

Bab VI

Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi

Siska Filawati, Mira Juangsih, Visca Wellyanita,
Setyanto Cahyo Pranoto, Anwar Santoso, Elvina Ayu
Ratnasari, Rizal Suryana, dan La Ode Muhammad Musafar

A. Medan Magnet Bumi dan Strukturnya Sebagai Akibat Distorsi Matahari

Bumi telah berusia 4,5 miliar tahun. Sebuah angka fantastis dibanding usia kehidupan awal manusia yang dimulai 150.000 tahun yang lalu apalagi usia rata-rata manusia yang berkisar 72 tahun. Lantas sebelum manusia bagaimakah Bumi? Apakah Bumi telah seperti ini sejak tercipta?

Bumi merupakan salah satu planet dalam tata surya dengan pusat yang kita sebut dengan ‘Matahari’. Pada usia 0, Bumi terus berkemelut pada kondisi panas-mendingin, tabrakan, guncangan, tempat yang tak semestinya dihuni. Proses-proses pembentukan ini menjadikan Bumi seperti sekarang, layak dihuni oleh ribuan spesies termasuk kita, manusia.

S. Filawati*, M. Juangsih, V. Wellyanita, S. C. Pranoto, A. Santoso, E. A. Ratnasari, R. Suryana & L. O. M. Musafar

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail:* sisk005@brin.go.id

© 2025 Editor & Penulis

Filawati, S., Juangsih, M., Wellyanita, V., Pranoto, S. C., Santoso, A., Ratnasari, E. A., Suryana, R., & Musafar, L. O. M. Medan Magnet Bumi dan Peranannya Melindungi Bumi. Dalam T. Djamaruddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (181–221). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1489 E-ISBN: 978-602-6303-86-8

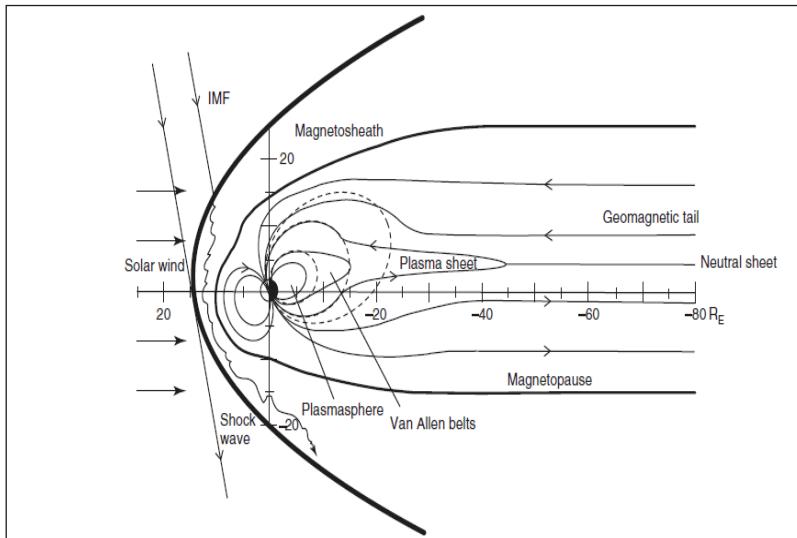
Sekitar 1 miliar tahun yang lalu, inti Bumi terbentuk (CWRU, 2024). Banyak teori menyebut bahwa asal mula inti Bumi berasal dari pendinginan partikel yang mencair oleh akumulasi panas dari elemen radioaktif, tetapi setelah proses tersebut jumlah material radioaktif menurun yang mengakibatkan partikel memadat (Urry, 1949; Jacobs, 1953). Material dengan densitas rendah terpisahkan ketika pemanasan berlangsung lambat, hal ini mengakibatkan inti Bumi terbagi menjadi dua lapisan, yaitu inti Bumi dalam yang padat dan inti Bumi luar yang cair. Saat inti dalam mengkristal dan inti luar mendingin, material yang terlarut dan tersuspensi akan mengendap (Anderson, 2002). Teori dan eksperimen tentang proses pembentukan inti Bumi masih dibahas secara mendalam hingga kini. Berdasarkan survei seismik, diketahui bahwa atom penyusun inti Bumi adalah besi dan nikel (Anderson, 2002; Jacobs, 1953). Besi dan nikel merupakan bahan ferromagnetik yang memiliki sifat kemagnetan kuat, baik sifat untuk menyimpan maupun berinteraksi untuk memproduksi kemagnetan. Interaksi besi dan nikel dengan elektron dan ion atom lain di inti Bumi menjadi sumber medan magnet Bumi. Sementara itu, magnet memiliki arah dan polaritas, serta besar dan intensitas, dalam istilah lain, medan magnet adalah vektor.

Medan magnet Bumi berbentuk polar memiliki polaritas positif (Utara) dan negatif (Selatan) bergerak dari positif ke negatif. Kutub utara magnet Bumi terletak $11,5^\circ$ dari kutub utara geografis Bumi. Selaras dengan kutub Selatan, magnet Bumi di belahan selatan geografis Bumi. Medan magnet Bumi memiliki besar yang berbeda bergantung pada jarak terhadap pusat Bumi dan sudut lintang. Oleh karena itu, besar medan magnet berbeda bergantung lokasi. Untuk menentukan besar medan magnet dilakukan pengukuran pada tiap wilayah, sedangkan pemodelan medan magnet menggunakan perhitungan *spherical harmonics* yang diturunkan dari persamaan Maxwell. Perhitungan tersebut dilakukan secara berkala setiap 5 tahun dengan menggunakan data satelit, stasiun landas Bumi, dan survei geomagnet yang dilakukan di seluruh dunia. Oleh karena itu,

dengan pengamatan medan magnet Bumi yang tersebar di seluruh dunia, nilai pengamatan di lokasi berbeda menjadi titik acuan terhadap perubahan medan magnet Bumi dan bagaimana memprediksinya untuk periode tertentu di masa depan. Perubahan medan magnet Bumi seperti melemahnya medan magnet Bumi dapat merubah seluruh proses fisis kemagnetan yang berkaitan dengan arah dan navigasi modern, sistem kelistrikan, sistem satelit, keselamatan astronot, dan interaksi Matahari-Bumi yang merupakan indikasi cuaca antariksa (Risk Frontiers, 2024). Apakah suatu saat medan magnet Bumi akan berbalik arah? Jawaban dan penjelasan ini akan dijabarkan secara rinci pada subbab lain dalam buku ini.

Bumi bukan pemeran tunggal dalam pembentukan medan magnet. Ada Matahari, sebagai pusat tata surya dan sebagai bintang penjaga planet tetap pada posisinya. Matahari merupakan plasma yang melepaskan energi elektromagnetik sepanjang waktu, disebut juga sebagai angin matahari (*solar wind*). Akibat interaksi dengan angin matahari, magnetosfer bumi menjadi terdistorsi, bagian magnetosfer yang menghadap Matahari terkompresi mampat menuju Bumi dan berbentuk ekor di bagian malam dengan panjang mencapai ratusan R_E (R_E adalah jari-jari Bumi sebesar 6387 km), serta berakibat pula pada pembentukan struktur medan magnet Bumi yang memiliki fungsi tertentu (Wanget al et al., 2023). Interaksi angin matahari dan medan magnet Bumi membentuk magnetosfer bumi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1.

Angin matahari merupakan plasma yang didominasi oleh ion H^+ dan He^{++} dan dapat diukur dengan empat variabel utama yaitu densitas, kecepatan, temperatur, dan medan magnet. Dalam kondisi Matahari tenang, angin matahari memiliki densitas $\sim 5/cm^3$, kecepatan 400 km/detik, temperatur 10^5 K dan medan magnet ± 5 nT (Kallenrode, 2004). Namun, saat kondisi Matahari meningkat, nilai-nilai tersebut dapat meningkat dan dapat menimbulkan gangguan badai geomagnet.



Keterangan: Sumbu x dan y direpresentasikan dengan jari-jari Bumi dalam R_E
 Sumber: Parks (2003)

Gambar 6.1 Sketsa Magnetosfer pada sisi siang (kiri) dan malam (kanan)

Gambar 6.1 menunjukkan bahwa bagian siang berjarak hingga $15 R_E$ sedangkan bagian malam hingga ratusan R_E , disebut juga dengan magnetotail. Awalnya, interaksi angin matahari dan magnetosfer membentuk susunan magnetosfer luar, yaitu *bow shock* dan *magnetopause*. Aktivitas dari fenomena yang terjadi di Matahari akan mengakibatkan terjadinya transmisi energi menuju magnetosfer Bumi yang sebanding dengan kecepatan angin matahari dan juga dipengaruhi oleh orientasi dari medan magnet antar-planet (*Interplanetary Magnetic Field/IMF*) (Dungey, 1961). Aliran angin matahari bergerak dari permukaan Matahari dengan kecepatan supersonik dan berinteraksi dengan medan magnet Bumi mengakibatkan terjadinya gelombang kejut (*shock wave*) dan dikenal sebagai *bow shock* (Borovsky & Vladiva, 2018). Proses yang terjadi di *bow shock* dapat menentukan proses selanjutnya angin matahari dapat menembus atau diblokkan oleh lapisan magnetosfer (Eastwood, et al., 2017;

Mejnertsen, et al., 2018). Analisis terhadap *bow shock* cukup penting untuk mengetahui dinamika magnetosfer. Lapisan berikutnya adalah *magnetopause* yang memiliki jarak sekitar $11 R_E$ (Farfield, 1971). *Magnetopause* merupakan tempat yang memiliki keseimbangan tekanan antara angin matahari dan medan magnet Bumi. Oleh karena itu, pada lapisan ini, sebagian angin matahari dapat dibelokkan dan berpenetrasi ke lapisan yang lebih dalam. Penetrasi angin matahari bergantung pada kondisi arah IMF. Jika IMF bernilai positif atau sama dengan arah medan magnet Bumi yang bergerak dari kutub magnet selatan ke kutub magnet utara, angin Matahari akan diarahkan ke kutub magnet utara. Sementara itu, jika IMF bernilai negatif yaitu memiliki arah berlawanan dengan medan magnet Bumi, akan terjadi rekoneksi. Rekoneksi adalah proses energi magnet diubah menjadi energi plasma (Lopez, 1990). Proses keseimbangan di *magnetopause* membuat *magnetopause* dapat mampat dan mengembang, sehingga lapisan yang lebih dalam juga mengalami hal yang sama (Kallenrode, 2004; Borovsky & Vladiva, 2018).

Magnetosfer dalam terdiri dari tiga populasi partikel bermuatan dan terperangkap dalam medan magnet Bumi. Partikel-partikel ini bergerak dalam gerakan melingkar atau berputar di sekitar garis medan. *Magnetosfer* bagian dalam terdiri dari:

- 1) *Plasmasphere*; memiliki garis-garis medan magnet tertutup yang terdiri dari partikel berenergi rendah yang bergerak dari ionosfer. Lapisan ini dipengaruhi oleh waktu terbit-tenggelam Matahari karena berotasi bersama dengan Bumi ke arah timur. Rotasi medan magnet Bumi ke arah timur bersama dengan pengisian ion dan elektron di sisi siang *plasmasphere* yang berasal dari ionosfer sehingga menghasilkan torus plasma dingin (Singh et al., 2011). Plasma terdiri dari ion H^+ , He^+ , O^+ , O^{++} , D^{++} , N^+ , N^{++} , dan ion lain dengan persentase lebih rendah. Ion dalam *plasmasphere* berubah formasi saat terjadi badai geomagnet, rasio O^+/H^+ naik menjadi 100%, sedangkan diketahui bahwa O^+ dapat berinteraksi dengan lapisan atmosfer sehingga memunculkan aurora. *Plasmasphere* dapat digunakan untuk mempelajari medan listrik magnetosfer

karena konveksi medan listrik dengan skala besar berada di *plasmapause* (Ebihara & Miyoshi, 2009).

