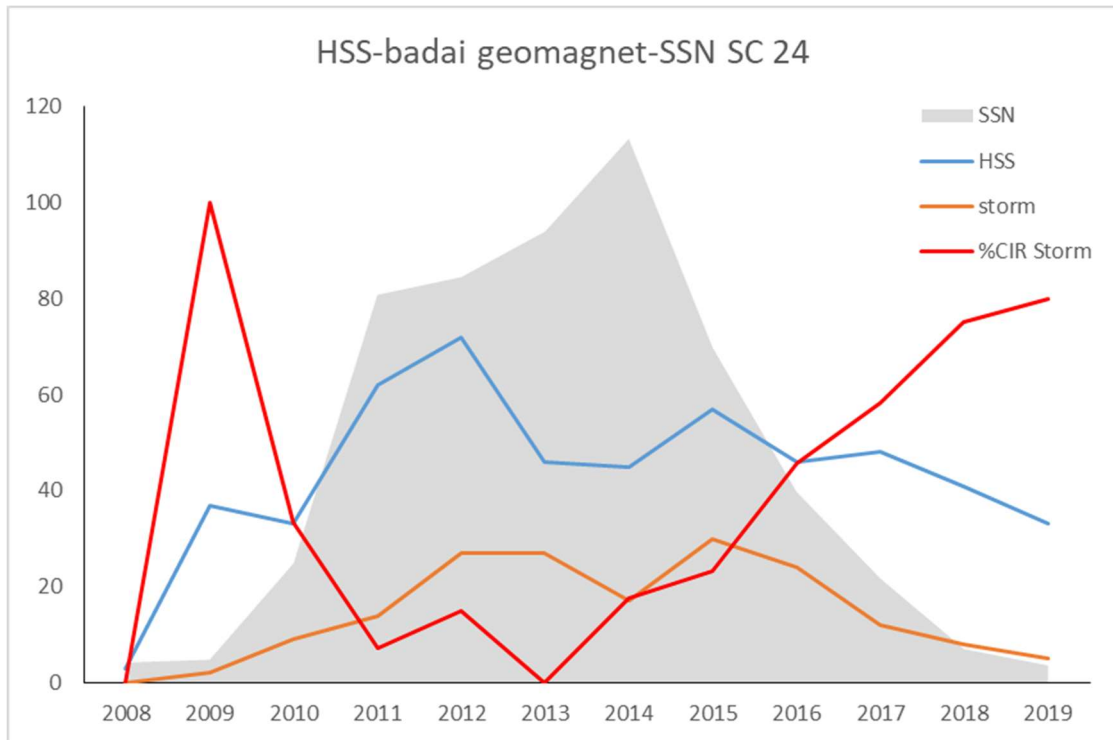
puncak rangkap adalah HSS dengan beberapa puncak dengan selisih <10 km/detik, sedangkan HSS dengan puncak beruntun adalah HSS yang disusul dengan HSS lain saat fase *recovery*-nya belum mencapai kecepatan rata-rata. Sketsa tipe-tipe HSS ini ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. HSS pada 31 Januari–5 Februari 2015. Garis merah menandakan perubahan kecepatan, sedangkan garis oranye menggambarkan durasi waktu. Absis adalah hari ke-n dalam tahun 2015, ordinat adalah kecepatan dalam km/detik.



Gambar 4. Tipe HSS pada SC 24: a) puncak tunggal, b) puncak rangkap dan c) puncak beruntun.



Gambar 5. Jumlah bilangan bintang Matahari (*Sunspot Number*, SSN), HSS, kejadian badai geomagnet, dan persentase badai geomagnet CIR pada SC 24

Gambar 5 menampilkan plot jumlah kejadian bilangan bintang Matahari (SSN), HSS dan badai geomagnet pada siklus Matahari ke-24. Berdasarkan data angin Matahari, total terdapat 523 kejadian HSS pada siklus Matahari ke-24. Tidak semua HSS yang teridentifikasi di L1 bersifat geoeftif. Dari plot jumlah HSS (biru) dan badai geomagnet (oranye) pada Gambar 5 tampak bahwa distribusi jumlah HSS dan badai geomagnet memiliki pola yang serupa dengan rata-rata tahunan jumlah bintang Matahari (area abu-abu). Hal ini dapat cukup dipahami dengan sederhana bahwa HSS dan badai geomagnet adalah kejadian yang sangat berkaitan erat dengan aktivitas matahari (koefisien korelasi, cc SSN-HSS $\sim 0,63$; SSN-badai geomagnet $\sim 0,75$ dan HSS-badai geomagnet $\sim 0,73$).

