

Koneksi Matahari-Bumi 25 - 26 Agustus 2018: CME, MC, dan Badai Geomagnetik Kuat

Muhamad Khamdani^{1*} dan Dhani Herdiwijaya²

¹*Program Studi Magister Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, 40132, Indonesia*

²*Divisi Penelitian Astronomi, Observatorium Bosscha, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 40132, Indonesia*

**E-mail: elkhamdan@gmail.com*

INTISARI

Basis Revolusi Industri 4.0 adalah perkembangan teknologi, termasuk teknologi informasi dan komunikasi yang sangat rentan terdampak cuaca antariksa. Baik berupa gangguan sementara atau kerusakan permanen pada sistem teknologi landas Bumi dan, terlebih teknologi ruang angkasa. Dampak masif badai geomagnetik menjadikannya dianggap sebagai inti dari cuaca antariksa. Data per jam parameter geomagnet (indeks Dst) menunjukkan terjadinya badai geomagnetik kuat selama 9 jam pada 26 Agustus 2018. Puncak badai geomagnetik kuat ini terjadi pada pukul 06:00 UT dengan indeks Dst -174 nT. Tujuan dari penelitian adalah mengetahui penyebab badai geomagnetik kuat yang terjadi pada fase menurun siklus Matahari ke-24, baik yang berada di ruang antar planet maupun di permukaan Matahari. Data plasma angin surya, medan magnet antar planet, dan parameter geomagnet yang digunakan dalam penelitian diperoleh dari laman OMNIWeb Plus yang disediakan oleh *The Space Physics Data Facility* (SPDF) dengan resolusi satu jam, sementara data lontaran massa korona (CME) diperoleh dari laman katalog CME yang dihasilkan dan dikelola oleh *Coordinate Data Analysis Workshop* (CDAW) *Data Center*. Berdasarkan analisis data (kecepatan dan temperatur) plasma dan rapat proton angin surya, medan magnet antar planet (komponen By dan Bz), dan turunan keduanya, kami menemukan awan magnetik (MC) di ruang antar planet. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penyebab badai geomagnetik ini adalah lontaran massa korona yang terdapat di ruang antar planet (ICME). Lebih lanjut, keberadaan CME dan kondisi permukaan Matahari didiskusikan dalam tulisan ini. Penelitian ini penting untuk memantapkan pengetahuan dan teknologi yang dikembangkan untuk memprediksi cuaca antariksa beserta mitigasi dampaknya.

Kata Kunci: Badai geomagnetic, CME, MC

ABSTRACT

The basis of the Industrial Revolution 4.0 is the development of technology, including information and communication technology that is highly vulnerable to being affected by space weather. The impacts can be in the form of temporary system disruptions or permanent damages to the ground-based technological systems and, moreover, space technological systems. The massive impacts of geomagnetic storms make it considered the core of space weather. The hourly data of the geomagnetic parameters (Dst index) showed the occurrence of a strong geomagnetic storm for 9 hours on August 26, 2018. The peak of this strong geomagnetic storm occurred at 06:00 UT with the Dst index -174 nT. The purpose of this research is to determine the causes of this strong geomagnetic storm that lasted in the declining phase of the 24th Sun cycle, both interplanetary and solar sources. Solar wind plasma data, interplanetary magnetic fields, and geomagnetic parameters used in the study were obtained from the OMNIWeb Plus page provided by The Space Physics Data Facility (SPDF) with a one-hour resolution, while coronal mass ejections (CMEs) data were obtained from the CME catalog that is generated and maintained at Coordinate Data Analysis Workshop (CDAW) Data Center. Based on the data analysis (velocity and temperature) of plasma and solar wind proton density, interplanetary magnetic fields (By and Bz components), and their derivatives, we found magnetic cloud (MC) in interplanetary space. Thus, it can be concluded that the cause of the geomagnetic storm is interplanetary coronal mass ejection (ICME). Furthermore, the existence of CME and the surface conditions of the Sun are discussed in this paper. This research is important to advance knowledge and technology developed to forecast space weather and mitigate its impacts.

Keywords: CME, geomagnetic storm, MC

Pendahuluan

Dampak cuaca antariksa telah dirasakan jauh sebelum era ruang angkasa dimulai, tepatnya periode awal dikembangkannya jaringan telegraf sebagai sistem komunikasi jalur kereta api. Gangguan berupa arus anomali yang mengalir pada kabel telegraf terjadi pada Mei dan November 1847, yang kemudian didapati berasosiasi dengan kemunculan aurora di kutub utara [1]. Dampak yang lebih dahsyat terjadi pada 1859, di mana jaringan telegraf Boston-Portland digunakan tanpa menggunakan baterai selama lebih dari satu jam. Peristiwa ini dikenal dengan *Carrington Event*, yang merupakan badai geomagnetik terbesar sepanjang sejarah dengan indeks Dst (*disturbance storm time*) mencapai -1760 nT [2]. Badai geomagnetik diklasifikasikan menjadi 5 kelas; lemah ($Dst \leq -30$ nT), sedang ($Dst \leq -50$ nT), kuat ($Dst \leq -100$ nT), sangat kuat ($Dst \leq -200$ nT), dan ekstrim ($Dst \leq -350$ nT) [3]. Indeks Dst – dinyatakan dalam satuan *nanotesla* (nT) – diukur berdasarkan nilai rata-rata komponen horizontal medan magnet Bumi di empat observatorium geomagnet yang terletak di sekitar ekuator; Honolulu, San Juan, Hermanus, dan Kakioka [4].