- 2) *Plasmashheet*; memiliki plasma dengan densitas rendah, terdiri dari ion dan elektron yang berasal dari angin matahari, dan bergerak ke barat dan timur. Proses fisis *plasmashheet* ion dan elektron berbeda, ion dalam *plasmashheet* bergerak dari *magnetotail* di sisi malam ke kutub magnet dengan aliran yang menyimpang dari pola konveksi medan magnet dan akan terjebak di kutub magnet sehingga aliran ion tersebut mengalami kenaikan densitas dan temperatur yang dapat mengakibatkan *Kelvin-Helmholtz Instability*. Sementara itu, elektron dalam *plasmashheet* bergerak mengikuti medan magnet di kutub magnet dan menuju *magnetopause* sisi siang yang mengakibatkan *pitch angle* menurun sehingga terjadi presipitasi elektron ke atmosfer. Peningkatan energi *drift ion* dan elektron yang bergerak ke barat dan timur membentuk arus cincin di bidang ekliptika Bumi (Borovsky & Vladiva, 2018). Dengan meningkatnya arus cincin, medan magnet menjadi Bumi menujun, yang merupakan indikasi adanya badai geomagnet yang akan dijelaskan pada subbab berikutnya (Lakhina et al., 2006);
- 3) Sabuk Radiasi Van Allen; terdiri dari partikel berenergi tinggi yang terperangkap di dua wilayah, yaitu sabuk radiasi bagian luar yang didominasi oleh elektron sehingga wilayah ini disebut sebagai sabuk radiasi elektron dan sabuk radiasi dalam yang didominasi oleh proton dan neutron (Li & Temerin, 2001). Sabuk radiasi elektron terbentuk sebagai akibat interaksi dengan angin matahari sehingga pengamatan sabuk radiasi elektron sangat diperlukan dalam prediksi cuaca antariksa. Sabuk radiasi elektron merupakan salah satu parameter untuk mengetahui kondisi cuaca antariksa. Sabuk radiasi elektron akan mengalami penurunan fluks saat terjadi badai geomagnet. Hal ini dikarenakan lapisan sabuk radiasi elektron bergerak mendekati Bumi sehingga seolah-olah fluks turun. Namun, sekitar 2 hingga 3 hari setelah badai geomagnet, fluks elektron energi tinggi meningkat dan mengakibatkan gang-

guan pada satelit karena elektron berpenetrasi ke komponen satelit dan menghasilkan penumpukan muatan di dalam material satelit (Filawati, 2018). Sabuk radiasi ion didominasi oleh proton dan neutron yang bersumber dari interaksi radiasi kosmik dengan atmosfer Bumi (Parks, 2003; Kallenrode, 2004). Partikel-partikel ini bergerak sepanjang garis medan menuju kutub kemudian dipantulkan kembali ke arah ekuator, sehingga menimbulkan gerakan memantul. Sabuk radiasi elektron dan ion bergerak dengan kecepatan dan medan magnet tertentu mengikuti mengikuti garis medan menuju kutub dan masuk ke atmosfer bagian atas (NASA, 2024a). Sabuk radiasi ion berubah seiring dengan perubahan medan magnet. Saat terjadi badai geomagnet, intensitas proton naik 10 kali lipat sehingga mengakibatkan lapisan sabuk radiasi ion mampat dan berinteraksi dengan lapisan di ketinggian yang lebih rendah sehingga dapat memengaruhi proses fisis lainnya (Ebihara & Miyoshi, 2009). Magnetosfer bagian dalam merupakan poin kunci untuk mempelajari hubungan dan keterkaitan Magnetosfer-Ionosfer.

Pada lintang tinggi, garis medan yang terbuka dan menyapu bagian malam medan magnet disebut *magnetotail*. *Magnetotail* dapat memanjang hingga ratusan R_E . Medan magnet *magnetotail* berasal dari plasma yang terkonveksi dari kutub magnet yang menjalar ke *plasmashell* di bagian malam. *Plasmashell* merupakan tempat terjadinya rekoneksi yang akan mengarahkan energi plasma menuju ke kutub magnet Bumi yang dapat menimbulkan aurora. Rekoneksi tersebut disebut sebagai ‘*substorm*’. *Magnetotail* memiliki dinamika yang berbeda dengan magnetosfer pada sisi siang.

Pengamatan magnetosfer Bumi perlu dilakukan secara kontinu, mengingat dinamika magnetosfer yang bergantung pada lokasi, waktu, serta rotasi dan revolusi Bumi. Pengamatan dapat dilakukan dengan menggunakan instrumen landas Bumi dan landas antariksa yang masing-masing memiliki karakteristik tertentu sehingga pengamatannya dapat saling mendukung serta kolaborasi antar negara sangat diperlukan. Pada subbab berikutnya akan dijelaskan fungsi vital

magnetosfer Bumi dalam mengantisipasi dampak aktivitas Matahari terhadap kelangsungan kehidupan di Bumi dan teknologi antariksa, pengamatan magnetosfer Bumi landas Bumi dan antariksa, serta riset magnetosfer ke depan.

B. Badai Geomagnet

Aktivitas geomagnet terjadi akibat proses fisis di daerah magnetosfer Bumi. Penyebab umum dari munculnya fenomena geomagnet adalah aliran energi dari Matahari ke Bumi melalui angin Matahari. Angin Matahari tersebut berinteraksi dengan magnetosfer dan terkadang menyebabkan gangguan geomagnet, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.2. Gangguan geomagnet yang tinggi menyebabkan badai geomagnet.

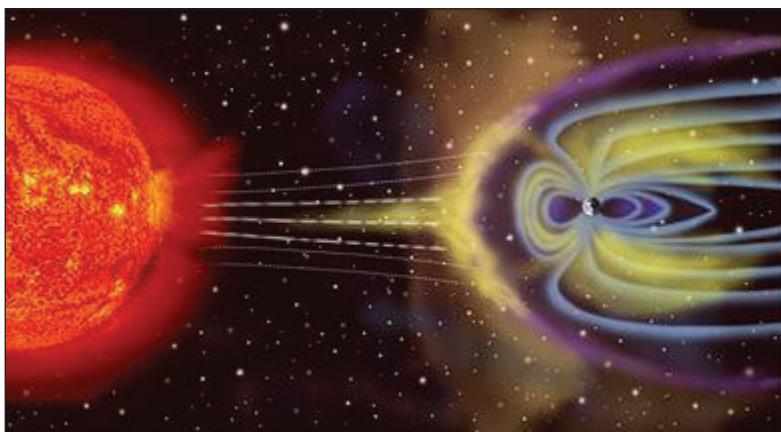
Badai geomagnet merupakan gangguan pada medan magnet Bumi yang timbul akibat adanya gangguan pada IMF dan angin matahari. Badai geomagnet secara umum terjadi karena adanya kondisi tidak normal di medium antarplanet yang dikenali dari perubahan pada IMF dan emisi angin matahari yang disebabkan oleh berbagai macam aktivitas Matahari. Aktivitas yang menyebabkan badai geomagnet di antaranya yaitu aliran angin matahari berkecepatan tinggi (*High Speed Stream/HSS*), *Co-rotating Interaction Region* (CIR), dan lontaran massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*) (Gonzales, 1994).

Sebenarnya ada tiga peristiwa badai matahari yang berpengaruh terhadap medan magnet atau lingkungan antariksa Bumi yaitu flare, CME, dan lubang korona. Peristiwa CME dan flare bisa mempercepat laju partikel walaupun flare itu sendiri tidak secara langsung memengaruhi medan magnet tetapi partikel yang dipercepat dalam mekanisme flare memengaruhi waktu tibanya partikel ke Bumi. Pada umumnya flare mempercepat ion yang biasanya dalam bentuk proton. Besaran energi yang dihasilkannya bisa mencapai ratusan MeV dan peristiwa ini disebut SEP (Solar Energetic Particle). Terdapat dua paradigma peristiwa SEP, yaitu gradual SEP yang diakibatkan oleh gelombang kejut akibat CME di ruang antarplanet dan impulsif SEP yang diakibatkan oleh flare matahari tanpa CME (Desai & Giacalone, 2016).

Lontaran massa korona di ruang antarplanet (ICME) membawa partikel yang sangat besar dan menjauhi matahari dengan kecepatan yang dapat mencapai 1.000 km/detik. Jika lontaran massa korona itu berarah ke Bumi, akan terjadi badi geomagnet yang bisa mengakibatkan terganggunya satelit, sinyal GPS, bahkan hingga terganggunya komunikasi radio dan merusak jaringan listrik di permukaan Bumi.

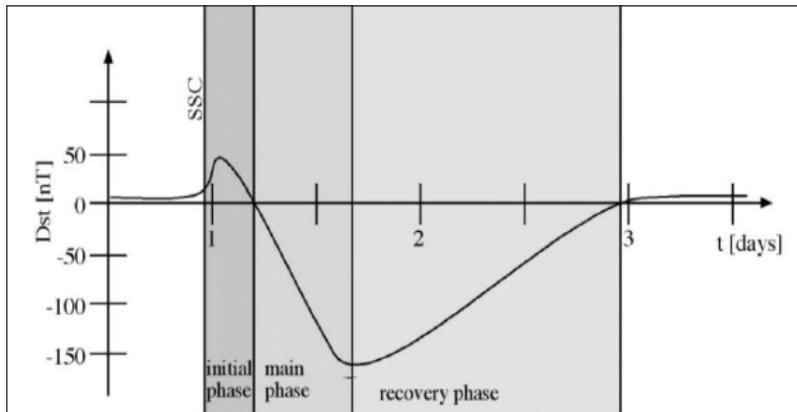
Gangguan geomagnet didorong oleh interaksi angin matahari dengan magnetosfer dan kekuatan interaksi ini tergantung dari parameter angin Matahari. Studi tentang gangguan medan magnet penting dalam memahami dinamika lingkungan Matahari-Bumi. Lebih dari itu, studi ini juga penting karena badi geomagnet dapat menyebabkan gangguan pada jaringan listrik, kerusakan satelit, gangguan komunikasi, dan masalah navigasi (Rathore, 2012). Gonzalez et al. (1994) dan Bakare & Chukwuma (2010) menjelaskan bahwa badi geomagnet memainkan peran penting dalam cuaca antariksa dengan mentransfer energi dari angin Matahari ke magnetosfer yang mengakibatkan peningkatan partikel bermuatan.

Pada kejadian badi geomagnet terdapat 3 fase, yaitu fase awal (*initial phase*), fase utama (*main phase*), dan fase pemulihan (*recovery phase*). Ketika fase awal, terjadi peningkatan Dst antara 20–50 nT,



Sumber: NASA (2024b)

Gambar 6.2 Ilustrasi Angin Matahari sampai ke Medan Magnet Bumi



Sumber: Kasran et al. (2018)

Gambar 6.3 Fase Badai Geomagnet

kemudian masuk fase utama ditandai dengan menurunnya indeks Dst. Fase pemulihan dimulai ketika indeks Dst mulai naik sampai ke kondisi normal (Kasran et al., 2018). Pada kejadian badai geomagnet terdapat 3 fase, yaitu fase awal (*initial phase*), fase utama (*main phase*), dan fase pemulihan (*recovery phase*), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.3.

Parameter untuk memonitor tingkat badai geomagnet di antaranya yaitu:

1. Indeks Dst

Indeks Dst merupakan rata-rata komponen horizontal medan magnet dari 4 stasiun pengamatan di daerah lintang rendah, yaitu Hermanus (HER), Honolulu (HON), Kakioka (KAK), dan San Juan (SJG). Semakin negatif, maka kondisi geomagnet semakin terganggu.