Jumlah kejadian HSS terbanyak dalam 1 tahun terjadi pada tahun 2012, yakni sebanyak 72 kejadian, yang merupakan fase puncak siklus, dan 2015, saat fase siklus Matahari mulai mengalami penurunan, yaitu sebanyak 57 kejadian. Merujuk pada definisi HSS dengan durasi 2 hari atau lebih, pada tahun 2012 Bumi terpapar HSS setidaknya setara dengan 144 hari atau 4,8 bulan. Jumlah HSS pada awal siklus Matahari ke-24, tahun 2008, tercatat paling sedikit yaitu hanya 3 kejadian karena hanya mencakup satu

bulan, yaitu Desember. Peningkatan kecepatan tertinggi HSS pada SC ke-24 adalah 464 km/detik, terjadi pada HSS 13 Januari 2014. Tercatat kecepatan angin Matahari mencapai kecepatan maksimumnya yaitu 878 km/detik.

Jika diasumsikan seluruh badai geomagnet yang terjadi diakibatkan oleh HSS, maka rata-rata tahunan geoeftifitas HSS pada SC 24 adalah 29,5%. Dengan *range* data 58%, nilai rata-rata tahunan ini tentu kurang representatif karena banyaknya kejadian sangat bergantung pada fase siklus Matahari. HSS dapat bersumber dari lubang korona maupun *flare-CME* (Maris & Maris, 2005), dan dalam beberapa kejadian, badai geomagnet dapat dipicu oleh CME dan disertai pula akselerasi HSS dari lubang korona, terutama pada fase naik dan turun siklus Matahari, sehingga pola pada Gambar 5, terutama HSS-badai geomagnet, tampak bersesuaian.

3.2. Identifikasi Badai CIR

Pemicu badai geomagnet adalah CME, CIR, atau keduanya (Watari, 2017; Singh *et al.*, 2017). Total terdapat 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24. Untuk mengidentifikasi dan menganalisis badai geomagnet yang diakibatkan hanya oleh CIR,

maka kontribusi CME geoeftif harus dieliminasi. CME geoeftif sesuai kriteria Kim *et al.*, (2008) yaitu CME yang bersumber dari $0 < L < 30$ untuk CME lambat (kecepatan awal < 800 km/detik), dan $30 < L < 60$ untuk CME cepat (≥ 800 km/detik), dengan L adalah bujur Matahari. Hasil studi Ravishankar & Michalek (2019), waktu transit CME dengan kecepatan < 1000 km/detik berada pada kisaran 50–140 jam, sedangkan untuk CME dengan kecepatan > 1000 km/s umumnya adalah 40–60 jam. Untuk menentukan perkiraan waktu transit, digunakan model empirik propagasi CME pada persamaan (2), (Gopalswamy *et al.*, 2001). Berdasarkan kinematika gerak lurus berubah beraturan,

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as$$

Dengan v_t adalah kecepatan akhir, dan s adalah jarak. Pada nilai percepatan negatif (perlambatan), ketika $v_0^2 = -2as$, maka kecepatan akhir akan bernilai nol. Hal ini perlu dikoreksi karena kecepatan akhir CME akan selalu sama dengan kecepatan angin Matahari dan tidak bernilai nol. Sehingga untuk CME yang dilontarkan dengan kecepatan lebih tinggi dari angin Matahari, perlambatan terhenti pada $v_0^2 - 2as = v_{sw}^2$. Sebaliknya, untuk CME yang lebih lambat dari angin Matahari, percepatan terhenti pada $v_0^2 + 2as = v_{sw}^2$.

Menggunakan data kecepatan angin Matahari pada siklus Matahari ke-24, diperoleh nilai rata-rata kecepatan angin Matahari 412 km/detik. Dengan asumsi ketiadaan percepatan (percepatan bernilai nol) dan substitusi pada persamaan (2), maka diperoleh nilai kecepatan 406 km/detik, yang dianggap cukup mendekati nilai kecepatan rata-rata angin Matahari, sehingga model pada persamaan (2) dapat dianggap valid untuk diterapkan pada studi ini.

Dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (~27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Dengan nilai modus ~-47 nT, kebanyakan badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah. Sebanyak 38 kejadian badai geomagnet CIR adalah badai lemah, 9 kejadian badai menengah, dan 1 sisanya badai kuat. Plot garis merah pada Gambar 5 menunjukkan persentase badai geomagnet CIR tahunan yang tampak berbanding terbalik dengan grafik plot lainnya. Pada saat aktivitas Matahari minimum tahun 2019, persentase

badai CIR bahkan bernilai maksimal, 100%, karena kedua badai geomagnet yang terjadi pada tahun tersebut dipicu CIR tanpa disertai CME geoeftif. Pada tahun 2019 juga terjadi dominasi badai geomagnet CIR dengan nilai persentase 80%. Sebaliknya, pada sekitar puncak siklus Matahari ke-24—tahun 2011–2014, persentase badai CIR adalah yang terendah dibanding yang lainnya. Bahkan, sepanjang tahun 2013 terjadi 27 badai geomagnet yang tidak satupun disebabkan oleh CIR. Hal ini sesuai dengan hasil Bravo *et al.*, (1997) yang menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara SSN dengan luas lubang korona pemicu HSS pada SC ke 20, 21, dan 22.

3.3. Analisis Parameter CIR

Karakteristik umum CIR pada parameter plasma antarplanet adalah terjadi peningkatan drastis densitas proton (n) melebihi *threshold* (~10 partikel/cm³) dan bertahan dalam jangka waktu 1 hari. Profil densitas cenderung berkebalikan dengan kecepatan (v). Puncak medan magnet antarplanet di daerah kompresi umumnya proporsional terhadap kecepatan, dengan polaritas yang cenderung tetap (Tsurutani *et al.*, 1987). Selain itu temperatur proton (T) bervariasi dengan pola yang mirip dengan kecepatan (Maromichalaki & Vassilaki, 1998). Diketahui pula bahwa medan magnet antarplanet memegang peranan penting dalam kejadian badai geomagnet, terutama komponen arah selatan (IMF B_z) (Rostoker & Fälthammar, 1967). Studi lain oleh Burlaga & Lepping, (1977) dan Kikuchi *et al.*, (2008) menyebutkan pengaruh penting penetrasi medan listrik magnetosfer ke ionosfer pada badai geomagnet. Sebelumnya telah dibahas pada bab Pendahuluan bahwa CIR melibatkan daerah kompresi (tekanan) di medium antarplanet. Berdasarkan karakteristik umum parameter badai geomagnet dan CIR tersebut, parameter statistik untuk minimum Dst, IMF B_z , maksimum kecepatan, densitas proton, tekanan, medan listrik, medan total, dan medan listrik untuk badai geomagnet CIR ditampilkan pada Tabel 2. Adapun koreksi untuk medan listrik pada persamaan (1) dihitung menggunakan syarat kondisi persamaan O'Brien & McPherron, (2000):

$$Q(VB_z) = \begin{cases} |VB_z| & B_z < 0 \\ 0 & B_z \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

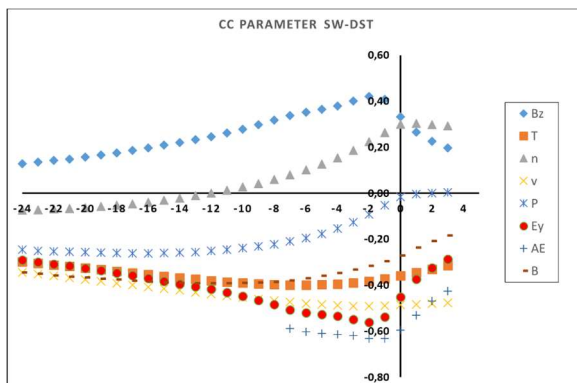
Tabel 2. Parameter statistik badai geomagnet CIR SC24

parameter	B	IMF Bz	T	n	v	P	Ey	Dst
rata-rata	13,27	-9,34	367600	25,10	594	8,12	4,34	-66,38
SD	4,39	3,61	219900	12,93	106	2,77	1,48	22,48
median	12,95	-8,15	349500	23,95	613	7,63	4,01	-59,50
min	4,80	-20,80	72900	4,70	362	3,50	2,29	-174,00
max	24,00	-4,50	1482000	61,60	761	14,75	8,28	-46,00
range	19,20	16,30	1409100	56,90	399	11,25	5,99	128,00
koef variasi (%)	33,07	38,58	59,81	51,50	17,87	34,15	34,01	33,87

Badai geomagnet yang dipicu CIR pada SC ke-24 berada pada rentang Dst minimum -46 nT (badai lemah) hingga -175 nT (badai kuat). Dengan *range* data 128 nT, nilai ini sedikit berbeda dibandingkan hasil Alves *et al.*, (2006) yang menyebutkan indeks Dst pada CIR geoeftif berada pada kisaran +9 sampai -131 nT. Hal ini dikarenakan studi tersebut menggunakan data Dst hingga 2 hari setelah CIR dan dapat mencakup fase *recovery* badai sehingga terdapat nilai Dst positif pada populasi data, sementara pada studi ini lebih difokuskan hanya saat kejadian badai terjadi. Nilai rata-rata minimum Dst berada pada -66 nT dengan nilai tengah -59,5 nT (badai sedang, Tabel 1). Kedua parameter ini tidak menunjukkan keterwakilan data karena pada kenyataannya, CIR cenderung lebih memicu badai lemah (~79%) dibanding badai sedang. Hal ini karena dengan nilai standar deviasi 22,48; koefisien variasi 33,86% dan jangkauan data 128 nT, populasi data Dst memiliki nilai yang ekstrim yaitu satu

