fenomena cuaca antariksa

Edisi Revisi

sebuah persembahan dari

Pusat Sains Antariksa (Pussainsa)
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

pengantar

Buku ini diterbitkan oleh
Pusat Sains Antariksa LAPAN

ISBN: XXX - XXX - XXX - X

Penulis:
Dyah Rahayu Martiningrum
Adi Purwono
Fitri Nuraeni
Johan Muhamad

Penyunting naskah:
Abdul Rachman

© 2012
Pusat Sains Antariksa LAPAN

Tentang gambar sampul:

Salah satu penampakan Aurora Borealis di atas Bear Lake, Eielson Air Force Base, Alaska. Gambar ini adalah versi suntingan dari foto yang diambil oleh *Senior Airman Joshua Strang* (sumber: Wikipedia).

Puji Syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan petunjukNya, sehingga buku *Fenomena Cuaca Antariksa* edisi revisi ini berhasil diselesaikan. Buku ini merupakan pembaruan dari buku edisi sebelumnya yang telah terbit beberapa tahun yang lalu dengan menambahkan beberapa informasi baru dan mengoreksi beberapa kesalahan yang ditemukan. Kami juga berupaya agar buku ini lebih enak dibaca dengan memperjelas kaitan antar fenomena. Harapan kami buku ini bisa menjelaskan dengan baik mengenai apa dan bagaimana sebenarnya Matahari dan cuaca antariksa mempengaruhi Bumi kita.

Cuaca antariksa menunjukkan kondisi yang terjadi di Matahari dan di ruang antarplanet yang dipengaruhi oleh Matahari. Cuaca antariksa menjadi sangat penting untuk dipahami mengingat makin besarnya ketergantungan manusia pada teknologi yang berbasis antariksa. Cuaca antariksa dapat mempengaruhi orbit dan operasional satelit dan juga astronot yang sedang menjalankan misi ruang angkasanya. Bahkan dalam kehidupan sehari-hari manusia sudah merasakan manfaat dari teknologi yang berbasis antariksa ini, seperti misalnya komunikasi melalui satelit, penentuan posisi berbasis satelit (GPS), bahkan komunikasi radio pun menggunakan lapisan ionosfer yang ada di atas Bumi kita. Bukan hanya pada teknologi berbasis antariksa saja, variasi cuaca antariksa juga mempengaruhi medan magnet Bumi, jaringan listrik, bahkan pada jangka panjang dapat mempengaruhi iklim di Bumi.

Kesadaran masyarakat akan pentingnya cuaca antariksa merupakan suatu kemajuan yang besar dalam pendidikan keantariksaan. Dengan munculnya kesadaran seperti ini diharapkan masyarakat bisa lebih memahami kondisi ataupun fenomena yang terjadi baik di Bumi maupun di lingkungan antariksa. Akan tetapi pemahaman masyarakat seringkali dibelokkan oleh pemberitaan yang tidak benar, sehingga menimbulkan kekhawatiran masyarakat yang berlebihan. Matahari terus beraktivitas sebagaimana biasanya, dan badai Matahari bukanlah suatu peristiwa yang sangat menakutkan. Antisipasi dini merupakan kunci untuk mengantisipasi dampak yang merugikan.

Untuk itulah buku ini menjadi sangat penting artinya dalam memberikan pemahaman yang benar kepada masyarakat tentang fenomena cuaca antariksa. Usaha untuk selalu memperbaharui informasi yang disampaikan kepada masyarakat memang harus selalu dilakukan mengingat ilmu pengetahuan selalu berkembang seiring dengan perkembangan penelitian yang dilakukan oleh para saintis di bidangnya masing-masing. Untuk itu diucapkan terimakasih dan penghargaan atas usaha para peneliti di Pusat Sains Antariksa dengan menerbitkan edisi revisi ini.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat pada kita semua untuk menyikapi berbagai fenomena terutama yang terkait dengan keantariksaan.