2. Indeks AE

Indeks AE pertama kali diperkenalkan oleh Davis dan Sugiura pada tahun 1966 sebagai ukuran aktivitas elektrojet global di zona aurora yang dihasilkan oleh peningkatan arus ionosfer yang mengalir di bawah dan di dalam daerah aurora. Indeks AE adalah rentang total deviasi dari nilai hari tenang medan magnet hori-

zontal (H) yang berasal dari 12 stasiun. AE sangat berguna dalam studi morfologi *substorm*, satelit komunikasi, propagasi radio, sinyal radio, dan hubungan antara medan magnet antarplanet dan magnetosfer Bumi.

3. Indeks K

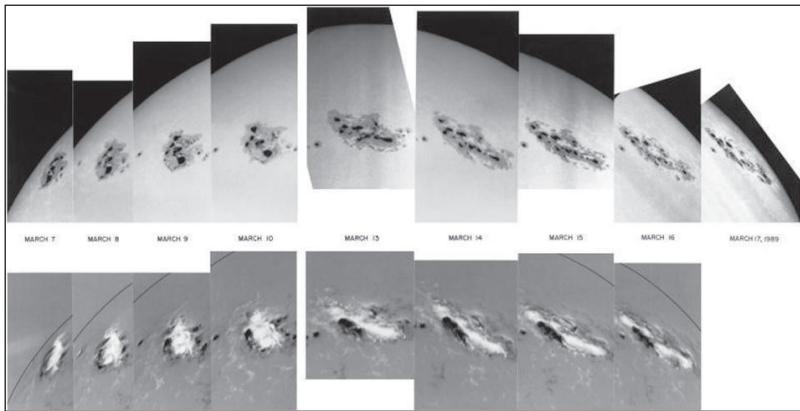
Indeks K adalah pengukuran aktivitas geomagnet dengan periode 3 jam-an dari data komponen H yang diperkenalkan oleh J.Bartels pada tahun 1939. Indeks K dilambangkan dengan bilangan bulat dari 0-9. Indeks K 0 - 4 menunjukkan kondisi geomagnet tenang dan lebih dari 5 menunjukkan aktivitas geomagnet pada tingkat badai geomagnet.

4. Indeks Kp

Indeks Kp adalah rata-rata tingkat gangguan geomagnet dalam interval 3 jam-an yang diperoleh dari 13 stasiun pengamatan di lintang menengah.

Beberapa contoh badai geomagnet besar yang pernah terjadi, adalah sebagai berikut.

1. Badai geomagnet yang terjadi pada tanggal 13 Maret 1989, berdampak pada terjadinya pemadaman saluran listrik di Kanada bagian Timur (Kappenman & Albertson, 1990), terganggunya sistem satelit, dan juga berkontribusi terhadap karat dan korosi pada pipa minyak dan gas. Dua CME dengan kecepatan yang sangat tinggi menabrak Bumi, mengakibatkan terjadinya *Storm Sudden Commencement* (SSC) (Allen, et al., 1989; Fujii, et al., 1992) dan menghasilkan aurora yang sangat indah, langit tampak sangat bercahaya di belahan Bumi bagian utara. Badai ini berasal dari daerah aktif NOAA5395 yang berada pada daerah piringan matahari tampak pada Gambar 6.3. Selama itu dia menghasilkan 11 *flare* kelas X dengan *flare* terbesar X15 pada tanggal 6 Maret dan *flare* X6.5 pada tanggal 17 Maret. Walaupun *flare* terbesarnya adalah kelas X15, akan tetapi yang berdampak adalah *flare* X4.5 pada tanggal 10 Maret dan *flare* X7.3 pada tanggal 12 Maret yang berasosiasi dengan adanya CME (Boteler, 2019). SSC akibat



Sumber: Boteler (2019)

Gambar 6.4 Perjalanan *Sunspot 5395* Melintasi Permukaan Matahari antara Tanggal 7 dan 17 Maret 1989

gelombang kejut dari CME antar planet tersebut terjadi pada jam 01.27 UT dan yang kedua terjadi pada 07.43 UT tanggal 13 Maret. Kecepatan angin Matahari pada saat itu 980 km/detik dan medan magnet antarplanet arah Utara-Selatan (B_z) bernilai -50 nT, akibatnya nilai Dst mencapai nilai -589nT dan indeks Kp mencapai 9+.

2. Badai geomagnet 30 Oktober 2003, mengakibatkan terjadinya gangguan aliran listrik di Swedia bagian selatan. Badai geomagnet ini dikenal sebagai Halloween Storm, pada saat itu indeks Dst turun berkisar -180 nT pada peristiwa SSC pertama. Sesaat setelah IMF B_z kembali ke arah utara atau badai telah berada pada fase pemulihan, terjadi lagi gelombang kejut yang kedua dan membuat Dst kembali turun berkisar sampai dengan -360 nT dan diikuti dengan penurunan Dst sampai dengan kisaran -400nT (Pulkkinen, et al., 2005)

3. Badai Geomagnet Saint Patricks terjadi pada 17–18 Maret 2015 ketika siklus matahari ke- 24. Badai geomagnet ini berlangsung selama kurang lebih 18 jam dan mencapai level G4 ($Dst = -223$ nT) dengan fase utama badai dimulai pukul 07.30 UT pada tanggal 17 Maret 2015. Pada saat itu medan magnet antarplanet (B_z) mengarah ke selatan sampai dengan -30 nT. Badai ini diakibatkan oleh perubahan medan magnet antarplanet (IMF) berarah selatan pada saat penurunan indeks Dst yang pertama dan *magnetic cloud* (MC) *storm*. Awan magnetik (MC) merupakan lontaran plasma matahari yang memiliki medan magnet sangat kuat, rotasi sudut besar, dan temperatur proton rendah. Badai geomagnet st. Patricks ini mengakibatkan terputusnya aliran listrik di beberapa negara (Astafyeva, et al., 2015).
4. Badai geomagnet terbesar terjadi baru-baru ini, yaitu pada tanggal 11–12 Mei 2024, mengakibatkan nilai indeks Dst turun sampai dengan -412 nT, dengan K_p mencapai 9+. Badai geomagnet ini merupakan badai terbesar yang terjadi selama 20 tahun terakhir, diakibatkan CME pada tanggal 10 Mei 2024. Kecepatan angin matahari sampai dengan 900 km/detik, dan medan magnet antarplanet berarah selatan berkisar -50 nT . Badai geomagnet ini diakibatkan oleh daerah aktif 3664 memasuki daerah piringan matahari yang tampak pada tanggal 7 Mei 2024 dan berkembang pesat ukuran dan kompleksitasnya. Pada tanggal 8 Mei 2024 terjadi 7 *flare* kelas X dan beberapa *flare* kelas M yang mengarah ke Bumi. Peristiwa pertama *flare* kelas X1.0 yang berdurasi panjang terjadi pada jam 05:09 UT, tanggal 8 Mei 2024 yang berasosiasi dengan Halo CME yang mengarah ke Bumi. Kemudian diikuti dengan *flare* kelas M8.6 pada jam 12:04 UT yang bergerak dengan kecepatan tinggi menuju Bumi. Kedua CME itu bergerak menuju Bumi diikuti dengan *flare* yang besar yaitu X1.0 dan M9.8 sekitar jam 21:40. Dampak dari badai magnetik ini adalah terganggunya sistem satelit Starlink yang merupakan cabang dari SpaceX pada tanggal 11 Maret 2024. Selain itu dampak positif dari badai ini

adalah di sebagian wilayah lintang tinggi dapat melihat keindahan dari pancaran cahaya di langit utara atau yang biasa disebut aurora borealis yang berwarna merah muda, hijau dan ungu.

Menurut penelitian, sumber utama badai geomagnet ekstrem memiliki karakterisasi indeks $Dst < -100$ nT (nano-Tesla) adalah CME yang merupakan pelepasan plasma dan medan magnet dalam jumlah besar secara tiba-tiba dari Matahari. Selain itu, fenomena lubang korona yang terjadi di Matahari, menghasilkan aliran HSS yang keluar dari lubang korona dapat menyebabkan badai geomagnet sedang (Tsurutani, et al., 1997).

Angin matahari dapat digambarkan sebagai aliran partikel bermuatan yang berasal dari bagian atas atmosfer matahari. Angin matahari menyebabkan perubahan kecepatan, kepadatan, dan suhu seiring waktu dan garis bujur. Karena pemanasan koronal, partikel angin matahari mencapai kecepatan lepas dan mengembang menjauhi Matahari dan ketika angin matahari dengan kecepatan tinggi memasuki medium antarplanet, partikel tersebut juga dapat mengganggu medan magnet Bumi (Cane & Richardson, 1995; Loewe & Prolss, 1997). Kane (2005) dan Sabbah (2001) menemukan bahwa badai geomagnet terutama terjadi ketika interaksi IMF dengan Bumi mempunyai komponen B_z yang kuat ke arah selatan.

Arus cincin tumbuh di magnetosfer bagian dalam selama badai magnet dan memberikan kontribusi signifikan terhadap karakteristik gangguan medan magnet Bumi yang diamati di garis lintang rendah. Arus cincin bumi bertanggung jawab untuk melindungi garis lintang bawah bumi dari medan listrik magnetosfer (Daglis, et al., 1999). Oleh karena itu, hal ini berdampak besar pada elektrodinamika badai geomagnet. Sistem arus cincin terdiri dari sebuah pita, pada jarak 3 hingga $8 R_E$, yang terletak pada bidang ekuator dan beredar searah jarum jam mengelilingi Bumi (bila dilihat dari utara). Partikel-partikel di wilayah ini menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan medan magnet bumi sehingga pengamat Bumi akan mengamati penurunan medan magnet di wilayah tersebut. Pembelokan negatif medan magnet bumi akibat arus cincin diukur dengan indeks Dst .

Energi arus cincin terutama dibawa oleh ion-ion, yang sebagian besar adalah proton. Namun, kita juga melihat partikel alfa dalam arus cincin, sejenis ion yang banyak terdapat dalam angin matahari. Selain itu, persentase tertentu merupakan ion oksigen O⁺, mirip dengan ionosfer bumi, meskipun jauh lebih energik. Campuran ion ini menunjukkan bahwa partikel arus cincin mungkin berasal dari lebih dari satu sumber.

C. Pengamatan Medan Magnet Bumi

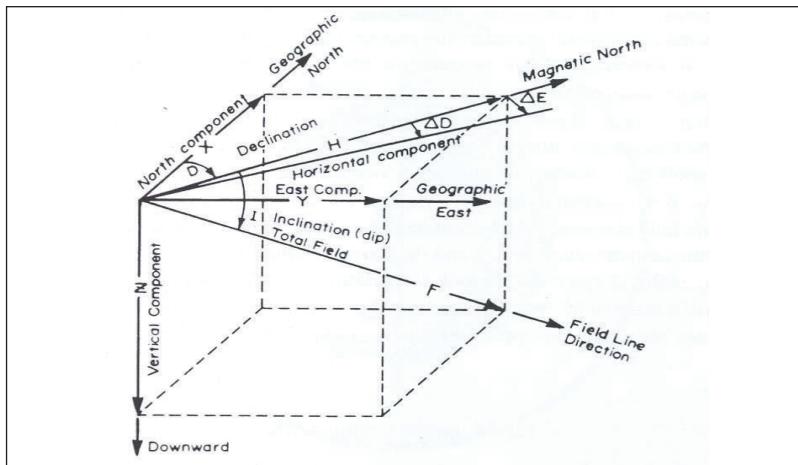
Pengamatan medan magnet bumi dilakukan untuk dapat memahami fenomena-fenomena fisis yang terjadi serta dampaknya bagi kehidupan. Aktivitas geomagnet dapat berdampak pada sistem teknologi di Bumi, terutama yang berkaitan dengan teknologi informasi, telekomunikasi, dan navigasi yang berbasis antariksa/satelit, serta para operator survei geofisika. Magnetosfer merupakan lapisan di lingkungan Bumi yang mengandung medan magnet yang berasal dari superposisi dari beberapa sumber. Sumber utama medan magnet bumi berasal dari: (1) medan utama (*main field*) yang bersumber dari inti bumi, (2) aliran plasma inti bumi yang terkait dengan variasi sekular medan magnet, (3) medan litosfer yang diakibatkan oleh kerak batuan termagnetisasi, (4) induksi akibat gerak samudra, (5) medan magnet ionosferik, dan (6) medan magnetosferik.