Gangguan geomagnet ditandai dengan indeks Dst negatif, yang merupakan respon kondisi yang tidak normal dari medan magnet antar planet (*interplanetary magnetic field*, IMF) dan plasma angin surya [5]. Tibanya IPS (*interplanetary shock*) dapat digunakan sebagai tanda dimulainya aktifitas geomagnet. Kompresi magnetosfer oleh IPS menyebabkan terjadinya permulaan badai geomagnetik (*sudden storm commencement*, SCC), namun tidak selalu terjadi pada setiap badai. SCC dapat berlangsung dalam orde puluhan menit hingga jam, ditandai dengan peningkatan indeks Dst dari kondisi sebelumnya. Setelah SCC, indeks Dst akan turun drastis dan memasuki fase utama badai yang dapat berlangsung dalam beberapa jam [6].

Ketidaknormalan aktivitas geomagnet disebabkan oleh dua hal, angin surya berkecepatan tinggi (*high-speed stream*, HSS) atau ICME, yang masing-masing berasal dari lubang korona dan CME. Interaksi angin surya berkecepatan rendah (*low-speed stream*, LSS) dan HSS akan membentuk CIR (*corotating interaction region*), ditandai dengan peningkatan rapat proton angin surya dan intensitas IMF sebelum HSS [7]. Tetapi, persentase CIR sebagai sumber badai geomagnetik kuat relatif kecil dibandingkan ICME [8]. Selain itu, CIR lebih sering terbentuk pada fase minimum siklus Matahari, sementara di fase maksimum didominasi oleh ICME.

CME yang terlontar ke ruang antar planet disebut ICME, yang memiliki beragam struktur sebagai sumber badai geomagnetik kuat [8, 9]. CME merupakan pelapasan massa dan energi terbesar dan paling eksplosif Matahari – mencapai 10^{12} kg dalam selang waktu beberapa puluh menit – dan dapat mencapai kecepatan 2000 km s^{-1} bahkan lebih [10]. CME sering kali berasosiasi dengan *flare* dan *filament*, namun juga tak jarang sebagai peristiwa tunggal [8]. Selain itu, ada kalanya beberapa CME terjadi dalam waktu yang bersamaan, sehingga struktur

ICME menjadi lebih kompleks. Dari ragam struktur IMF dan plasma angin surya, lebih dari 30% ICME yang teramati di dekat Bumi menunjukkan struktur MC [11]. MC memiliki beberapa ciri khas struktur IMF, di antaranya; rotasi medan magnet Bz atau By dan intensitas medan magnetik yang tinggi [9]. Selain itu, plasma angin surya menunjukkan penurunan rapat [12] dan temperatur [9, 12] proton, juga perbandingan tekanan gas dengan tekanan magnetik (plasma beta) yang rendah [9].

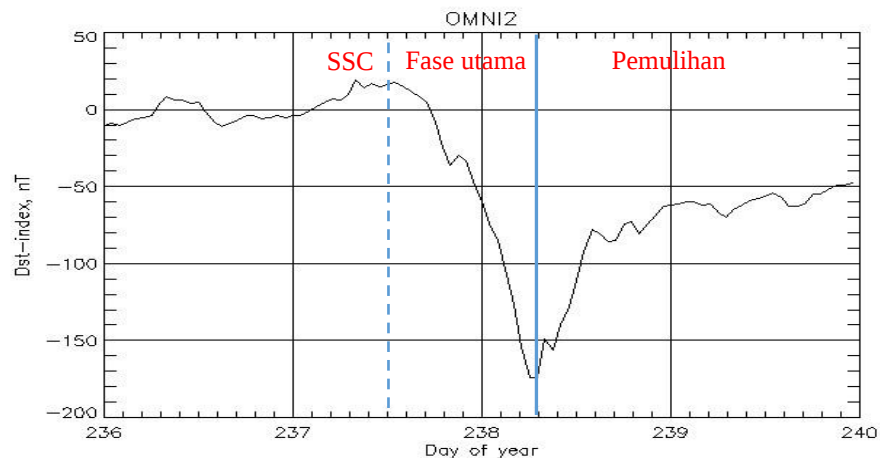
Daftar gangguan yang disebabkan oleh badai geomagnetik terus bertambah dari waktu ke waktu, di antara gangguan ekstrim yang tidak mudah dilupakan adalah *Quebec Power Outage* (1989) dan *Halloween Event* (2003). Badai 13 Maret 1989 disebut *Quebec Power Outage* karena menyebabkan terputusnya aliran listrik di Quebec, Kanada, hingga lebih dari 9 jam. Selain itu, badai ini juga menyebabkan gangguan pada sistem kabel serat optik jaringan telekomunikasi trans-atlantik [13]. Pada 31 Oktober 2003, meskipun tidak sekuat badai sebelumnya, badai ini menyebabkan kerusakan jaringan listrik di Afrika Selatan dan Swedia [14]. Selain jaringan listrik, objek vital yang rentan terdampak cuaca antariksa adalah sistem navigasi dan komunikasi. Kedua sistem ini sangat sensitif terhadap variabilitas rapat elektron

ionosfer melalui perubahan ekstrim magnetosfer dan termosfer yang dipicu oleh ICME atau HSS, atau berhubungan dengan erupsi sinar-X dan EUV (*extreme ultraviolet*) di permukaan Matahari. Penelitian ini akan menganalisis dan menjelaskan koneksi Matahari-Bumi yang terjadi pada 26 Agustus 2018 dalam peristiwa badai geomagnetik kuat. Menariknya, peristiwa ini terjadi saat siklus Matahari pada fase minimum. Di mana Matahari memiliki sedikit grup *sunspot*, juga tidak adanya peristiwa eruptif seperti CME dan *flare* dalam skala besar, halo CME dan *flare* kelas M dan X. Di sisi lain, beberapa lubang korona teramati di piringan Matahari.

Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari *Space Physics Data Facility* (SPDF) / *Goddard Space Flight Center* (GSFC). Parameter geomagnet, IMF, dan plasma angin surya diperoleh dari OMNIWeb Plus [15], sementara ringkasan peristiwa CME diperoleh dari *Coordinate Data Analysis Workshop* (CDAW) *Data Center* [16]. Keduanya berada di bawah naungan Divisi Sains Heliophysika (*Heliophysics Science Division*) *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Khusus untuk parameter geomagnet merupakan data *real-time* (*quicklook*).

Gambar 1 menunjukkan indeks Dst sejak 00:00 UT 24 Agustus 2018 hingga 00:00 UT 28 Agustus 2018 (24 Agustus 2018 sama dengan hari ke-236 tahun 2018) dengan resolusi satu jam. SSC teramati pukul 14:00 UT 25 Agustus 2018 (garis putus-putus warna biru) disusul fase utama (*main phase*) badai geomagnetik (di antara garis putus-putus dan garis tegas warna biru) yang berlangsung hampir satu hari, dan kemudian memasuki fase pemulihan (setelah garis tegas warna biru, dan masih berlangsung hingga 28 Agustus 00:00 UT). Badai geomagnetik kuat berlangsung selama 9 jam (03:00 – 12:00 UT) 26 Agustus 2018 dengan puncak badai mencapai -174 nT pada 06:00 UT.



Hari ke 236-240 tahun 2018

Gambar 1. Badai geomagnetik kuat 26 Agustus 2018 (hari ke-236 = 24 Agustus)

Pemicu badai geomagnetik dapat digolongkan pada sumber yang berada di ruang antar planet dan sumber yang berasal dari permukaan Matahari. Parameter IMF dan plasma angin surya digunakan untuk mengidentifikasi sumber pertama. Data ini merupakan hasil pengamatan wahana antariksa Wind yang mengorbit di titik Lagrange 1 (L1). Berdasarkan data IMF dan plasma angin surya dapat diidentifikasi beragam struktur yang berasosiasi dengan badai geomagnetik [8, 9,12]. Misalnya adalah struktur MC yang ditunjukkan oleh parameter IMF dan plasma angin surya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3a. Pada dasarnya sumber kedua dapat diketahui dari data yang sama, namun setiap peristiwa eksplosif Matahari memiliki perilaku yang berbeda dan menyebabkan struktur IMF dan plasma angin surya yang berbeda

pula. Hingga saat ini, belum terdapat metode yang tepat untuk memprediksi cuaca antariksa. Termasuk di antaranya adalah badai geomagnetik 26 Agustus 2018 yang gagal diprediksi. Berdasarkan struktur IMF dan plasma angin surya pula kedatangan ICME atau HSS diketahui, misalnya dalam bentuk IPS atau hanya sekedar peningkatan rapat proton. Dengan demikian sumber utama badai geomagnetik dapat ditemukan, berdasarkan pada interval waktu yang diperlukan peristiwa eruptif – dalam penelitian ini adalah CME – untuk mencapai titik L1. Justifikasi metode ini adalah adanya hubungan sebab akibat [8] atau kesesuaian antara struktur IMF dan plasma angin surya dengan sumber yang ditemukan di permukaan Matahari.

Sejak 20 Agustus 2018 terdapat 7 peristiwa CME yang teramati *Large Angle Spectroscopic Coronagraph* (LASCO) (lihat Tabel 1), namun tidak satupun yang memiliki geoeftektivitas tinggi. Tidak terdapat halo CME dan secara keseluruhan memiliki kecepatan linier yang rendah. *Partial* halo CME (phCME) dengan lebar 120° terjadi pada 20 Agustus 2018 dan memiliki profil kecepatan linier yang rendah meskipun tampak mengalami percepatan. Setidaknya CME ini merupakan kandidat terbaik yang dapat menyebabkan badai geomagnetik karena dua hal; lebar sudut bukaan dan posisinya yang dekat dengan ekuator Matahari.

Semua CME pada Tabel 1 berada di dekat ekuator Matahari, kecuali yang terjadi pada tanggal 22 Agustus dan 24 Agustus (04:17:37 UT). Sementara, CME 21 Agustus, selain sudut bukannya yang kecil dan mengalami perlambatan, kecepatannya sudah tidak terdeteksi pada jarak 20 kali jari-jari Matahari atau $\sim 2 \times 10^{15}$ km dari Bumi, sehingga tidak mungkin mencapai Bumi dan memberi gangguan pada aktivitas geomagnet. Secara statistik, 68% CME yang menyebabkan badai geomagnetik kuat pada siklus Matahari ke-23 adalah *full* halo CME (lebar sudut bukaan = 360°), persentase ini bertambah menjadi 92% jika phCME (lebar sudut bukaan $\geq 120^\circ$) disertakan dan sisanya memiliki rata-rata lebar sudut bukaan $\sim 88,7^\circ$ [17]. Dalam penelitian ini batas lebar sudut bukaan minimum yang digunakan adalah 60° [18]. Dengan demikian penelitian ini akan difokuskan pada phCME 20 Agustus (selanjutnya disebut phCME20).

Tabel 1. Ringkasan peristiwa CME menjelang badai geomagnetik kuat.