Bandung, Nopember 2012
Kepala Pusat Sains Antariksa

Clara Yono Yatini

Daftar Isi

Pengertian cuaca antariksa, 1

Cuaca antariksa ekstrem, 31

Antisipasi cuaca antariksa ekstrem, 33

Jaringan pengamatan dirgantara Pussainsa, 37

Jaringan transfer data pengamatan Pussainsa, 39

Layanan portal Pussainsa, 41

Penutup, 43

Cuaca Antariksa

Cuaca juga terjadi di antariksa namun tidak berupa hujan air atau kondisi langit yang cerah seperti lazimnya di Bumi. Cuaca antariksa meliputi aktivitas Matahari, keadaan di ruang antarplanet (angin surya), magnetosfer, termosfer, dan ionosfer dengan Matahari menjadi sumber penggerak utamanya. Peningkatan aktivitas Matahari secara umum akan mengakibatkan peningkatan kondisi cuaca antariksa yang dapat mengganggu teknologi dan kesehatan bahkan keselamatan manusia.

Bagaimana cuaca antariksa terjadi?

Cuaca antariksa terjadi setiap saat. Matahari senantiasa memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel-partikel bermuatan. Terkadang intensitasnya lebih tinggi saat terjadi fenomena transien di Matahari seperti *flare*, lontaran massa korona (CME), dan lubang korona (*coronal hole*). Di samping berasal dari Matahari, partikel bermuatan bisa juga berupa sinar kosmik yang berasal dari luar tata surya baik dari galaksi kita sendiri atau galaksi lain. Partikel bermuatan dapat berpengaruh secara langsung maupun tidak langsung pada teknologi di antariksa dan di permukaan Bumi.

Efeknya pada teknologi

Cuaca antariksa berpengaruh pada beragam teknologi. Dibanding teknologi lain, satelit dan wahana antariksa lainnya adalah teknologi yang pertama kali akan terganggu. Satelit di ruang antarplanet dan di magnetosfer dapat terganggu akibat interaksi subsistemnya dengan partikel energetik. Di masa depan diperkirakan gangguan semacam ini akan semakin besar. Satelit di termosfer dapat terganggu akibat pening-

katan kerapatan atmosfer karena radiasi sinar-X dan ultraviolet ekstrem (EUV) serta badai geomagnet. Sinar-X dan EUV juga mengionisasi molekul-molekul di atmosfer atas sehingga memperbanyak jumlah elektron yang dapat mengganggu sinyal satelit komunikasi dan navigasi, serta komunikasi radio HF.

Angin Surya

Adalah aliran partikel bermuatan berupa plasma (gas terionisasi) dari Matahari. Angin surya mengalir setiap saat sambil membawa medan magnet Matahari hingga ke tepian tata surya. Angin surya bersama medan magnet ini terpuntir akibat rotasi Matahari sehingga membentuk spiral.

Di permukaan Bumi, terutama di lintang tinggi, cuaca antariksa juga dapat mengakibatkan rusaknya jaringan pembangkit listrik dan memudahkan terjadinya korosi pada pipa bawah tanah akibat arus induksi yang ditimbulkan oleh badai geomagnet.

Efeknya pada manusia

Cuaca antariksa juga dapat menimbulkan ancaman pada kesehatan dan keselamatan astronot terutama yang melakukan misi di luar wahana dan penumpang pesawat terbang yang melewati daerah kutub. Ancaman ini terkait dengan radiasi elektromagnetik dan partikel bermuatan.

IMF (*interplanetary magnetic field*) adalah medan magnet Matahari yang dibawa oleh angin surya memenuhi ruang antarplanet

Efeknya pada iklim di Bumi?

Cuaca antariksa dimungkinkan berpengaruh pada iklim dalam jangka panjang. Salah satu mekanisme yang mungkin adalah terjadinya peningkatan konsentrasi ozon di stratosfer akibat meningkatnya intensitas sinar-X dan EUV di puncak aktivitas Matahari. Peningkatan konsentrasi ozon ini akan mengakibatkan meningkatnya temperatur di permukaan Bumi.

Energi Matahari

Matahari adalah bintang yang terdekat dari Bumi. Seperti halnya bintang yang lain, Matahari memancarkan energi sendiri, yaitu berupa cahaya dan panas. Energi Matahari berasal dari reaksi nuklir yang terjadi di intinya. Energi hasil reaksi di inti terhantar hingga ke permukaan Matahari melalui proses yang kompleks dan lama. Proses inilah yang menjadikan Matahari sebagai bintang aktif penggerak cuaca antariksa.