Berdasarkan sistem koordinatnya, vektor medan magnet bumi umumnya digambarkan dengan dua cara seperti ditunjukkan pada Gambar 6.4. Pertama, vektor direpresentasikan sebagai komponen X, Y, Z dengan X merepresentasikan arah geografis utara-selatan, Y arah timur-barat, dan Z arah vertikal bumi. Kedua, vektor direpresentasikan sebagai komponen H, D, Z, dengan H merepresentasikan arah magnet utara-selatan, D arah sudut deklinasi, dan Z arah vertikal, sedangkan inklinasi (I) yaitu sudut antara medan magnet total (F) dengan bidang horizontal yang dihitung dari bidang horizontal menuju bidang vertikal ke bawah. Berdasarkan sistem koordinatnya, vektor medan magnet Bumi umumnya digambarkan dengan dua cara seperti ditunjukkan pada Gambar 6.5.

$$X = H \cos(D), Y = H \sin(D) \quad Z = B \sin I \quad (\text{C.1})$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (\text{C.2})$$

$$\frac{Z}{H} = \tan(I) \quad (\text{C.3})$$



Sumber: Campbell (2003)

Gambar 6.5 Proyeksi komponen medan magnet Bumi

1. Instrumentasi Magnetometer

Magnetometer merupakan suatu instrumen yang dapat mengamati perubahan fisis suatu medan magnet secara *real time*. Magnetometer pertama kali diperkenalkan oleh Carl Friedrich Gauss sekitar tahun 1833 dengan membuat suatu perangkat yang dapat mendeteksi dan mengukur nilai dan orientasi medan magnet Bumi. Hasil penemuan-nya masih digunakan sampai saat ini dan telah menjadi dasar bagi pengembangan teori magnetik modern. Karena penemuan ini juga, nama Gauss digunakan sebagai standar untuk satuan kerapatan fluks magnet.

Terdapat beberapa jenis magnetometer yang saat ini digunakan untuk pengamatan, survei di lapangan maupun untuk keperluan riset dalam skala laboratorium. Pengukuran medan magnet Bumi dapat dilakukan di permukaan Bumi (*ground-based*) maupun di antariksa (*space-based*). Berbagai teknik pengukuran medan magnet telah banyak dikembangkan untuk diterapkan dalam instrumen, sehingga menghasilkan beberapa jenis magnetometer. Secara umum magnetometer terbagi atas dua jenis yaitu magnetometer skalar dan magnetometer vektor.

Magnetometer skalar adalah magnetometer yang hanya mengukur nilai total dari suatu kekuatan medan magnet di sekitarnya. Magnetometer skalar umumnya jenis magnetometer *mobile*, dan sering digunakan untuk survei atau pemetaan. Contoh dari magnetometer skalar antara lain *proton precession magnetometer* (PPM) dan *Overhauser*, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.6. Prinsip kerja dari instrumen *proton precession magnetometer* adalah dengan memanfaatkan gejala resonansi magnetik (*nuclear magnetic resonance-NMR*), adanya perubahan medan magnet akan mempengaruhi orientasi spin proton (*gyromagnetik*). Dengan adanya spin proton ini maka dapat dideteksi frekuensi resonansi atau tegangan yang diinduksi dalam kumparan sehingga dapat ditentukan besarnya nilai medan magnet. Sementara itu, *Overhauser* memiliki kerja mirip dengan proton magnetometer, hanya saja menggunakan sinyal frekuensi radio untuk mempolarisasi putaran elektron.



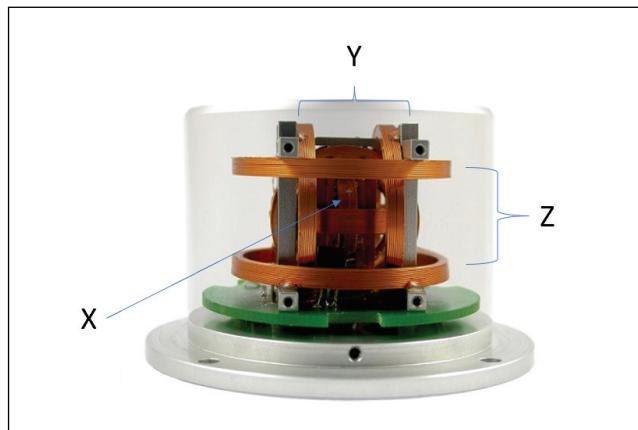
Keterangan: (a) Proton Type: G856, (b) Overhauser GSM-15.

Sumber: Dok. BRIN

Gambar 6.6 Magnetometer Jenis Skalar

Magnetometer vektor adalah magnetometer yang dapat mengukur besar dan arah medan magnet. Secara umum orientasi dari medan magnet direpresentasikan dalam 3 koordinat yaitu komponen X (arah Utara-Selatan), Y (Timur-Barat), dan Z (vertikal). Magnetometer vektor umumnya jenis magnetometer *statis* yang sering digunakan untuk mengukur variasi diurnal (harian). Contoh dari magnetometer vektor antara lain fluxgate dan induktif, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.7. Magnetometer ini pada dasarnya terdiri dari kumparan/lilitan yang materialnya mempunyai permeabilitas tinggi dalam medan magnetik yang rendah sehingga memungkinkan untuk mengukur benda magnetik yang mempunyai *hysteresis loop* sekecil mungkin. Secara umum prinsip kerja dari fluxgate adalah dengan menerapkan hukum Faraday, yaitu jika ada suatu fluks magnet yang melewati suatu koil, fluxgate akan menghasilkan tegangan/arus yang proposional (berbanding lurus) dengan perubahan fluks.

Dalam perkembangannya, instrumen magnetometer sudah mengalami banyak variasi dalam perancangan maupun konfigurasinya yang disesuaikan dengan kebutuhan, baik untuk penggunaan secara komersial maupun kegiatan penelitian (Jankowski dan Sucksdorff,



Sumber: Magson (2024)

Gambar 6.7 Magnetometer Vektor Tipe Fluxgate.

Tabel 6.1 Spesifikasi Ideal Fluxgate Magnetometer

Rugged	Mean time before failure 24 months	Passband	DC to 1 Hz DC to 0.1 Hz ^a
Reliable	mean time to repair 1 day	Noise	0.03 nT in passband
Protected against	lightning, humidity, RF interference	Linearity	0.1% at full scale
Power	<100 W, uninterruptible	Timebase	1 s month ⁻¹ 5 s month ⁻¹ ^a
Resolution	0.1 nT 0.1 nT ^a	Sampling rate	10 Hz
Dynamic range	>±3000 nT (8000 high latitude 6000 elsewhere) ^a	Measurement interval	5 s 1.0 s ^a
Stability	0.25 nT per month 5 nT per year ^a	Temperature coefficient	Sensor <0.1 nT/°C Console <0.1 nT/°C 0.25nT/°C ^a
3 component sensor construction	orthogonal within ±30' Stable to 0.3''/month 0.3''/°C	Tilt sensors	Resolve 1'' (every 10 min) Stability 1''/month

Sumber: Trigg (1988)

1996). Namun, untuk penggunaan observatorium diperlukan instrumen magnetometer yang memiliki suatu standar khusus (Trigg, 1988) seperti terlihat pada Tabel 6.1.

2. Jaringan Obsevatori Geomagnet

Observatori geomagnet merupakan suatu kawasan tempat dilakukannya pengamatan medan magnet bumi. Keberadaan observatori geomagnet ini selain sebagai pusat riset juga berperan sebagai penyedia informasi data pengamatan untuk penelitian ilmiah maupun kebutuhan komersial. Seiring dengan perkembangannya, setiap observatorium geomagnet dituntut untuk dapat menghasilkan data pengamatan yang lebih baik. Kelayakan dari suatu observatorium geomagnet dapat dilihat dari beberapa hal, di antaranya lokasi pengamatan yang tetap, perekaman data jangka panjang, kualitas data yang baik, dan modernisasi dari instrumen pengamatan dengan standardisasi seperti pada Tabel 6.2. Selama beberapa dekade ke belakang, data observatorium geomagnet hanya tersedia dalam bentuk kertas cetak seperti magnetogram. Dengan perkembangan teknologi saat ini, transformasi data observasi telah mengalami peralihan dari data analog ke data digital sehingga penyebarannya menjadi lebih cepat.

Tabel 6.2 Daftar Lokasi Stasiun Pengamatan Magnetometer LAPAN

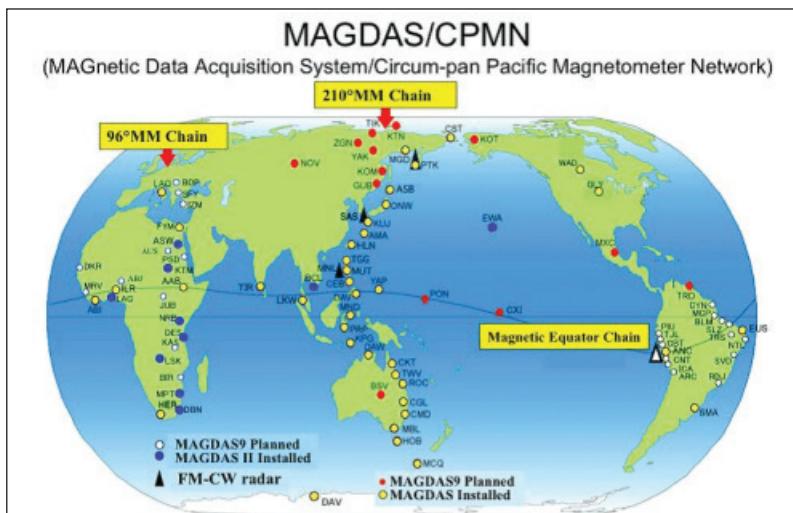
Stasiun Pengamatan	Jenis Magnetometer	Jaringan Pengamatan	Tahun Pemasangan
Biak (BIK)	Fluxgate (YU-8)	LAPAN/BRIN	1992
Tanjungsari (TJS)	Fluxgate (MB162)	LAPAN/BRIN	2004
Kototabang (KTB)	Fluxgate (YU-8)	LAPAN/BRIN	2004
Pare-Pare (PRP)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2006
Manado (MND)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2007
Kupang (KPG)	Fluxgate (Magdas I,II)	MAGDAS/CPMN	2007
Watukosek (WTK)	Fluxgate (Magson)	LAPAN/BRIN	2012
Pontianak	Fluxgate (Magdas 9)	MAGDAS/CPMN	2011
Jayapura (JYP)	Fluxgate (Magdas 9)	MAGDAS/CPMN	2011
Pameungpeuk (PMK)	Fluxgate (Magson)	LAPAN/BRIN	2012
Negara (NGR)	Fluxgate (Lemi)	LAPAN/BRIN	2012

BRIN memiliki jaringan magnetometer yang tersebar diseluruh wilayah Indonesia yang bertujuan untuk melakukan studi terkait model medan magnet bumi regional, sistem arus ionosfer, pulsa magnet, serta layanan terkait dengan cuaca antariksa. Kolaborasi dengan observatorium luar negeri juga dilakukan untuk membentuk komunitas geomagnet yang bertujuan mengumpulkan, menyimpan, dan mendistribusikan informasi tentang data pengamatan guna membantu penelitian ilmiah dengan lebih baik. Salah satu upaya tersebut di antaranya melakukan kolaborasi dengan jaringan internasional MAGDAS/CPMN (*Magnetic Data Acquisition System/Circum-pacific Magnetometer Network*). Pemasangan magnetometer pertama kali dilakukan pada tahun 1992 di Stasiun Pengamat Dirgantara (SPD) Biak. SPD Biak merupakan bagian dari stasiun pengamatan LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) dan sejak tahun 2021 LAPAN bergabung dengan BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional). Seiring dengan waktu, saat ini BRIN memiliki 11 lokasi pengamatan medan magnet yang tersebar di seluruh Indonesia. Beberapa stasiun tersebut merupakan bagian dari jaringan magnetometer MAGDAS/CPMN, di antaranya stasiun Manado, Pare-Pare, Kupang, Pontianak, dan Jayapura, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.9.