Tanggal	Jam (UT)	Posisi*	Sudut*	V_1^* (km/s)	V_2^* (km/s)	V_3^* (km/s)
20 Agustus 2018	00:12:05	244	18	230	279	404
20 Agustus 2018	21:24:05	252	120	126	216	363
21 Agustus 2018	11:24:05	251	18	221	172	0
22 Agustus 2018	04:00:06	133	8	249	261	486
24 Agustus 2018	00:12:05	265	50	229	446	722
24 Agustus 2018	04:17:37	87	46	56	105	290
24 Agustus 2018	16:12:05	274	35	221	275	406

Keterangan:

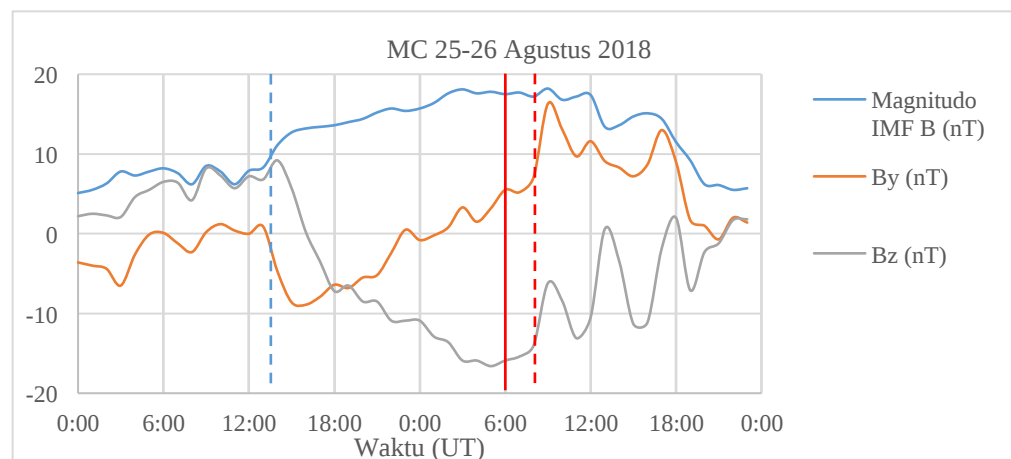
1. Posisi*: pusat sudut posisi (*central position angle*) dihitung berlawanan arah jarum jam dari arah utara Matahari,
2. Sudut*: lebar sudut bukaan (*angular width*),
3. V_1^* : kecepatan linier,
4. V_2^* : kecepatan pada tinggi maksimum,
5. V_3^* : kecepatan pada jarak 20 kali jari-jari Matahari.

Hasil dan Pembahasan

1. Sumber Badai Geomagnetik

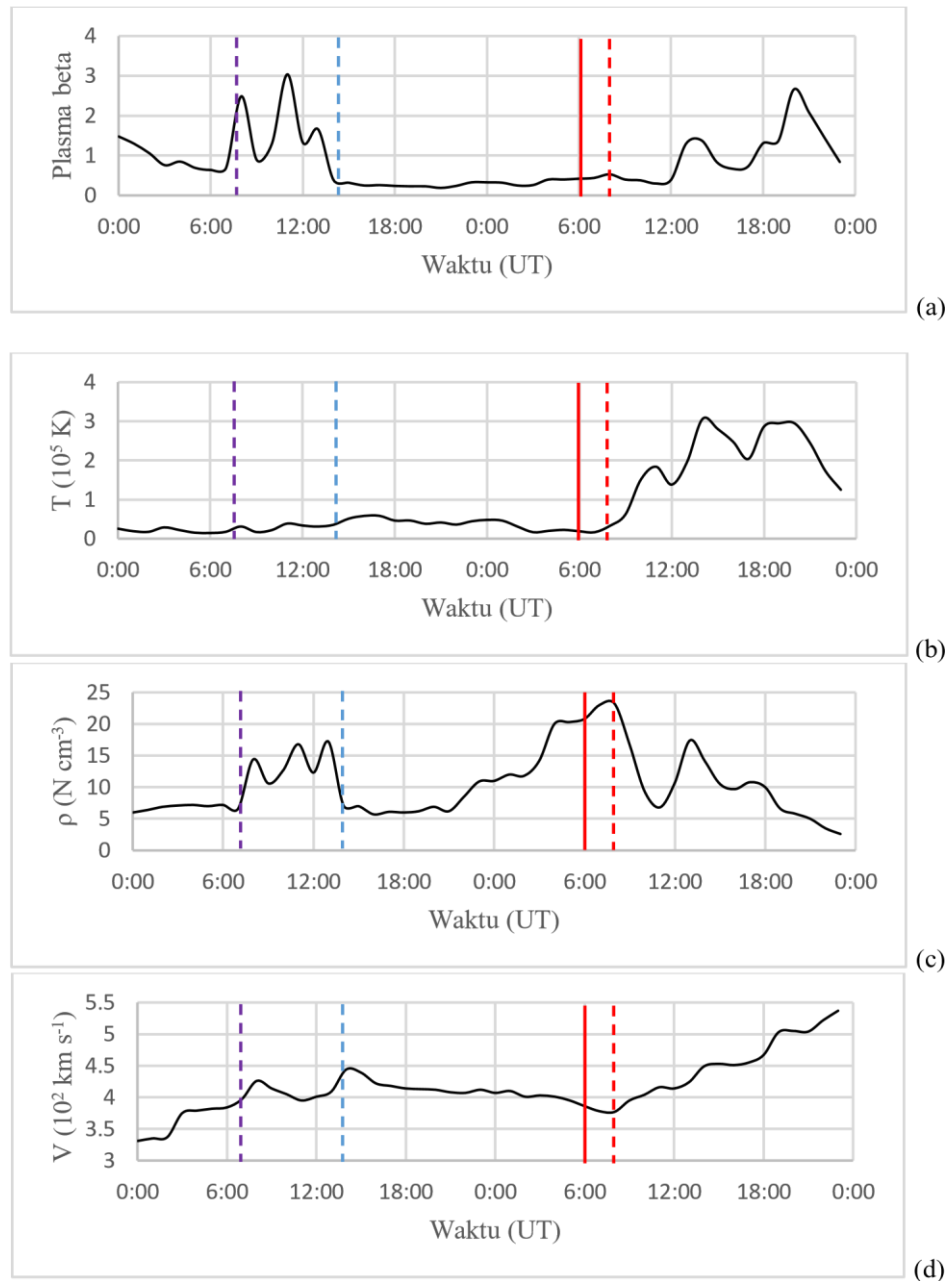
Badai geomagnetik kuat dapat disebabkan oleh kuatnya medan magnet Bz arah selatan di bawah -10 nT dan dengan durasi lebih dari 3 jam [19, 20]. Gambar 2 menunjukkan medan magnet Bz berotasi ke selatan setelah 14:00 UT 25 Agustus, setelah mencapai 9,2 nT. Rotasi