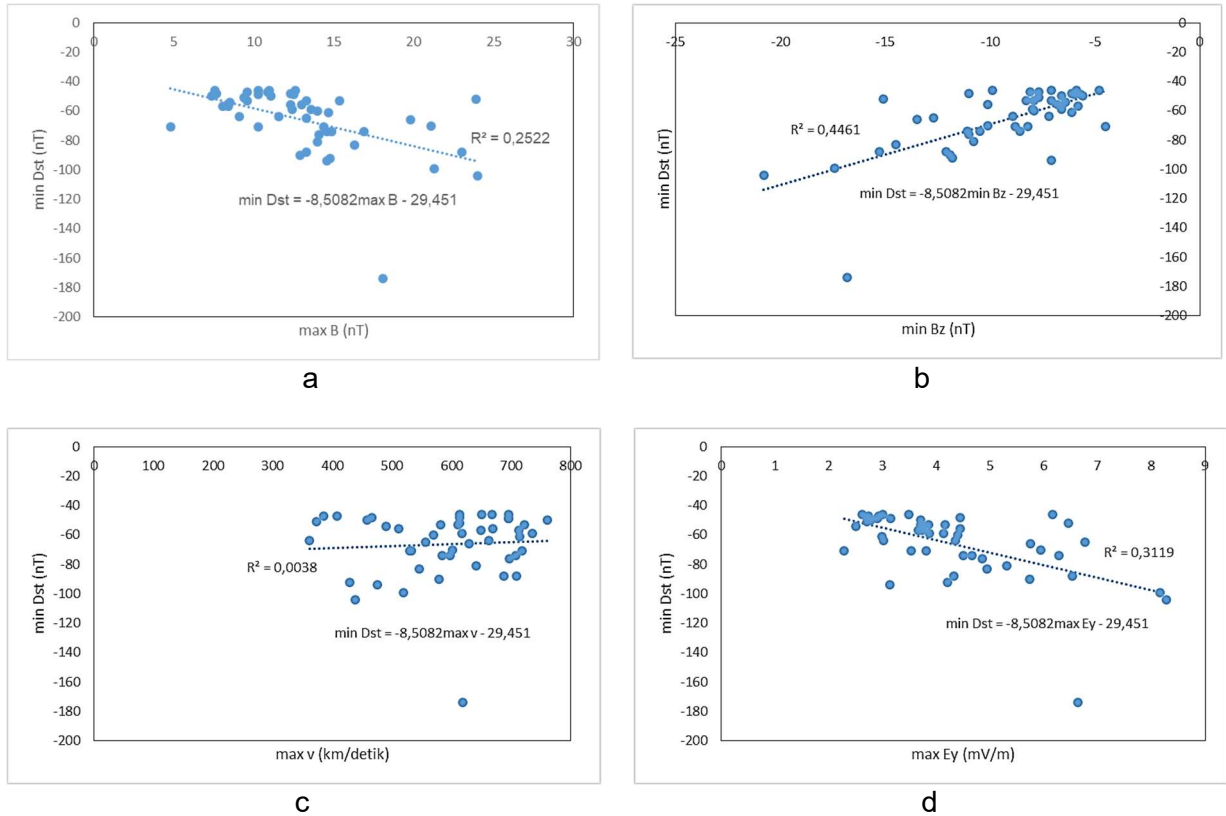
kejadian badai geomagnet kuat pada 26 Agustus 2018 (minimum Dst -174 nT).