Sumber: Triharjanto (2014)

Gambar 6.8 Peta Jaringan Stasiun Magnetometer LAPAN

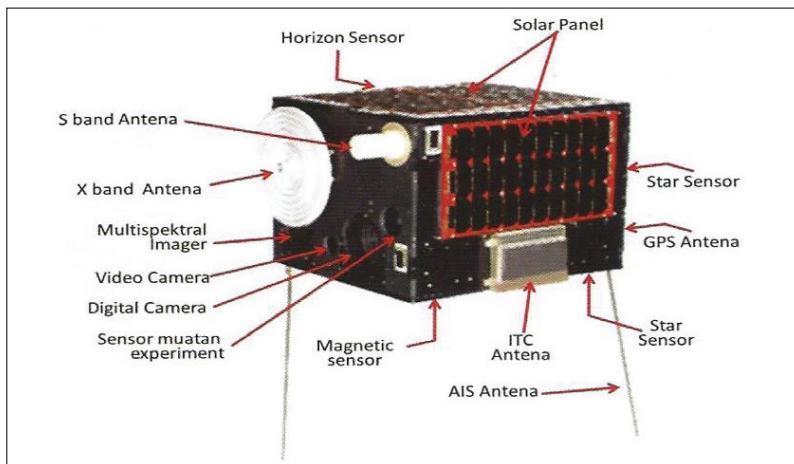


Sumber: i-SPES (2024)

Gambar 6.9 Peta Jaringan Stasiun MAGDAS/CPMN.

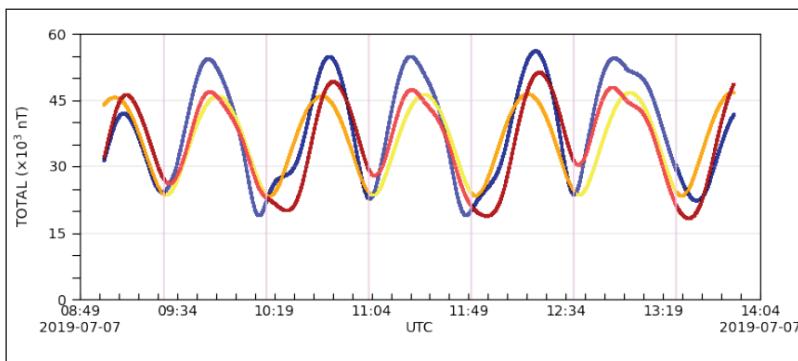
Pengamatan *space-based* juga dilakukan oleh BRIN dengan meluncurkan satelit LAPAN-A3. Satelit ini membawa beberapa muatan, termasuk di antaranya magnetometer HFGM (*Hybrid Fluxgate Magnetometer*) untuk melakukan eksperimen pengukuran medan

magnet bumi di ketinggian atmosfer-atas/ionosfer (Triharjanto et al., 2014). Satelit LAPAN-A3 merupakan satelit mikro yang memiliki orbit polar pada ketinggian LEO (*Low Earth Orbit*) sekitar 500 km dari permukaan Bumi. Dengan ketinggian dan orbitnya yang polar, satelit ini dapat mengelilingi Bumi sebanyak 14 kali dalam satu hari. Hasil pengukuran HFGM (*Hybrid Fluxgate Magnetometer*) dalam rentang waktu tersebut dapat memberikan gambaran mengenai kondisi medan magnet global karena akan melewati beberapa area penting secara kelistrikan dan kemagnetan berdasarkan klasifikasi lintang (Musafar et al., 2021). Lintang tinggi merupakan area *polar cup* yang memiliki geometri garis medan magnet terbuka dan menghubungkan ruang angkasa dekat Bumi dengan medium antar-planet. Sementara itu, lintang menengah dan rendah merupakan area tempat sistem arus ionosfer berada. Magnetometer satelit LAPAN-A3 melakukan perekaman data medan magnet resolusi waktu yang tinggi, yaitu dengan *sampling rate* 128 per detik. Data dengan resolusi tinggi ini dapat digunakan untuk menganalisis fenomena ionosfer yang bersifat lokal di sepanjang lintasan orbit tersebut. Hasil ekstraksi data satelit LAPAN-A3 terlihat pada Gambar 6.11.



Sumber: Doni K. (2017)

Gambar 6.10 Satelit Mikro LAPAN-A3



Keterangan:

Garis biru: Satelit LAPAN-A3; Garis kuning: Model dipol; Garis merah: IGRF

Sumber: Musafar (2021)

Gambar 6.11 Plot Medan Magnet Rekaman Magnetometer

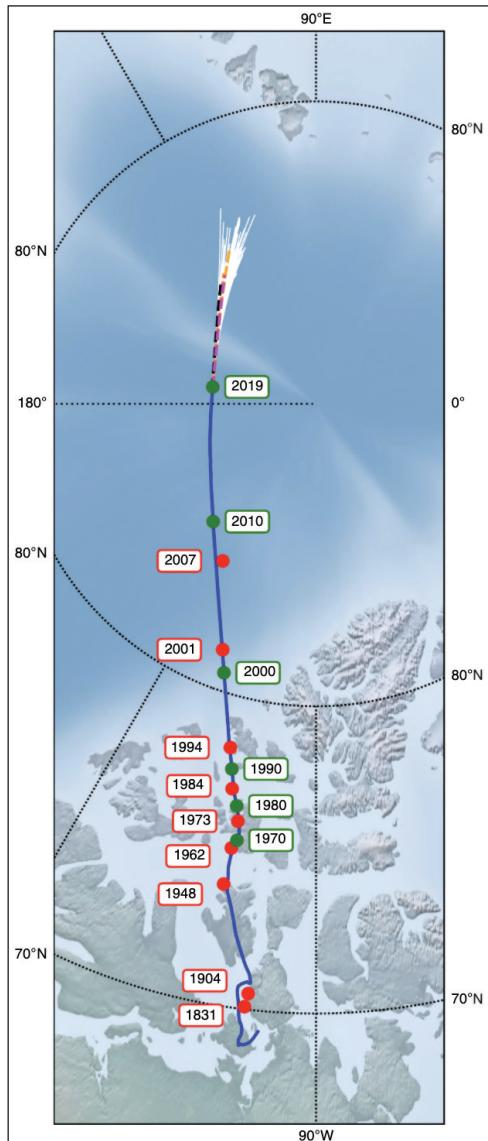
D. Perubahan Medan Magnet Bumi

Akankah medan magnet bumi (magnetosfer) selamanya melindungi Bumi? Pertanyaan ini merupakan pertanyaan terbaik untuk mengonfirmasi pernyataan seperti pada judul. Mengapa menjadi pertanyaan terbaik? Karena magnetosfer merupakan pelindung bagi kehidupan di Bumi dan lingkungannya dari bahaya yang berasal dari antariksa. Permasalahannya, sampai kapan magnetosfer menjadi pelindung Bumi? Akankah magnetosfer hilang dan bagaimana efeknya bagi lingkungan Bumi dan semesta jika magnetosfer hilang?

1. Pemicu Terjadinya Pembalikan Polaritas Kutub Medan Geomagnet

Terdapat dua bukti bahwa polaritas kutub medan geomagnet mengalami pembalikan (*flip*). Pertama, terjadinya pengembalaan/bergeraknya titik kutub utara magnet yang telah dicatat oleh ilmuwan dan pelaut sejak 1831. Perpindahan kutub ini diperkirakan sejauh 31 mil per tahun, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.12.

Kedua, ketika lava dari gunung berapi memadat, saat itu mineral ferromagnetik seolah-olah sejajar dengan medan geomagnet. Dari



Sumber: Livermore et al. (2020)

Gambar 6.12 Pengembalaan/Pergerakan Lokasi Titik Kutub Utara

analisis terhadap batuan, diperoleh hasil bahwa medan magnet saat pemadatan berlawanan dengan medan magnet saat ini; seolah-olah kutub selatan magnet berada pada kutub utara geografis. Para ilmuwan tidak mengetahui secara pasti penyebab pembalikan tersebut, tetapi menurut catatan ilmuwan, pembalikan kutub Bumi terakhir terjadi 780.000 tahun lalu (Shergold, 2023).

Para ilmuwan juga mengetahui hal yang mengkhawatirkan, yakni telah terjadi penurunan kekuatan medan magnet sebesar 30% dalam 3.000 tahun terakhir berdasarkan penelitian batuan dan lava. Dengan semakin baiknya pengetahuan ilmuwan akan medan magnet, diketahui bahwa sekitar 200 tahun lalu medan magnet telah mengalami pelemahan sebesar 9% dari sekarang. Hal ini menunjukkan bahwa titik kutub-kutub bumi pernah mengalami pergerakan dan medan magnet pernah mengalami perubahan (penurunan kekuatan) (Shergold, 2023).

2. Peristiwa Apokaliptik Akibat Pembalikan Polaritas Kutub Medan Geomagnet

Sekitar 420.000 tahun yang lalu, magnetosfer bumi pernah mengalami kondisi apokaliptik (kondisi hancur parah-kiamat), dipicu oleh pembalikan kutub magnet bumi dan perubahan perilaku Matahari (Fogwill et al., 2021). Pembalikan kutub medan geomagnet ini merupakan terkini dan pembalikan ini memicu serangkaian peristiwa dramatis yang mempunyai konsekuensi bagi lingkungan Bumi seperti hancurnya lapisan ozon, GIC di seluruh daerah tropis, cahaya aurora spektakuler, musim dingin ekstrem di utara Amerika serta perubahan pola cuaca yang drastis. Selama peristiwa ini, paparan ultraviolet ekstrem menghantam Bumi sehingga menyebabkan kepunahan mega fauna dan flora.

Peristiwa pembalikan kutub 420.000 tahun yang lalu dikenal sebagai “Laschamps Excursion”. Nama tersebut berasal dari nama sebuah desa tempat ditemukannya di Massif Central Prancis. Ekskusi Laschamps terbaru terjadi di Tasmania, Australia. Namun, hingga saat ini, belum jelas apakah perubahan ini berdampak pada iklim dan

kehidupan manusia. Penelitian baru menunjukkan bahwa dampaknya bersifat global dan meluas.

Adanya peristiwa 420.000 tahun lalu ini telah dibuktikan oleh Profesor Alan Cooper dengan menganalisis pohon kauri di New Zealand. Melalui analisis lingkaran pohon kauri dapat ditentukan kemungkinan peristiwa yang terjadi saat itu. Analisis menggunakan sistem komputer canggih menemukan bahwa, pada saat pembalikan kutub, kekuatan medan magnet bumi turun hingga kurang dari 6% dari kekuatan medan geomagnet saat ini, sehingga seolah-olah Bumi tanpa magnetosfer atau pelindung perisai (Fogwill et al., 2021).

Jadi berdasarkan paparan di atas, terbukti bahwa walaupun titik kutub Bumi mengalami pergerakan dan medan geomagnet mengalami perubahan, tetapi medan geomagnet atau magnetosfer tidak akan pernah hilang sama sekali dan akan tetap menjadi perisai bagi kehidupan di Bumi. Medan geomagnet atau magnetosfer hanya akan mengalami perubahan dan pelemahan, serta pembalikan kutub-kutub sebagai dampak interaksi dengan Matahari dan alam semesta.