terus berlangsung hingga 05:00 UT 26 Agustus mencapai $-16,6$ nT. Selain itu, medan magnet Bz berada di bawah -10 nT selama 10 jam, sejak 22:00 UT 25 Agustus hingga 08:00 UT 26 Agustus. Kondisi ini lebih dari cukup untuk menyebabkan badai geomagnetik kuat. Ingatlah bahwa puncak badai geomagnetik kuat terjadi pada 06:00 UT 26 Agustus dengan puncak Dst -174 nT. Dengan demikian, jeda antara puncak Bz arah selatan dengan puncak indeks Dst adalah satu jam. Penundaan demikian selalu terjadi antara selang waktu 0-4 jam, dengan rata-rata waktu tunda 2 jam [21]. Penundaan ini disebabkan oleh pengamatan IMF yang dilakukan di L1, sementara indeks Dst diamati melalui observatorium-observatorium geomagnet di permukaan Bumi.



Gambar 2. Struktur MC (dibatasi 2 garis putus-putus warna biru), garis tegas warna merah (puncak Dst)

Struktur MC tampak jelas dari tingginya magnitudo IMF B dan rotasi medan magnet By yang lambat (Gambar 2), selain rendahnya plasma beta (Gambar 3a) pada rentang waktu 14:00 UT 25 Agustus sampai 08:00 UT 26 Agustus. IMF B berada di atas 10 nT lebih dari satu hari, sejak 14:00 UT 25 Agustus sampai 18:00 UT 26 Agustus. Dimulai bersamaan dengan permulaan rotasi medan magnet Bz. Nilai tertinggi magnitudo IMF B adalah 18,1 nT pada 03:00 UT 26 Agustus. Rotasi medan magnet By terjadi pada saat yang bersamaan dengan penurunan dan rotasi medan magnet Bz, juga penguatan magnitudo IMF B. Parameter terakhir yang menunjukkan struktur MC adalah plasma beta (Gambar 3a). Plasma beta bernilai lebih kecil dari 1 dalam durasi 22 jam. Dengan kata lain, tekanan magnetik lebih mendominasi dari pada tekanan gas. Dengan demikian, jelas bahwa badai geomagnetik kuat ini dipicu oleh MC. Tetapi di ujung MC, medan magnet By dan Bz berfluktuasi (2 jam setelah puncak Dst), hal ini bisa disebabkan oleh sumber gangguan lain dari Matahari, dapat berupa CIR atau ICME. Namun demikian, struktur ini tidak berpengaruh pada atau bukan penyebab badai geomagnetik kuat, karena tidak terdapat penurunan indeks Dst, bahkan badai geomagnetik memasuki fase pemulihan. Peningkatan rapat proton angin surya (Gambar 3c) tampak menjadi penyebab peningkatan temperatur plasma (Gambar 3b) dan fluktuasi medan magnet By dan Bz (Gambar 2) yang terjadi menjelang tengah hari 26 Agustus.

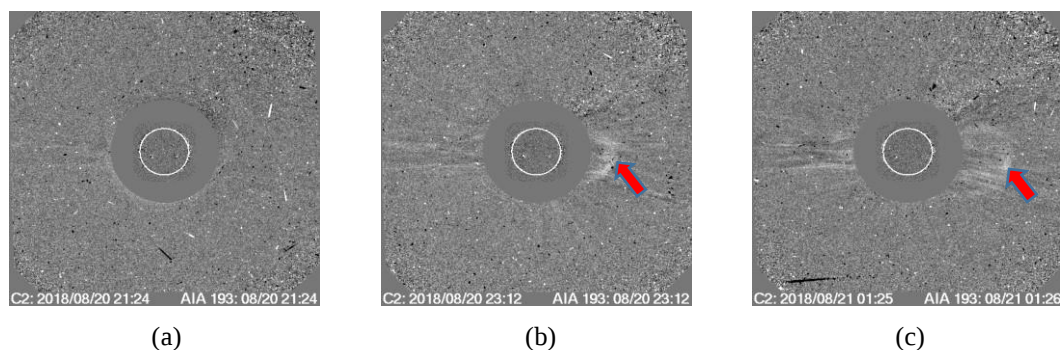


Gambar 3. Parameter plasma angin surya 25 Agustus (00:00 UT) – 27 Agustus (00:00 UT). Garis putus-putus warna ungu (waktu tibanya ICME), Garis putus-putus warna biru (SSC), Garis tegas warna merah (puncak badai geomagnetik). MC dibatasi oleh garis putus-putus warna biru dan merah. (a) Perbandingan tekanan gas dengan tekanan magnetik (plasma beta), (b) Temperatur plasma angin surya, (c) Rapat proton angin surya, dan (d) Kecepatan plasma angin surya