Nilai kecepatan angin Matahari maksimum pada badai geomagnet CIR siklus Matahari ke-24 adalah 761 km/detik, dengan rata-rata 593,7 km/detik. Tabel 2 juga menunjukkan koefisien variasi maksimum kecepatan angin Matahari adalah yang terkecil dibandingkan parameter lainnya, yang artinya dispersi datanya kecil sehingga rata-rata dan median bersifat representatif. Berdasarkan hasil tersebut, kriteria untuk HSS sebagai pemicu CIR yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, yaitu maksimal kecepatan > 400 km/detik dianggap telah sesuai untuk mendefinisikan HSS. Nilai maksimum medan listrik 8,28 mV/m pada Tabel 2 sesuai dengan kriteria Gonzalez & Tsurutani (1987), bahwa untuk badai geomagnet intens (Dst < -100 nT), medan listrik harus bernilai lebih besar dari 5 mV/m. Pada siklus Matahari ke-24, nilai maksimum medan listrik tersebut terjadi pada badai geomagnet dengan intensitas -104 nT.



parameter	cc opt	jeda
B-Dst	-0,39	-13
Bz-Dst	0,42	-2
n-Dst	0,30	1
V-Dst	-0,49	-2
P-Dst	-0,26	-17
T-Dst	-0,40	-6
Ey-Dst	-0,56	-2
AE-Dst	-0,63	-2

Gambar 6. Korelasi silang parameter angin Matahari-aktivitas geomagnet (Dst). Sumbu-x adalah jeda dalam jam, nilai indeks AE sebagai pembanding. *cc opt* adalah nilai korelasi terbaik.

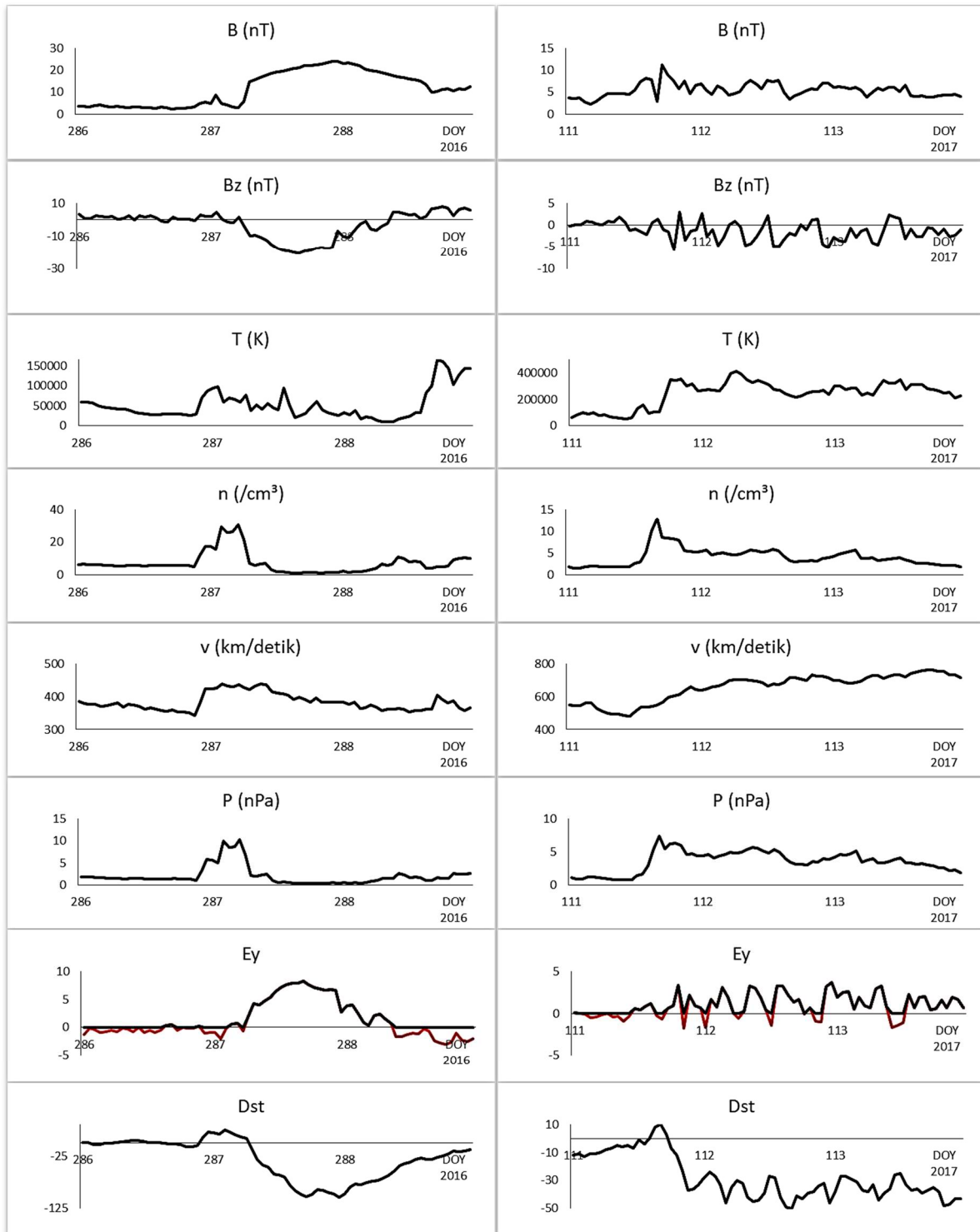


Gambar 7. Plot *scatter* distribusi parameter angin Matahari untuk badai geomagnet CIR: a) min Dst terhadap max medan total ($R = -0,5$); b) min Dst terhadap min komponen selatan medan magnet antarplanet Bz ($R = 0,67$); c) min Dst terhadap max kecepatan v ($R = 0,06$); dan d) min Dst terhadap medan listrik Ey ($R = -0,56$).