E. Lingkungan Antariksa dan Pengaruh terhadap Teknologi Antariksa

Lingkungan antariksa didefinisikan sebagai ruang vakum atau medium di luar atmosfer Bumi. Lingkungan antariksa dipengaruhi oleh aktivitas Matahari, diantaranya *flare*, CME, dan lubang korona. *Flare* adalah fenomena ledakan energi di atmosfer matahari hingga mencapai 6×10^{25} joule dengan kelajuan tinggi dan terjadi secara tiba-tiba. CME merupakan ledakan plasma dari permukaan Matahari, lubang korona merupakan wilayah di korona matahari dengan kepadatan rendah dan temperatur rendah. Interaksi dari kondisi aktivitas Matahari dapat berdampak langsung bagi berbagai teknologi di Bumi, seperti sistem komunikasi, sistem navigasi, dan satelit yang mengorbit Bumi. Ada dua masalah utama cuaca antariksa bagi satelit yang mengorbit Bumi, yaitu paparan radiasi dan hambatan satelit di atmosfer (Gubby & Evans, 2002). Matahari secara terus menerus memancarkan energi dalam jumlah yang sangat besar di seluruh spektrum elektromagnetik

yang terdiri dari sinar-X, ultraviolet, cahaya tampak, infra merah, dan gelombang elektromagnetik (Lu et al. et al, 2019). Dampak gangguan pada satelit akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas matahari yang selalu memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel bermuatan. Tumbukan partikel menjadi salah satu penyebab anomali satelit yang disebabkan oleh cuaca antariksa. Anomali satelit merupakan suatu kondisi ketika satelit mengalami gangguan yang penyebabnya tidak dapat diperkirakan secara pasti. Berbagai macam anomali satelit yang disebabkan oleh cuaca antariksa seperti pengisian daya (*charging*), hambatan atmosfer (*atmospheric drag*), hilang kendali sikap satelit (*lost the attitude control*), dan lain-lain.

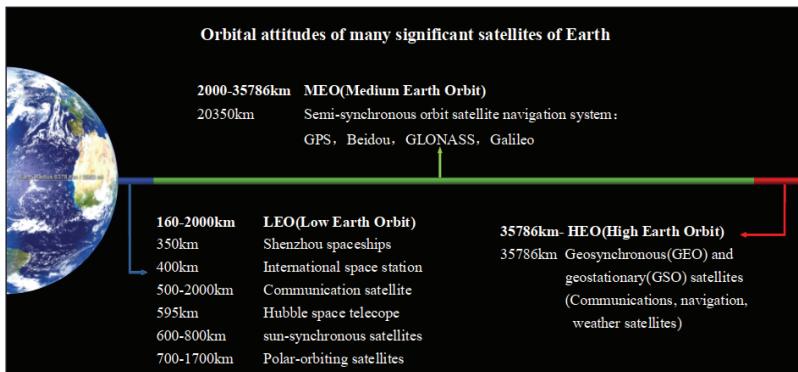
Sampai pada bulan Mei 2024 ada sebanyak 9.900 satelit aktif di orbit dengan 12% mengorbit di Geostationary Earth Orbit (GEO), 3% di Medium Earth Orbit (MEO), dan 85% di Low Earth Orbit (LEO) (Nano Avionics, 2024). Seiring dengan meningkatnya jumlah satelit yang mengorbit, fenomena cuaca antariksa sangat penting untuk menjadi perhatian karena cuaca antariksa memainkan peran utama pada kesehatan, operasional, dan kinerja dari satelit, terutama pada orbit rendah dan tinggi. Pada tahun 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, dan 2011 terdapat kejadian anomali satelit sebanyak 23 kasus, 21 kasus, 28 kasus, 24 kasus, 21 kasus, 14 kasus, dan 3 kasus (Ahmad, 2012).

Kejadian anomali satelit yang lebih spesifik terjadi pada tanggal 20 Januari 1994 pada satelit Intelsat K, Anik E1, dan Anik E2 yang mengalami kehilangan kontrol sikap satelit yang disebab peningkatan fluks elektron relativistik (>2 MeV) Kejadian tersebut mengakibatkan Electrostatic Discharge (ESD) secara internal oleh elektron sabuk radiasi (Ahmad, 2012). Pada bulan Februari tahun 2022, sekitar 38 satelit starlink hilang kendali. Kejadian tersebut diduga akibat badi geomagnet lingkungan antariksa yang terdiri dari berbagai fenomena kompleks dari Matahari yang dapat memengaruhi ruang antarplanet, magnetosfer, ionosfer, dan termosfer Bumi, Perubahan fenomena tersebut akan membawa dampak negatif terhadap sistem teknologi berbasis ruang angkasa dan landas Bumi (Horneet alet al., 2013).

Selain itu, pada awal Februari 2022, 38 satelit Starlink mengalami mati secara prematur karena adanya *drag* tidak normal pada atmosfer atas. Penyebab kejadian ini adalah badai geomagnet yang disebabkan adanya angin Matahari dan medan magnet antarplanet(Tsyganenko et al et al., 2022). Pada tahun 1994, dua satelit komunikasi Kanada, Satelit Anik E1 dan E2, mengalami kerusakan akibat badai geomagnet yang kuat, sehingga Satelit Anik E1 mengalami kegagalan sistem kendali sikap satelit, sedangkan Anik E2 mengalami gangguan daya, menyebabkan hilangnya layanan komunikasi di seluruh Kanada. Pada tahun 1997, Satelit Telstar 401 mengalami kegagalan total yang diduga disebabkan oleh badai matahari yang kuat sehingga menyebabkan gangguan besar pada layanan TV dan data di Amerika Utara.

Selain satelit komunikasi, badai matahari juga menyebabkan kerusakan pada satelit cuaca NOAA-16 yang mengakibatkan kerusakan pada beberapa instrumen penting sehingga mengurangi kemampuan satelit dalam mengumpulkan data cuaca. Serangan badai matahari yang terjadi pada akhir Oktober hingga awal November 2003, yang disebut juga sebagai Badai Matahari Halloween, menyebabkan gangguan pada beberapa satelit, termasuk satelit komunikasi dan navigasi. Badai ini juga menyebabkan peningkatan radiasi yang mengharuskan beberapa satelit dioperasikan dalam mode aman (*safe mode*) untuk melindungi komponen elektroniknya (Leach & Alexander, 1996).

Secara umum penempatan satelit pada orbit dibagi ke dalam tiga wilayah, yaitu LEO, MEO, dan GEO (ditunjukkan pada Gambar 6.13). LEO didefinisikan sebagai orbit yang memiliki ketinggian antara 180 km sampai 2.000 km, MEO memiliki ketinggian antara 2.000 km sampai 35.780 km, dan GEO memiliki ketinggian lebih besar dari 35.780 km. Ketinggian orbit LEO merupakan wilayah yang sangat terpengaruh oleh lapisan atmosfer atas (Luet al et al., 2019). Satelit yang ditempatkan pada orbit LEO adalah satelit dengan berbagai macam misi, seperti edukasi, percobaan, pengamatan bumi, sambungan internet, dan Internet of Things (IoT). Sementara itu, pada orbit MEO dan GEO, satelit yang ditempatkan memiliki misi lebih spesifik seperti komunikasi, navigasi, dan pengamatan cuaca. Pada setiap orbit, banyak kejadian anomali yang dihasil dari berbagai kondisi



Sumber: Yifan Luet al et al. (2019)

Gambar 6.13 Distribusi Wahana Antariksa di Orbit Bumi

cuaca antariksa, sehingga pada proses desain dilakukan penekanan khusus untuk menghilangkan dampak utama dari pengaruh cuaca antariksa pada setiap orbit.

Berdasarkan NASA Marshall Space Flight Center, lingkungan antariksa meliputi enam area, yaitu atmosfer netral, plasma, radiasi, meteoroid/debu orbital, lingkungan termal, dan lingkungan matahari (Luet al et al., 2019; Leach & Alexander, 1996). Cuaca antariksa sangat dipengaruhi oleh aktivitas matahari. Selain itu, aktivitas matahari juga dapat memicu aktivitas lain pada lingkungan antariksa seperti atmosfer netral, plasma, radiasi, partikel makroskopis, medan magnet, dan temperatur.

Perubahan kondisi atmosfer bagian atas dapat menyebabkan perubahan kerapatan termosfer yang memengaruhi hambatan satelit pada orbit rendah (LEO, <2.000 km). Dampak utama dari peningkatan kerapatan ini muncul akibat peningkatan suhu yang dihasilkan dari energi yang masuk ke termosfer yang didorong oleh aktivitas matahari atau aktivitas geomagnet (Fang, T.W. et al et al., 2022). Kejadian tersebut menyebabkan perubahan kerapatan atmosfer netral secara langsung dan akan menyebabkan hambatan atmosfer (*atmospheric drag*) pada orbit rendah. Hambatan satelit dapat mengganggu operasional satelit seperti saat mengontrol sikap satelit karena adanya peningkatan gaya

hambat selama badai magnetik yang besar. Kejadian tersebut pernah dialami oleh satelit ASKA Jepang, yang mengorbit pada ketinggian LEO pada tahun 2000, yang menyebabkan satelit tersebut kehilangan sikap kendali (*lost the attitude control*) dan sumber daya (*solar power*).

Gambar 6.14 menunjukkan berbagai macam gangguan pada wahana antariksa yang disebabkan oleh lingkungan cuaca antariksa. Tingkat gangguan pada wahana antariksa memiliki perbedaan pada setiap ketinggiannya. Gradiasi warna yang ditunjukkan pada Gambar 6.14 menunjukkan tingkat keparahan komponen lingkungan cuaca antariksa, terkecuali untuk dampak yang disebabkan oleh ruang hampa udara. Dampak dari hampa udara selalu ada secara terus menerus dari mulai ketinggian minimum sampai wilayah yang lebih tinggi. Atom oksigen merupakan salah satu faktor yang dapat mengganggu wahana antariksa yang sangat dominan pada ketinggian orbit rendah yang berkisar pada ketinggian 200 km sampai 800 km (Arnold

		Micrometeoroids							
		Space debris	800	1400	Space debris	2000	Space debris		
		N40°~N50° Van Allen Inner S40°~S50° Radiation Belts				N40°~N50° S40°~S50°			
		High-energy particles are mainly concentrated in high latitude and South Atlantic Anomaly regions				Solar Wind Plasma and Solar Cosmic Rays and Galactic Cosmic Rays			
60	Ionospheric plasma	Magnetospheric plasma							
		Temperature field large temperature difference							
		Stronger magnetic field intensity in LEO				Geomagnetic field			
		Atomic oxygen							
Pressure difference	Discharge	Out-gassing	Adhesion and cold welding		Materials evaporation sublimation decomposition				
Rough vacuum	High vacuum	Ultra-high vacuum	Upper atmosphere						
Sea level	100km	330km	LEO		2000km	MEO	GEO 35786km		
							HEO		

Sumber: Yifan Luet al et al. (2019)

Gambar 6.14 Komponen Lingkungan Antara pada Setiap Ketinggian

& Peplinski, 1986). Gangguan yang disebabkan oleh atom oksigen akan mengikis material satelit yang berdampak pada material satelit menjadi teroksidasi dan menghasilkan gas volatil (De Groh et al et al., 2008). Akibatnya instrumen optik akan mengalami pengembunan sehingga citra yang dihasilkan menjadi buram atau kurang baik resolusinya.