Gambar 3c menunjukkan telah terjadi dua kali peningkatan kerapatan proton angin surya. peningkatan rapat proton terakhir telah dipaparkan dan tidak memberi dampak pada gangguan geomagnet meskipun nilainya lebih tinggi dari peningkatan rapat proton pertama yang terjadi pada 08:00 UT 25 Agustus. Demikian halnya peningkatan temperatur plasma. Peningkatan rapat proton pertama merupakan pemicu SSC sekaligus menandai kedatangan ICME. Rapat proton lebih besar dari 10 N/cm^3 selama 5 jam dan puncaknya ($17,2 \text{ N/cm}^3$) terjadi tepat satu jam menjelang terbentuknya SSC dan MC. Peningkatan rapat proton berperan penting dan menjadi penyebab utama pada setiap SSC yang tidak didahului IPS [19]. Ketiadaan IPS dapat dilihat dari perubahan minor pada kecepatan plasma angin surya (Gambar 3d) dan hanya

mencapai 444 km/s (14:00 UT) pada 25 Agustus. Peningkatan rapat proton ini disebabkan oleh kompresi ICME – yang merupakan bagian dari phCME20 – terhadap plasma angin surya dan menyebabkan peningkatan indeks Dst pada saat SSC.

Interval waktu sejak phCME20 pertama kali terdeteksi oleh LASCO (Gambar 4a) hingga terdeteksi oleh wahana antariksa Wind melalui parameter plasma angin surya (Gambar 2 dan 3) adalah 4,44 hari. Interval ini jauh lebih singkat dibandingkan dengan jika hanya memperhitungkan kecepatan linier CME untuk memprediksi kedatangannya. Metode ini memang tidak selalu tepat untuk memprediksi kedatangan CME [11]. Terlebih, phCME20 memiliki kecepatan linier yang sangat rendah. Dengan kecepatan linier 126 km.s^{-1} , phCME20 memerlukan lebih dari 13 hari untuk mencapai titik L1, tempat di mana wahana antariksa Wind mengorbit. Di sisi lain, ICME ini mengalami percepatan di ruang antar planet hingga pada jarak 20 kali jari-jari Matahari sebagaimana yang tertera pada Tabel 1. Selanjutnya, sampai dimana percepatan ini berlangsung tidak diketahui, selain dari kecepatan plasma angin surya (Gambar 3d) yang hanya sedikit di atas kecepatan rata-rata angin surya (400 km.s^{-1}) dan tidak menimbulkan IPS. Gambar 4b dan 4c menunjukkan bahwa phCME20 terjadi dalam durasi yang lama, masih berlangsung pada 23:12 UT 25 Agustus dan 01:25 UT 26 Agustus. Mengapa phCME20 berlangsung dalam tempo lama yang menimbulkan pertanyaan, mengingat pada umumnya hanya berlangsung dalam orde puluhan menit [10].



Gambar 4. Citra phCME20 oleh LASCO. (a) saat pertama kali teramati (20/8/2018 21:24 UT), (b) 20/8/2018 23:12 UT, dan (c) 21/8/2018 01:25 UT. Panah merah menunjukkan asal phCME20

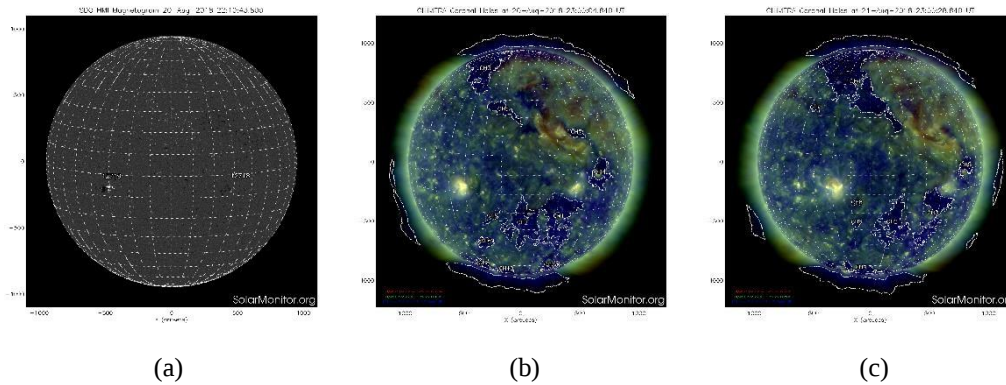
2. Aktivitas Matahari

Matahari menunjukkan aktivitas yang sangat lemah sejak phCME20 terjadi hingga SSC badai geomagnetik kuat ini terjadi pada 25 Agustus 2018. Hanya terdapat dua grup *sunspot* selama rentang waktu tersebut, NOAA 12718 dan 12719 (Gambar 5a). Selain itu, tidak teramati adanya *flare* di piringan Matahari. Fenomena erupatif lain yang memiliki potensi memberi gangguan geomagnetik adalah lubang korona, sebagai sumber HSS. Meskipun tidak ditemukan lubang korona trans-ekuatorial sebagai lubang korona dengan geoeftektivitas tertinggi. Geoeftektivitas lubang korona dari yang tertinggi ke terendah secara berurutan adalah lubang korona transekuatorial, lubang korona dengan polaritas negatif di belahan utara atau berpolaritas positif di belahan selatan Matahari, dan lubang korona dengan polaritas negatif di belahan selatan atau berpolaritas positif di belahan utara Matahari [22]. Selain dari keberadaan lubang korona di sekitar meridian Matahari ($\pm 30^\circ$), hal ini berlaku sama untuk geoeftektivitas *flare* dan CME [23].