Gambar 6 menunjukkan ilustrasi korelasi silang antarparameter dan nilai terbaiknya. Dapat dilihat bahwa korelasi terbaik adalah pada kecepatan angin Matahari-Dst ($cc = -0,49$), medan listrik-Dst ($cc = -0,56$), dan komponen selatan medan magnet antarplanet-Dst (IMF Bz, $cc = 0,42$). Dengan jeda 2 jam (tanda negatif mengandung makna parameter angin Matahari mendahului badai), artinya puncak badai geomagnet di lintang rendah pada SC ke-24 umumnya terjadi pada 2 jam setelah medan magnet antarplanet mengarah ke selatan disertai peningkatan kecepatan dan penguatan medan listrik. Sebagai perbandingan, indeks AE berkorelasi kuat dengan indeks Dst pada jeda 2 jam ($cc -0,63$) yang dapat diartikan bahwa gangguan geomagnet memerlukan waktu 2 jam untuk berpropagasi dari daerah polar ke lintang rendah.

Nilai korelasi yang sedikit berbeda ditunjukkan pada hubungan medan total dengan Dst ($cc 0,39$) namun dengan jeda

yang cukup jauh yaitu 13 jam. Dengan kata lain, pada SC ke-24 umumnya penguatan medan magnet total dapat terjadi 13 jam sebelum puncak badai geomagnet, dengan transfer energi pada 6 jam sebelum puncak badai namun memerlukan “pintu masuk” yaitu medan magnet antarplanet arah selatan pada 2 jam menjelang puncak badai, kemudian terjadi rekoneksi dengan medan magnet Bumi sehingga mengakibatkan injeksi partikel bermuatan ke magnetosfer, terjadi gangguan geomagnet yang berpropagasi dari daerah polar ke lintang yang lebih rendah. Bersamaan dengan penguatan arus cincin, indeks Dst terdepresi hingga tingkatan tertentu dan terdeteksi sebagai badai geomagnet. Hubungan antarparameter yang lebih kecil ditunjukkan pada korelasi antara tekanan dan densitas dengan aktivitas geomagnet ($cc \sim 0,3$). Hal ini menandakan bahwa hanya sebagian kecil kejadian badai geomagnet yang disertai dengan gelombang kejut (*shock*).



Gambar 8. Badai geomagnet CIR pada: (a) minimum IMF B_z , 13 Oktober 2016 dan (b) maksimum kecepatan, 22 April 2017. Plot merah pada medan listrik (E_y) adalah nilai non koreksi.

Untuk mengetahui keterkaitan antara nilai ekstrim masing-masing parameter B , B_z , v , dan E_y dengan magnitudo badai geomagnet CIR saat badai berlangsung, diplot distribusi masing-masing parameter pada tiap kejadian badai geomagnet CIR yang ditampilkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa maksimum kecepatan berkorelasi sangat lemah dengan

minimum Dst. Artinya, kecepatan maksimum tidak serta-merta memengaruhi kuat badai geomagnet CIR yang terjadi. Sebelumnya hasil serupa diperoleh pada kejadian badai geomagnet CIR tahun 1966–2004 (Richardson *et al.*, 2006). Untuk korelasi maksimum medan magnet total dengan minimum Dst, masih dalam kategori sedang namun lebih baik dibandingkan hasil pada