Ionomer adalah bagian atmosfer atas yang terionisasi oleh radiasi Matahari, berada mulai dari 60 km hingga 100 km di atas permukaan laut, dan wilayahnya mencakup termosfer dan sebagian mesosfer dan eksosfer. Lapisan ionosfer mengandung partikel listrik bermuatan yang dapat memantulkan dan menyerap sebagian gelombang radio tertentu. Peran dari ionosfer sangat penting dalam kelistrikan atmosfer dan membentuk batas pada lapisan magnetosfer (Suryana, 2021). Elektron yang terdapat pada lapisan ionosfer dapat memengaruhi pelemahan sinyal yang merambat pada lapisan ionosfer, apalagi ketika aktivitas Matahari mengalami peningkatan yang signifikan menyebabkan amplitudo dan fase dari sinyal radio akan berfluktuasi dengan cepat sehingga memengaruhi propagasi sinyal di semua frekuensi.

Orbit rendah (LEO) terletak di bagian bawah sabuk radiasi bagian dalam, maka dampak lingkungan radiasi di lintang tinggi dan Atlantik Selatan Anomali (South Atlantic Anomaly) tidak akan lebih kuat jika dibandingkan dengan orbit yang lebih tinggi (MEO dan GEO) dari pada orbit LEO. Gangguan medan geomagnet membuat sifat partikel berenergi tinggi mengalami gejolak dengan intensitas yang bervariasi berdasarkan waktu dan lokasi. Di sisi lain, meskipun proton mendominasi partikel berenergi tinggi di orbit LEO, peristiwa proton memiliki pengaruh yang lebih sedikit pada wahana antariksa. Hal ini disebabkan oleh perisai medan geomagnet (Yifan Luet al et al., 2019).

Kerusakan instrumen dan peralatan satelit tidak hanya terjadi pada aktivitas Matahari yang tinggi, tetapi juga dapat terjadi bahkan pada aktivitas Matahari yang tergolong rendah. Contoh kasus ini terjadi pada satelit Galaxy 15. Satelit ini mengalami gangguan komunikasi sehingga tidak dapat merespon terhadap perintah dari

Bumi tetapi tetap dapat mengirimkan sinyal dari transpondernya. Akibatnya, satelit mengalami *drifting* dan berpotensi terjadi tabrakan dengan satelit lain pada orbit *geostationary*. Sementara itu, beberapa ilmuwan berpendapat bahwa hilangnya kemampuan komunikasi satelit dapat disebabkan oleh badi geomagnet dengan intensitas rendah sampai menengah (Allen, 2010).

Pada tahun 2022, Pusat Prediksi Cuaca Luar Angkasa (SWPC) NOAA mengeluarkan peringatan bahwa peristiwa badi geomagnet kecil tetapi berkepanjangan akan terjadi. Beberapa hari kemudian, SpaceX Starlink meluncurkan sejumlah satelit baru ke orbit rendah Bumi. Namun, setelah peluncuran, 38 dari 49 satelit Starlink mengalami kegagalan dan keluar orbit hingga terbakar saat masuk kembali ke atmosfer Bumi. Studi yang dilakukan terhadap kejadian tersebut mengonfirmasi bahwa badi geomagnet pada bulan Februari menciptakan gangguan di lapisan atas atmosfer yang meningkatkan kondisi tarikan satelit dan mengurangi stabilitas satelit (Kataoka, 2022).

Selain badi geomagnet dan badi matahari, keberadaan meteorit dan sampah luar angkasa juga dapat mengancam satelit dan wahana antariksa. Observatorium luar angkasa generasi terbaru milik NASA, James Webb Space Telescope, yang ditempatkan pada titik Lagrange Bumi-Matahari 2 (L2), telah mengalami 20 tumbukan mikro-meteorit yang terdeteksi sejak peluncurannya pada tahun 2021. Tumbukan mikro-meteorit secara perlahan akan menurunkan performa peralatan. Dampak yang paling serius terjadi antara tanggal 23 Mei 2022 dan 25 Mei 2022 dan memengaruhi segmen C3 dari cermin utama heksagonal berlapis emas sebanyak 18 buah dari teleskop tersebut (Bartels, 2024; McElwain, 2023).

F. Perkembangan Riset Geomagnet di Indonesia

Secara historis, riset kemagnetan antariksa atau medan geomagnet di luar Bumi padat, mulai dari permukaan Bumi hingga antariksa, didasari oleh pertanyaan terkait dengan deviasi besar pada hasil medan magnet Bumi, yang dewasa ini dikenal dengan sebutan badi magnet. Pertanyaan ini menimbulkan hasrat para ilmuwan geofisika,

astrofisika, dan bidang terkait lainnya untuk menjelaskan hal tersebut. Selain itu, kemunculan aurora di daerah lintang tinggi telah teramati sejak lama, tetapi tidak diduga bahwa hal tersebut berkaitan dengan kemagnetan di antariksa Bumi. Pada sisi lain, observasi kejadian *flare* di awal abad ke-19 memunculkan spekulasi bahwa deviasi besar medan magnet Bumi terjadi akibat peristiwa *flare* yang melontarkan garis bermuatan listrik yang dapat mencapai orbit Bumi. Pada sisi lain, eksperimen komunikasi jarak jauh menggunakan gelombang radio melahirkan penemuan ionosfer yang merupakan sebuah lapisan konduktif di atas lapisan atmosfer.

Penyelidikan mengenai penyebab terjadinya badai geomagnet di lingkungan Bumi memicu perkembangan teoritis dan observasional. Hasil-hasil awal kajian teoritis di antaranya adalah adanya lapisan batas antara daerah antariksa Bumi dan ruang antarplanet, dugaan kuat bahwa Matahari melontarkan plasma yang disebut angin Matahari secara terus-menerus menuju ruang antar-planet. Gagasan teoritis tersebut selanjutnya dibuktikan melalui hasil observasi. Pada sisi lain, dengan adanya observasi medan magnet yang dilakukan secara kontinu diketahui pula bahwa variasi medan magnet Bumi berperilaku mengikuti lama penyinaran Matahari seperti halnya peningkatan ionisasi di atmosfer bagian atas akibat radiasi Matahari. Hasil observasi dan gagasan ini menimbulkan pemahaman baru bahwa antariksa Bumi memiliki struktur kompleks yang terdiri atas magnetosfer dan ionosfer. Magnetosfer ini termampatkan pada sisi siang dan membentuk geometri mirip dengan sebuah ekor pada sisi malam. Selain itu, aliran plasma angin matahari menimbulkan disturbansi pada sistem magnetosfer-ionosfer Bumi yang disertai oleh transfer momentum dan energi angin matahari ke dalam sistem tersebut. Konsekuensi dari kejadian tersebut adalah terbentuknya berbagai sistem arus skala besar dan peristiwa transpor partikel.

Interaksi Matahari-Bumi selanjutnya menjadi topik riset antariksa hingga dewasa ini. Karena medium di antariksa Bumi, dalam hal ini ionosfer dan magnetosfer, berupa plasma, maka riset kemagnetan antariksa serta observasinya merupakan hal yang esensial dalam

menyelidiki proses-proses dinamis dan mekanisme seperti apa yang berperan dalam berbagai keadaan dan fenomena di dalam sistem antariksa Bumi. Permasalahan-permasalahan yang ada dalam riset tersebut masih mengenai bagaimana mekanisme transfer energi dari angin matahari ke dalam sistem antariksa, kopling dan transfer momentum dan energi antardaerah di antariksa Bumi, percepatan dan energisasi partikel pada suatu daerah tertentu, transpor partikel dari satu daerah menuju daerah lainnya, penjalaran dan pembangkitan gelombang plasma di magnetosfer dan ionosfer, serta keterkaitan antara satu proses dengan proses lainnya.

Indonesia, selain terletak pada lintang ekuatorial sistem koordinat geografis tempat pemanasan matahari paling tinggi selama ekuinoks, pada sisi lain juga terletak pada lintang rendah sistem koordinat geomagnet. Karena letaknya yang demikian, sebuah stasiun pengamat medan magnet pertama di bangun di Batavia sejak sebelum era kemerdekaan. Observasi tersebut dimanfaatkan untuk menyelidiki variasi medan magnet dan hubungannya dengan sistem arus yang mengalir di ionosfer Bumi. Terkait dengan penyelidikan hubungan Matahari-Bumi, yaitu setelah peristiwa gerhana matahari total tahun 1983, dan sejalan dengan riset global penjalaran disturbansi magnetik, maka dibangun sejumlah stasiun pengamat medan magnet di beberapa daerah di Indonesia melalui kolaborasi riset internasional antara BRIN (LAPAN hingga tahun 2020 sebelum bergabung dengan BRIN) dengan universitas dan/atau lembaga riset Jepang. Arah penelitian saat itu adalah untuk menyelidiki mekanisme fisis penjalaran disturbansi magnetik dari lintang tinggi menuju lintang rendah (penjalaran latitudinal) serta penjalaran dalam arah radial menuju permukaan Bumi dan azimutal.

Pada sisi lain observasi di bidang atmosfer-tengah dan atmosfer-atas/ionosfer telah menunjukkan keberadaan gelombang plasma ekuatorial. Transpor vertikal yang diikuti oleh penjalaran sejajar medan-magnet gelembung plasma menuju lintang-tengah tersebut merupakan salah satu permasalahan transpor partikel dari atmosfer menuju ionosfer. Pada sisi lain, telah lama diketahui bahwa terdapat

peristiwa *stratospheric sudden warming* (SSW) di daerah lintang tengah. Hasil-hasil penelitian hingga dewasa ini juga menunjukkan adanya keterkaitan antara SSW dan arus Sq geomagnet. SSW ini juga diduga menjadi pemicu bagi perubahan iklim global.

Variasi tekanan angin matahari mengakibatkan osilasi permukaan *magnetopause* dan mengakibatkan tereksitasinya gelombang ULF di magnetosfer Bumi. Mekanisme pembangkitan dan penjalaran gelombang ini menjadi salah satu fokus dalam riset plasma antariksa. Meskipun demikian, dengan adanya sejumlah jaringan observasi medan magnet global, sejumlah peneliti juga menduga bahwa peristiwa gempa bumi akibat aktivitas tektonik juga mengeksitasi gelombang dalam rentang ULF tersebut.

Di awal tahun 2000-an, program cuaca antariksa muncul karena cuaca antariksa telah memberi dampak dan membahayakan infrastruktur teknologi. Pada awalnya dampak cuaca antariksa diyakini terjadi pada daerah lintang tinggi. Namun, hasil-hasil observasi dan riset menunjukkan bahwa dampak cuaca antariksa juga terjadi pada lintang rendah. Lebih lanjut, bencana antariksa seperti peristiwa anomali satelit dan bahkan jatuhnya sejumlah satelit operasional diyakini merupakan dampak dari dinamika lingkungan antariksa. Sejumlah negara, termasuk Indonesia, mencetuskan program cuaca untuk diagnosis kondisi antariksa Bumi dan juga untuk peramalannya.

Singkatnya, Indonesia terletak pada daerah tempat garis-garis medan magnetnya seluruhnya berada pada lapisan ionosfer. Medan magnet tersebut bervariasi dari waktu ke waktu dan memiliki kebergantungan pada sumber eksternal. Antariksa bumi terdiri atas magnetosfer dan ionosfer. Kopling angin matahari-magnetosfer-ionosfer-atmosfer merupakan isu penting dalam riset kemagnetan antariksa. Keterkaitan antara satu peristiwa dengan peristiwa lainnya dan/atau antara satu daerah dengan daerah lainnya masih memerlukan penyelidikan lebih jauh untuk mengungkap mekanisme pembangkitan, penjalaran, dan dampak yang dapat ditimbulkannya. Beberapa permasalahan utama dalam bidang biomagnet adalah sebagai berikut.