Melihat Korona

Meskipun jauh lebih panas dari fotosfer, korona lebih redup darinya sehingga tidak tampak dari Bumi kecuali pada saat gerhana matahari. Pada bagian ini, terjadi juga beberapa aktivitas Matahari yang dapat berpengaruh pada cuaca antariksa.

Munculnya aktivitas Matahari

Di daerah konveksi, aliran plasma begitu kompleks sehingga menghasilkan medan magnet yang berfluktuasi sepanjang waktu. Dinamika medan magnet ini sangat aktif sehingga mempengaruhi munculnya beragam aktivitas di Matahari. Aktivitas Matahari ini kadang teramati dari Bumi dan sering mengakibatkan pengaruh besar terhadap kondisi cuaca antariksa secara keseluruhan.

Daerah konveksi

Daerah yang memiliki aliran plasma yang begitu kompleks.

Kromosfer

Lapisan di atas fotosfer yang bersuhu 4.500–25.000 derajat Celcius.

Korona

Lapisan terluar atau atmosfer Matahari yang suhunya mencapai 2 juta derajat Celcius, lebih panas dari fotosfer dan kromosfer.

Granula

luapan plasma seperti gelembung di fotosfer

Daerah radiasi

Daerah bagian terluar inti Matahari hingga jarak sekitar 0,8 jari-jari Matahari. Bagian dasar bersuhu 7 juta derajat Celcius, sedangkan bagian luar 2 juta derajat Celcius.

Fotosfer

Permukaan Matahari yang suhunya mencapai 5700 derajat Celcius.

Inti

Suhunya mencapai 15 juta derajat Celcius dan ukurannya sepertiga jari-jari Matahari.

Lanjutkan membaca "Aktivitas Matahari" di halaman 5

Reaksi di inti Matahari

Di inti Matahari, reaksi fusi nuklir terjadi, yaitu empat inti hidrogen bergabung menjadi satu inti helium. Hasil reaksi itu energi yang sangat besar dalam bentuk gelombang elektromagnetik dan partikel.

Reaksi fusi berantai di Matahari

Proses keluarnya cahaya

Setelah terbentuk di inti, cahaya Matahari melewati beberapa lapisan hingga akhirnya mencapai permukaan. Dari inti, cahaya melewati daerah radiasi. Di daerah ini, cahaya berpindah secara radiasi. Cahaya membutuhkan waktu ratusan ribu tahun untuk melewati daerah ini. Itu karena daerah radiasi merupakan daerah dengan kerapatan sangat tinggi. Keluar dari daerah radiasi, cahaya melewati daerah konveksi. Di sini, cahaya menjalar ke permukaan dengan proses konveksi atau aliran oleh medium plasma. Akhirnya, cahaya sampai di fotosfer atau permukaan Matahari setelah melewati daerah konveksi.

Aktivitas Matahari

Hasil pengamatan Matahari memperlihatkan beragam aktivitas pada bagian-bagian Matahari. Beberapa aktivitas Matahari misalnya *sunspot*, telah diketahui orang sejak ratusan tahun yang lalu. Sebagian lainnya baru diketahui sejak satu abad terakhir seiring kemajuan teknologi pengamatan. Aktivitas Matahari teramati dalam panjang gelombang berbeda dengan melepaskan energi yang berbeda-beda. CME dan *flare* merupakan aktivitas Matahari yang berdampak besar pada kondisi cuaca antariksa karena besarnya energi yang dilepaskan oleh peristiwa tersebut.

Sunspot

Sunspot tampak sebagai bintik hitam di permukaan Matahari. Daerah dengan *sunspot* di Matahari memiliki medan magnet yang sangat besar mencapai 1000-4000 Gauss. *Sunspot* memiliki suhu yang relatif lebih rendah dibandingkan daerah lain di permukaan Matahari sehingga daerah ini terlihat lebih gelap dibandingkan sekelilingnya. *Sunspot* diyakini merupakan penampakan fluks magnet yang menembus permukaan Matahari.

Flare

Flare

adalah ledakan di Matahari akibat bertemunya dua garis gaya magnet yang saling berlawanan (disebut rekoneksi). Selain mampu melepaskan partikel berenergi tinggi terutama proton, *flare* juga memancarkan radiasi gelombang elektromagnetik terutama sinar-X dan UV. Radiasi gelombang EM ini dapat mencapai Bumi hanya dalam waktu sekitar 8 menit, sedangkan proton berenergi tinggi umumnya sekitar 1 jam. *Flare* bersama fenomena lain di Matahari seperti *sunspot*, prominensa dan filamen membentuk daerah aktif (*active region*) di mana medan magnetnya memiliki dua kutub.