Gambar 5. Sedangkan untuk korelasi medan listrik-Dst menunjukkan hasil yang sama karena koreksi O'Brien-McPherron, (2000) pada persamaan (4). Meskipun secara umum berkorelasi sedang dengan indeks Dst, minimum komponen selatan medan magnet antarplanet berkorelasi kuat dengan minimum Dst. Artinya, saat badai, semakin kuat arah selatan medan magnet antarplanet, semakin kuat pula magnitudo badai geomagnet CIR yang terjadi. Sebagai ilustrasi, Gambar 7 menunjukkan perbandingan parameter-parameter pada saat badai geomagnet CIR dengan arah selatan terkuat (13 Oktober 2016, Gambar 7a) versus kecepatan tertinggi (22 April 2017, Gambar 7b). Karena diturunkan dari massa partikel, tekanan dan densitas memiliki profil yang serupa, demikian halnya dengan medan listrik yang diturunkan dari komponen selatan medan magnet antarplanet. Meskipun hanya dengan kecepatan maksimum sekitar 450 km/detik, intensitas badai geomagnet pada 13 Oktober 2016 mencapai hingga -104 nT, dibandingkan dengan badai geomagnet pada 22 April 2017 dengan kecepatan pada 700-800 km/detik, bahkan dengan durasi kecepatan tinggi yang lama. Meskipun HSS adalah pemicu utama badai geomagnet CIR, perbandingan kedua badai ini menunjukkan bahwa magnitudo dan durasi parameter komponen selatan medan magnet antarplanet, memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

4. Kesimpulan

Berdasarkan studi yang telah dilakukan, total terdapat 523 kejadian HSS pada siklus Matahari ke-24. Jumlah kejadian HSS terbanyak dalam 1 tahun adalah pada tahun 2012, sebanyak 72 kejadian, yang merupakan fase puncak siklus Matahari. Peningkatan kecepatan tertinggi HSS pada SC ke-24 adalah 464 km/detik, terjadi pada HSS 13 Januari 2014 saat kecepatan angin Matahari mencapai kecepatan maksimumnya yaitu 878 km/detik. Dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (sekitar 27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Dengan nilai modus ~ -47 nT, kebanyakan (38 kejadian) badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah, 9 kejadian badai menengah, dan 1 sisanya badai kuat. Jumlah badai geomagnet tahunan CIR ini berbanding terbalik dengan SSN.

Korelasi terbaik parameter angin Matahari-aktivitas geomagnet adalah pada kecepatan angin Matahari-Dst ($cc = -0,49$), medan listrik-Dst ($cc = -0,56$), dan komponen selatan medan magnet antarplanet-Dst (IMF Bz, $cc = 0,42$) dengan jeda 2 jam. Kecepatan maksimum tidak serta-merta memengaruhi kuat badai geomagnet CIR yang terjadi. Meskipun HSS adalah pemicu utama badai geomagnet CIR, parameter komponen selatan medan magnet antarplanet dan medan listrik memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim *Geospace Science* (GGS) WIND dan ACE pada GSFC/SPDF yang menyediakan data parameter angin Matahari, tim WDC Geomagnet-Kyoto untuk data indeks Dst, Poklit Geomagnet Pusat Sains Antariksa, dan Mitra Bestari Jurnal Sains Dirgantara.

Makalah ini telah melewati proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Rhorom Priyatikanto sebagai editor.

Pernyataan Kontribusi

AW merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, menyusun metodologi, melakukan pengolahan data, dan menyusun naskah, FN adalah kontributor anggota yang berkontribusi dalam studi literatur dan analisis makalah ini.

Rujukan

- Alves, M.V., Echer, E., & Gonzalez, W.D. (2006). Geoeffectiveness of Corotating Interaction Regions as Measured by Dst Index. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Bame, S.J., Asbridge, J.R., Feldman, W.C., & Gosling, J.T. (1976). Solar Cycle Evolution of High-Speed Solar Wind Streams. *The Astrophysical Journal*, 207, 977-980.
- Burlaga, L. F., & Lepping, R. P. (1977). The causes of recurrent geomagnetic storms. *Planetary and Space Science*, 25(12), 1151-1160.
- Borovsky, J.E. (2018). On the Origins of the Intercorrelations between Solar Wind Variables. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(1), 20-29.