Sebagain besar lubang korona yang teramati dipiringan Matahari merupakan lubang korona dengan geoeftektivitas terendah. Sementara lubang korona dengan tipe kedua yang ditemukan di antaranya berada pada posisi W32N20 (20 Agustus), W14S29, dan W58N02 (21 Agustus).

Citra lubang korona ditampilkan pada Gambar 5b dan 5c. Lubang-lubang korona ini mungkin berpengaruh pada peningkatan rapat proton, temperatur, dan kecepatan plasma angin

surya yang terjadi pada akhir MC dan fluktuasi medan magnet Bz dan By sebagaimana ditunjukkan Gambar 3 dan 4. Karena, struktur IMF dan plasma angin surya menunjukkan keberadaan CIR. Selain itu, HSS tampak jelas dari parameter kecepatan plasma angin surya (Gambar 4d). Tetapi, sebagaimana yang telah disampaikan di atas, struktur ini bukan merupakan penyebab badai geomagnetik kuat 26 Agustus 2018, karena terjadi setelah puncak badai geomagnetik kuat.



Gambar 5. Citra piringan Matahari. (a) NOAA 12718 dan 12719, (b) Lubang korona 20 Agustus, dan (c) Lubang korona 21 Agustus

Peristiwa-peristiwa besar yang pernah terjadi seperti *Quebec Power Outage* dan *Halloween Event*, atau *St. Patrick Solar Storm* yang merupakan badai geomagnetik terbesar pada siklus Matahari ke-24 selalu dipicu oleh CME yang berasal dari daerah yang sangat aktif di permukaan Matahari dan berasosiasi dengan *flare* kelas M atau X. Tetapi, badai geomagnetik kuat yang dipicu oleh *flare* atau CME juga sering terjadi [8]. Pada masa awal munculnya perhatian dan penelitian terhadap fenomena badai geomagnetik, *flare* merupakan fenomena eruptif yang diduga sebagai penyebabnya. Tetapi, belakangan dugaan ini bergeser pada CME. Memang, keterkaitan antara parameter IMF dan plasma angin surya dengan parameter geomagnetik lebih jelas dan terang daripada keterkaitan keduanya dengan fenomena eruptif di permukaan Matahari yang justru sebagai penyebab utama. Tabel 2 menunjukkan koefisien korelasi (r) masing-masing parameter IMF dan plasma angin surya dengan parameter geomagnetik (indeks Dst) dalam rentang waktu 2 hari (25-26 Agustus 2018). Sebagaimana penelitian-penelitian sebelumnya [16,18], medan magnet Bz memegang peranan penting atau berkorelasi positif ($r = 0,79$) terhadap terjadinya peristiwa badai geomagnetik 25-26 Agustus 2018. Sementara medan magnetik By dan magnitudo IMF B berkorelasi negatif, $r = -0,72$ dan $r = -0,69$. Selain itu, korelasi yang sangat lemah ditunjukkan kecepatan plasma angin surya ($r = -0,13$).

Tabel 2. Koefisien korelasi parameter IMF dan plasma angin surya dengan parameter geomagnetik (indeks Dst) 25-26 Agustus 2018

No	Parameter	Koefisien korelasi (r)
1	Medan magnet Bz	0.79
2	Medan magnet By	-0.72
3	Magnitudo IMF B	-0.69
4	Plasma beta	0.26
5	Kecepatan plasma V	-0.13
6	Temperatur Plasma T	-0.33
7	Rapat proton ρ	-0.53

Kesimpulan dan Saran

Kami telah menemukan bahwa penyebab badai geomagnetik kuat 26 Agustus 2018 adalah MC (dengan kata lain ICME) yang bersumber dari phCME20 dan korelasi positif antara medan magnet Bz dengan indeks Dst. Korelasi ini menunjukkan bahwa medan magnet Bz arah selatan merupakan pemicu badai geomagnetik kuat yang utama. Korelasi negatif ditunjukkan oleh medan magnet By dan magnitudo IMF B, namun masih perlu diuji lebih lanjut dengan lebih banyak data. Penelitian lebih lanjut diperlukan dalam hal hubungan antara parameter CME (kecepatan, lebar sudut bukaan, posisi, dan parameter lain) dengan parameter IMF dan plasma angin surya. Untuk kepentingan prediksi cuaca antariksa, badai geomagnetik kuat 26 Agustus 2018 menunjukkan bahwa meskipun Matahari dalam fase minimum, gangguan geomagnetik masih mungkin terjadi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan Kementerian Keuangan Republik Indonesia yang telah memberikan kesempatan dan membiayai studi penulis di Program Magister Astronomi Institut Teknologi Bandung.