Lanjutkan membaca "Siklus Matahari" di halaman 7

Prominensa

Prominensa

merupakan plasma yang terangkat ke atmosfer Matahari dan biasanya berbentuk busur karena mengikuti bentuk garis gaya magnet. Prominensa tampak terang dan panas meskipun sebenarnya lebih dingin dibandingkan kromosfer dan korona. Jika terlihat dari depan, prominensa akan tampak seperti garis yang melintang di Matahari (disebut filamen). Prominensa atau filamen dapat bertahan selama beberapa hari dan dapat terlepas ke angkasa sebagai lontaran massa korona (CME).

Lubang korona adalah daerah berkepadatan plasma rendah di korona Matahari yang medan magnetnya terbuka ke angkasa. Lubang korona adalah sumber angin surya berkecepatan tinggi yang dapat mengakibatkan terjadinya *corotating interaction region* (CIR) di ruang antarplanet. CIR bisa mempercepat partikel dan bisa menimbulkan badai geomagnet.

CME

merupakan singkatan dari *Coronal Mass Ejection* (Lontaran Massa Korona). Saat terjadi CME, sebagian massa korona Matahari terlontar ke angkasa. Jika menggunakan kamera satelit, CME teramati seperti letupan yang menyembur dari Matahari. Energi yang dilepaskan pada peristiwa ini sangat besar karena mengandung massa yang besar dengan kecepatan tinggi. Pada saat terjadi CME, sekitar 2×10^{11} kg hingga 4×10^{13} kg materi korona terlontar dengan energi sebesar 10^{22} Joule hingga 6×10^{24} Joule. Kecepatan materi CME bervariasi dari 20 km/s hingga mencapai 2000 km/s, rata-rata kecepatannya mencapai 350 km/s. CME ini dapat mencapai Bumi dalam waktu 1-5 hari (rata-rata 2-3 hari). Sama halnya *flare*, CME juga mampu mempercepat partikel hingga menjadi relativistik. Bedanya, CME bisa mengakibatkan badai geomagnet setelah tiba di magnetosfer sedang *flare* tidak.

CME yang terlontar dari Matahari dapat menyebabkan badai geomagnet

Cakram koronagraf. Koronagraf adalah alat untuk menciptakan efek gerhana Matahari sehingga korona Matahari dapat terlihat

Siklus Matahari

Selain berputar mengelilingi pusat galaksi, Matahari juga berputar pada porosnya sendiri. Perputaran Matahari pada porosnya sendiri ini disebut rotasi. Periode rotasi Matahari dapat diketahui berdasarkan pengamatan *sunspot*. Dengan melihat pergeseran letak *sunspot* setiap harinya, maka periode rotasi Matahari dapat diperkirakan.

Rotasi diferensial

Jika periode rotasi Bumi sama, baik pada daerah ekuator maupun kutubnya, tidak demikian dengan Matahari. Ini karena wujud Matahari berupa gas. Untuk daerah ekuator satu kali rotasi membutuhkan waktu 25 hari, sedangkan untuk daerah kutub satu kali rotasi membutuhkan waktu 36 hari. Perbedaan kecepatan rotasi untuk daerah dengan lintang yang berbeda di Matahari ini dinamakan sebagai rotasi diferensial. Adanya rotasi diferensial diyakini menyebabkan terpuntirnya medan magnet Matahari sehingga menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan medan magnet di permukaan Matahari ini lah yang menimbulkan fenomena di Matahari seperti *sunspot*, *flare*, dan CME.

SDO (Solar Dynamic Observatory)

Wahana antariksa pengamat Matahari yang terbaru bernama Solar Dynamic Observatory (SDO) merupakan wahana antariksa yang diluncurkan oleh NASA pada tahun 2010. Wahana ini mempunyai misi sebagai sarana untuk memahami dinamika Matahari yang berpengaruh terhadap manusia dan sistem teknologi. Pada wahana SDO ditempatkan beberapa instrumen, seperti AIA (Atmospheric Imaging Assembly), HMI (Helioseismic and Magnetic Imager), dan EVE (Extreme Ultraviolet Variability Experiment).