- Bravo, S., Cruz-Abeyro, J.A.L., & Rojas, D. (1997). The Spatial Relationship Between Active Regions and Coronal Holes And The Occurrence of Intense Geomagnetic Storms Throughout the Solar Activity Cycle. In *Annales Geophysicae* (Vol. 16, No. 1, pp. 49-54). Springer-Verlag.
- Burton, R.K., McPherron, R.L., & Russell, C.T. (1975). An Empirical Relationship between Interplanetary Conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research* 80, 4204-4214.
- Broussard, R.M., Sheeley, N.R., Tousey, R., & Underwood, J.H. (1978). A Survey of Coronal Holes and their Solar Wind Associations throughout Sunspot Cycle 20. *Solar Physics*, 56(1), 161-183.
- Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M., & Howard, R.A. (2001). Predicting the 1-AU Arrival Times of Coronal Mass Ejections. *J. Geophys. Res.*, 106, 29,207–29,218.
- Gonzalez, W.D., & Tsurutani, B.T. (1987). Criteria of Interplanetary Parameters causing Intense Magnetic Storms (Dst < -100 nT). *Planetary and Space Science*, 35(9), 1101-1109.
- Habbal, S.R., Woo, R., Fineschi, S., O'Neal, R., Kohl, J., Noci, G., & Korendyke, C. (1997). Origins of the Slow and the Ubiquitous Fast Solar Wind. *The Astrophysical Journal Letters*, 489(1), L103.
- Heinemann, S.G., Temmer, M., Hofmeister, S.J., Veronig, A.M., & S. Vennerstrom, (2018). Three-phase Evolution of a Coronal Hole. I. 360° Remote Sensing and In Situ Observations. *Astrophys J* 861:151. doi: 10.3847/1538-4357/aac897.
- Juangsih, M., 2015. Penentuan Indeks K Geomagnet Untuk Daerah Indonesia. *Tesis Magister Sains Kebumihan ITB*.
- Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., & Nozaki, K. (2008). Penetration of Magnetospheric Electric Fields to the Equator during a Geomagnetic Storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A6).
- Kim, R.S., Cho, K.S., Kim, K.H., Park, Y.D., Moon, Y.J., Yi, Y., Lee, J., Wang, H. Song, H. & Dryer, M. (2008). CME Earthward Direction as an Important Geoeffectiveness Indicator. *The Astrophysical Journal*, 677(2), 1378.
- Lindblad, B.A., & Lundstedt, H. (1981). A Catalogue of High-Speed Plasma Streams in the Solar Wind. *Physics of Solar Variations* (pp. 197-206). Springer, Dordrecht.
- Lobel, A., (2008). Modeling DACs in UV Lines of Massive Hot Stars. *Clumping in Hot-Star Winds: International Workshop, Potsdam, Germany*.
- Maris, O. & Maris, G. (2005). *Specific Features of the High-Speed Plasma Stream Cycles*. *Advances in Space Research*, 35(12), 2129-2140.
- Mavromichalaki, H., & Vassilaki, G. (1998). Fast Plasma Streams Recorded Near the Earth during 1985–1996. *Solar Physics*, 183(1), 181-200.
- Musafar, L.M. & Winarko, A. (2020). Koping Angin Matahari dan Sistem Magnetosfer-Ionosfer Bumi: I. Sumber Angin Matahari dan Karakteristiknya. *Buletin Cuaca Antariksa*, 9(3).
- O'Brien, T.P., & McPherron, R.L. (2000). Forecasting the Ring Current Index Dst in Real Time. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(14), 1295-1299.
- Ravishankar, A., & Michalek, G. (2019). Estimation of Arrival Time of Coronal Mass Ejections in the Vicinity of the Earth Using SOLar and Heliospheric Observatory and Solar TERrestrial RELations Observatory Observations. *Solar Phys* 294:125.
- Richardson, I.G., Webb, D.F., Zhang, J., Berdichevsky, D.B., Biesecker, D.A., Kasper, J.C., Kataoka, R., Steinberg, J.T., Thomson, B.J., Wu, C.-C & Zhukov, A.N. (2006). Major geomagnetic storms (Dst ≤ -100 nT) generated by corotating interaction regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Richardson, I. G. (2018). Solar Wind Stream Interaction Regions Throughout the Heliosphere. *Living reviews in solar physics*, 15(1), 1.
- Rostoker, G., & Fälthammar, C. G. (1967). Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface. *Journal of Geophysical Research*, 72(23), 5853-5863.
- Singh, A., Rathore, V.S., Singh, R.P., & Singh, A.K. (2017). Source Identification of Moderate (-100 nT < Dst < -50 nT) and Intense Geomagnetic Storms (Dst <

- 100 nT) during Ascending Phase of Solar Cycle 24. *Advances in Space Research*, 59(5), 1209-1222.
- Suess, S. T., Ko, Y. K., Von Steiger, R., & Moore, R. L. (2009). Quiescent Current Sheets in the Solar Wind and Origins of Slow Wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A4).
- Tsurutani, B.T., Burton, M.E., Smith, E.J., & Jones, D.E. (1987). Statistical Properties of Magnetic Field Fluctuations in the Distant Plasmasheet. *Planetary and space science*, 35(3), 289-293.
- Watari, S., (2017). Geomagnetic Storms of Cycle 24 and Their Solar Sources. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 1-8.
- Xystouris, G., Sigala, H., & Mavromichalaki, H. (2013). A Complete Catalogue of High-Speed Solar Wind Streams during Solar Cycle 23. *Sol Phys* 289:995-1012. DOI: 10.1007/s11207-013-0355-z.