1. Proses dan mekanisme transfer energi maupun perkiraan jumlahnya yang masuk ke dalam sistem antariksa bumi
2. Pembentukan dan mekanisme percepatan partikel energi tinggi
3. Sumber dan berkurangnya partikel
4. Dinamika *magnetotail*
5. Keterkaitan antara fenomena lintang tinggi dan lintang rendah
6. Penjalaran efek badai magnet dan arus ionosfer terhadap perubahan kondisi ionosfer dan proses-proses transpor partikel serta pengaruhnya terhadap penjalaran gelombang radio melewati ionosfer
7. Eksitasi gelombang mikroseismik saat gempa Bumi merupakan permasalahan utama dalam bidang geomagnet

Selain itu, kopling sistem magnitosfer-ionosfer-atmosfer mungkin akan menjadi topik menarik dalam menyelidiki perubahan iklim global. Meskipun demikian, untuk mencapai semua itu diperlukan juga observasi yang meliputi medan magnet, kerapatan, atau spektrum frekuensi/energi plasma antariksa, baik berbasis permukaan bumi atau satelit. Alam selalu menampilkan peristiwa yang patut kita pelajari agar kita selalu berpikir.

Daftar Pustaka

- Allen, J. (2010). The Galaxy 15 Anomaly: Another Satellite in the Wrong Place at a Critical Time, *Space Weather*, 8,S06008, doi:10.1029/2010SW000588
- Allen, J., Sauer, H., Frank, L., & Reiff, P. (1989). Effects of the March 1989 solar activity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 70, 1486–1488.
- Arnold G S & Peplinski D R . (1986). Reaction of high-velocity atomic oxygen with carbon. *AIAA Journal*, 24(4):673–677.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I., Foerster, M., Doornbos, EN. (2015). *Ionospheric and thermospheric response to the 2015 St. Patrick's day storm*, AGUpubs, Volume 120, Issue 10, October 2015, 9023–9037.

- Bakare, N. O. & Chukwuma, V. U. (2010). Relationship between Dst and solar wind conditions during intense geomagnetic storms. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 39, 150-155.
- Bartels, Meghan. (2024). The James Webb Space Telescope gets its own micrometeoroid forecast-here's how. Space.com. <https://www.space.com/james-webb-space-telescope>. accessed on 15 June.
- Borovsky, J. E. & Valdavia, J. A. (2018). The Earth's Magnetosphere: A Systems Science Overview and Assessment. *Surveys in Geophysics*, 39:817–859. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9487-x>
- Boteler, D.H., A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm, *AGUPubs*, Volume17, Issue10, October 2019, 1427–1441.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press.
- Cane, H. V., & Richardson, I. G. (1995). Cosmic ray decreases and solar wind disturbances during late October 1989. *J. Geophys. Res.* 100, 1755.
- CWRU (2024). Retrieved July 21, 2024 from <https://thetdaily.case.edu/really-knowearthsinnercoreformed/#:~:text=It%20is%20widely%20accepted%20that,metal%20at%20the%20planet's%20center>
- Daglis, I.A., Thorne, R.M., Baumjohann, W., Orsini, S. (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay, Review of Geophysics, Vol.37: 437–438. <https://doi.org/10.1029/1999RG900009>
- De Groh K K, Banks B A, McCarthy C E, et al. (2008). MISSE 2 PEACE polymers atomic oxygen erosion experiment on the international space station. *High Performance Polymers*, 20(4–5): 388–409.
- Desai, M.I., Giacalone, J. (2016), Large gradual solar energetic particle events, *J. Living ev. Sol. Phys.* 13, 3
- Dungey J.W. (1961). Interplanetary Magnetic Field And The Auroral Zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6, 47.
- Eastwood, J.P., Nakamura, R., Turc, L., Mejnertsen, L., Hesse, M. (2017). The Scientific Foundations of Forecasting Magnetospheric Space Weather. *Space Sci. Rev.*, 212: 1221–1252. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0399-8>
- Ebihara, Y. & Miyoshi, Y. (2011). Dynamic inner magnetosphere: Tutorial and recent advances, in Dynamic Magnetosphere. *IAGA Special Sopron Book Series*, Vol. 3, 145–187. <https://doi:10.1007/978-94-007-0501-2>

- Fang, T.-W., Kubaryk, A., Goldstein, D., Li, Z., Fuller-Rowell, T., Millward, G., et al. (2022). Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022. *Space Weather*, 20, e2022SW003193. <https://doi.org/10.1029/2022SW003193>
- Filawati, S. (2018). Analysis of Electron Flux Condition in Outer Electron Radiation Belt Based On Interplanetary Magnetic Field (Bz) and Solar Wind Speed. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 15.
- Fogwill, C., Hogg, A., Turney, C., & Thomas, Z. (2021). Earth's magnetic field broke down 42,000 years ago and caused massive sudden climate change. *The Conversation*.
- Fujii, R., Fukunishi, H., Kokubun, S., Sugiura, M., Tohyama, F., Hayakawa, H., Tsuruda, K., & Okada, T. (1992). Field-aligned current signatures during the March 13–14, 1989, great magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 97(A7), 10,703–10,715.
- Gonzalez, W. D., Joselyn , J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasylunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, 99 (A4), 5771. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gubby, Robin and Evans, John. 2002. Space Environment Effect and Satellite Design. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64(16):1723–1733. doi:10.1016/S1364-6826(02)00122-0
- Horne, R. B., S. A. Glauert, N. P. Meredith, D. Boscher, V. Maget, D. Heynderickx, and D. Pitchford (2013), Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST, *Space Weather*, 11, 169–186, doi:10.1002/swe.20023.
- i-SPES (2024). Retrieved July 1, 2024, from http://magdas2.i-spes.kyushu-u.ac.jp/figures/MAGDAS_map.png
- Jacobs, J. A. (1953). The earth's inner core. *Nature*, 172, 197–298.
- Jankowski J., and C. Sucksdorff. (1996). Guide For Magnetic Measurements And Observatory Practice. Warsaw.
- Kataoka, Ryuho, et al 2022. Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022. *J. Space Weather Space Clim.* 2022, 12, 41. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022034>
- Kallenrode, M. B. (2004). *Space Physics: An Introduction to Plasmas and Particles in the Heliosphere and Magnetospheres*. 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Kane, R. (2005). How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? *J. Geophys. Res. Atmos.* 110(A2). <https://doi.org/10.1029/2004JA010799>
- Kasran, F. A. M., Jusoh, M. H., Rahim, S. A. E. A., Abdullah, N. (2018). Geomagnetically Induced Currents (GICs) in Equatorial Region. *IEEE 8th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*.
- Lakhina, G. S., Alex, S., Mukherjee, S. & Vichare, G. (2006). On magnetic storms and substorms. *Goa, ILWS WORKSHOP*.
- Leach R D dan Alexander M B. (1996). Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment[J], National Aeronautics & Space Administration Nasa Reference,.
- Livermore, P. W., Finlay, C. C., & Bayliff, M. (2020). Recent north magnetic pole acceleration towards Siberia caused by flux lobe elongation. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0570-9>
- Loewe, C. A., & Prölss, G. W. (1997). Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102(A7):14209–14214. <https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- Lopez, R. E. (1990). Magnetospheric Substorms. *John Hopkins APL Technical Digest*, 11, 3–4.
- Lu , Y., Shao, Q., Yue, H. and Yang ,F., (2019). A Review of the Space Environment Effects on Spacecraft in Different Orbits. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 93473–93488, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927811
- Magson. (2024). Retrieved Juni 14, 2024, from https://www.magson.de/images/magson_fluxgate_sensor_transparent.jpg.
- Michael W. McElwain et al 2023. The James Webb Space Telescope Mission: Optical Telescope Element Design, Development, and Performance. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 135, No.1047.doi 10.1088/1538-3873/acada0
- Musafar L. M, Yatini C. Y , Nuraeni F, Wellyanita V, Winarko A, Juangsih M, Ratnasari E.A, Hasbi W, Utama S. (2021). Pre-Processing Data Magnetometer Satelit Lapan-A3. *Jurnal Sains Dirgantara*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.30536/j.jsd.2020.v19.a3559>
- Nano Avionics (2024). Retrieved Mei 14, 2024, from <https://nanoavionics.com/blog/how-many-satellites-are-in-space/#:~:text=As%20of%20May%20the%204th,to%20dominate%20low%20Earth%20orbit>
- NASA (2024a). Retrieved Mei 14, 2024, from <https://www.nasa.gov/image-article/earths-magnetosphere-4/>

- NASA (2024b). Retrieved Mei 14, 2024, from <http://sec.gsfc.nasa.gov/popscise.jpg>
- Nizam, A. (2012). Analis Potensi Anomali Satelit-Satelit Orbit Rendah dalam Siklus Matahari Ke-23, *Jurnal Sains Dirgantara*, 9(2).
- Mejnertsen, L., Eastwood, J. P., Hietala, H., Schwartz, S. J., & Chittenden, J. P. (2018). Global MHD simulations of the Earth's bow shock shape and motion under variable solar wind conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 259–271. <https://doi.org/10.1002/2017JA024690>.
- Parks, G. K. (2003). *Magnetosphere*. Elsevier.
- Pulkkinen, A., S. Lindahl, A. Viljanen, and R. Pirjola (2005), Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: *Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system, AGUpubs, Volume 3, Issue 8*, August 2005.
- Rathore, B. S., Kaushik, S. C., Bhadaria, R. S., Parashar, K. K., & Gupta, D. C. (2012). Sunspots and geomagnetic storms during solar cycle-23. *Indian Journal of Physics*, 86(7): 263–267. <https://doi.org/10.1007/s12648-012-0106-2>
- Risk Frontiers (2024). Retrieved July 20, 2024. <https://riskfrontiers.com/insights/risks-of-weakening-of-the-earths-magnetic-field/#:~:text=However%20as%20the%20Earth's%20magnetic,every%20living%20thing%20on%20Earth>
- Sabbah, I. (2001). Correction to “The role of interplanetary magnetic field and solar wind in modulating both galactic cosmic rays and geomagnetic activity”. *Geophysical Research Letters*, 28(8), 1669.
- Shergold B. (2023). What causes the magnetic flip or reversal of the Earth's magnetic field? Retrieved Mei 14, 2024 from <https://www.quora.com/What-causes-the-magnetic-flip-or-reversal-of-the-Earths-magnetic-field>
- Singh, A.K., Singh, R.P., & Siinagh, D. (2011). State studies of Earth's plasmasphere: A review. *Planetary and Space Science* 59 (2011) 810–834. <https://doi:10.1016/j.pss.2011.03.013>
- Suryana, R. et al (2021) J. Phys.: Conf. Ser. 1940 012090
- Trigg D. F. (1988). Specifications Of An Ideal Variometer For Magnetic Observatory Applications In: Coles RL (ed). Proceedings of the international workshop on magnetic observatory instruments. *Geological Survey of Canada Paper*, 88–17.

- Triharjanto R. H, Bangkit H, Saifudin A. (2014). Development of Space-based Magnetic Activities Measurement Mission in LAPAN's Micro-Satellites. *Proceeding of 2nd Asia Future Conference*, Indonesia.
- Tsurutani, B. T., W. D. Gonzalez, Y. Kamide, and J. K. Arballo (Eds.). (1997), Magnetic Storms, Geophys. Monogr. Ser., vol. 98, AGU, Washington, D. C. DOI: 10.1029/GM098p0077
- Tsyganenko, N. A., Andreeva, V. A., Sitnov, M. I., & Stephens, G. K. (2022). Magnetosphere Distortions During the "Satellite Killer" Storm of February 3–4, 2022, as Derived From a Hybrid Empirical Model and Archived Data Mining. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(12). <https://doi.org/10.1029/2022JA031006>
- Urry, W. D. (1949). Significance of Radioactivity in Geophysics-Thermal History of The Earth. *Trans . Amer. Geophys. Union*, 30, 171–180.
- Wang, X. Y., Zhang Q. H., Wang, C., Zhang, Y. L., Tang, B. B., Xing, Z. Y., Oksavik, K., Lyons, L. R., Lockwood, M., Zong, Q. G., Li, G. J., Liu, J., Ma, Y. Z., & Wang, Y. (2023). Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field. *Commun Earth Environ*, 4(31). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00700-0>