Daftar Rujukan

- [1] W.H. Barlow, "On the Spontaneous Electrical Currents Observed in the Wires of the Electric Telegraph," *Phil. Trans. R. Soc.*, vol. 61A, pp. 61-72, Jan. 1849.
- [2] B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, G.S. Lakhina, and S. Alex, "The Extreme Magnetic Storm of 1–2 September 1859," *J. Geophys. Res.*, vol. 108, no. A7, 1268, pp. 1-8, Jul. 2003.
- [3] C.A. Loewe and G.W. Prölss, "Classification and Mean Behaviour of Magnetic Storms," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. 14, pp. 209-213, Jan. 1997.
- [4] M. Sugiura and T. Kamei, "Equatorial Dst Index 1957-1986" *IAGA Bull.* 40. IUGG, Paris, pp. 1-9, 1991.
- [5] S. Singh, A.C. Panday, K. Singh, and A.P. Mishra, "Effect of Geomagnetic Storms and Their Association with Solar Wind Velocity and IMF During Solar Cycle 23 and 24," *International Journal of Pure and Applied Phys.*, vol. 13, no. 1, pp. 35-43, 2017.
- [6] M. Moldwin. *An Introduction to Space Weather*, Cambridge University Press: Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, 2008, pp. 59-60.
- [7] I.G. Richardson, and H.V. Cane, "Solar Wind Drivers of Geomagnetic Storms during More than Four Solar Cycles," *J. Space Weather Space Clim.* Vol. 02, no. A01, May. 2012.
- [8] J. Zhang, I.G. Richardson, D.F. Webb, N. Gopalswamy, E. Huttunen, J.C. Kasper, N.V. Nitta, W. Poomvises, B.J. Thompson, C.C. Wu, S. Yashiro, and A.N. Zhukov, "Solar and Interplanetary Sources of Major Geomagnetic Storms ($Dst \leq -100$ nT) During 1996–2005," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, no. A10102, Oct. 2007.
- [9] E. Echer, W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, and A. L. C. Gonzalez, "Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms (Dst 100 nT) during solar cycle 23 (1996–2006)" *J. Geophys. Res.*, vol. 113, no. A05221, May. 2008.
- [10] T. H. Zurbuchen, M. Weberg, R. von Steiger, R. A. Mewaldt, S. T. Lepri, and S. K. Antiochos, "Composition of Coronal Mass Ejections," *The Astrophysical J.*, vol. 826, no. 10, pp. 1-8, Jul. 2016.
- [11] C.C. Wu, K. Liao, R.P. Lepping, and L. Huttig, "The 04 – 10 September 2017 Sun–Earth Connection Events: Solar Flares, Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds, and Geomagnetic Storms," *Solar Phys.*, vol. 294, no. 110, pp. 1-19, Aug. 2019.
- [12] T.H. Zurbuchen and I.G. Richardson, "In-Situ Solar Wind and Magnetic Field Signatures of Interplanetary Coronal Mass Ejections," *Space Science Rev.*, vol. 21, pp. 31-43, May. 2005.
- [13] D.J. McManus, H.H. Carr, and B.M. Adams, "Global Telecommunications Security: Effects of Geomagnetic Disturbances," *International J. of Interactive Mobile Tech.*, vol. 5, no. 3, pp. 6-11, Jul. 2011.
- [14] C. Cid, J. Palacios, E. Saiz, A. Guerrero, and Y. Cerrato, "On Extreme Geomagnetic Storms," *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 4, no. A28, pp. 1-10, Sep. 2014.
- [15] J.H. King and N.E. Papitashvili, "Solar Wind Spatial Scales in Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data," *J. Geophys. Res.*, vol. 110, no. A02104, Feb. 2005.
- [16] N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, and R. Howard, "The SOHO/LASCO CME Catalog," *Earth Moon and Planets*, vol. 104, no. 1-4, pp. 295-313, Jan. 2009.

- [17] N. Gopalswamy. CME link to the geomagnetic storms Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets Proceedings IAU Symposium No. 264, A. H. Andrei, A. Kosovichev & J.-P. Rozelot, eds, 2009.
- [18] Y. Li, J.G. Luhmann, and B.J. Lynch, "Magnetic Clouds: Solar Cycle Dependence, Sources, and Geomagnetic Impacts," *Solar Phys.*, vol. 293, no. 135, Oct. 2018.
- [19] W.D. Gonzalez and B.T Tsurutani, "Criteria of Interplanetary Parameters Causing Intense Geomagnetic Storms ($Dst < -100$ nT)," *Planetary and Space Sci.*, vol. 35, no. 9, pp. 1101-1109, 1987.
- [20] V. Yurchyshyn, H. Wang, and V. Abramenko, "Correlation between Speeds of Coronal Mass Ejections and the Intensity of Geomagnetic Storms" *Space Weather*, vol. 2, no. S02001, Feb. 2004.
- [21] W.D. Gonzalez and E. Echer, "A study on the Peak Dst and Peak Negative Bz Relationship during Intense Geomagnetic Storms," *Geophysical Research Let.*, vol. 32, no.18, Sep. 2005.
- [22] Abunina, M., Abunin, A., Belov, A., Gaidash, S., Tassev, Y., Velinov, P.I.Y., Mateev, L., and Tonev, P. "Properties of Magnetic Fields in Coronal Holes and Geoeffective Disturbances in Solar Cycle 24, *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sci.*, vol. 67, no. 5, pp. 699-704, Jan. 2014.
- [23] S. Bravo and X. Blanco-Cano, "Signatures of Interplanetary Transients behind Shocks and Their Associated Near-surface Solar Activity," *Ann. Geophysicae*, vol. 16, no. 4, pp. 359-369, Apr. 1998.