Puncak siklus
Ada banyak daerah aktif menunjukkan tingginya aktivitas Matahari

Awal fase menurun
menandakan awal meningkatnya jumlah CIR terkait lubang korona

Menjelang akhir siklus
Jumlah daerah aktif jauh berkurang menunjukkan minimnya aktivitas Matahari

Awal siklus
Tidak tampak adanya *flare*

Siklus aktivitas Matahari

Kemunculan *sunspot* tidak hanya berguna dalam menentukan periode rotasi Matahari, tapi juga untuk menentukan tingkat aktivitas Matahari. Jika jumlah *sunspot* di permukaan Matahari banyak berarti aktivitas Matahari tinggi, dan begitu pula sebaliknya. Berdasarkan pengamatan kemunculan *sunspot* selama beratus-ratus tahun, para ilmuwan menemukan bahwa kemunculan *sunspot* memiliki periode tertentu. Artinya, jumlah kemunculan *sunspot* tidaklah bervariasi sembarang terhadap waktu, tetapi teratur seperti sebuah siklus. Inilah yang menjadi indikator bagi siklus aktivitas Matahari.

Jumlah *sunspot* pada siklus ke-23 dan prediksi siklus ke-24

Siklus Matahari dan cuaca antariksa

Periode satu siklus Matahari berkisar antara 9 hingga 13 tahun dengan rata-rata siklus sekitar 11 tahun. Siklus Matahari menunjukkan adanya masa awal, puncak, dan akhir siklus. Aktivitas Matahari saat awal dan akhir siklus cenderung tenang sedang saat di puncak siklus aktivitas Matahari sangat tinggi. Biasanya, saat puncak aktivitas Matahari banyak terjadi ledakan besar di Matahari berupa *flare* dan CME sehingga keduanya sangat mempengaruhi cuaca antariksa. Namun di masa menurunnya aktivitas Matahari bahkan minimum sekalipun, cuaca antariksa tetap perlu diwaspadai terkait dengan CIR dan sinar kosmik yang menjadi lebih berpengaruh. Saat ini Matahari sedang mengalami siklus ke-24. Diperkirakan puncak siklus terjadi pada tahun 2013.

Lanjutkan membaca
"Dampak Aktivitas Matahari"
di halaman 9

Dampak Aktivitas Matahari

Selain memancarkan gelombang elektromagnetik, Matahari juga melepaskan partikel berenergi tinggi. Aliran partikel berenergi tinggi dari Matahari tersebar ke seluruh penjuru tata surya seperti hembusan angin di Bumi. Aliran partikel ini disebut angin surya. Angin surya mengandung partikel-partikel bermuatan listrik yang dapat mempengaruhi dinamika cuaca antariksa. Angin surya dapat berhembus dengan kecepatan yang lebih tinggi dari biasanya setelah terjadi CME atau saat terdapat lubang korona di Matahari.

Semburan radio Matahari

Perubahan jumlah dan laju partikel yang terlontar dari Matahari menyebabkan berubahnya kondisi plasma di atmosfer Matahari. Gangguan ini menyebabkan dipancarkannya gelombang elektromagnetik pada rentang panjang gelombang radio yang disebut semburan radio Matahari (*solar radio burst*). Karakteristik sinyal semburan radio Matahari dapat digunakan untuk menentukan kecepatan partikel berenergi tinggi yang akan sampai ke Bumi. Di LAPAN, peneliti menggunakan radiospektrograf untuk menentukan waktu kedatangan partikel berenergi tinggi ke Bumi.

Radiospektrograf yang dioperasikan di Tanjungsari, Sumedang.

Badai Matahari dan CIR

CME dan *flare* akan menyebabkan peningkatan intensitas dan kecepatan angin surya serta radiasi gelombang elektromagnetik. CME dan *flare* lazim disebut badai Matahari. Badai Matahari bisa langsung berdampak pada wahana antariksa termasuk yang berada di ruang antarplanet (di luar magnetosfer) melalui badai partikel (SPE) atau berdampak secara tidak langsung melalui badai geomagnet jika CME berinteraksi dengan magnetosfer pada kondisi yang tepat. CIR juga bisa langsung berdampak pada wahana antariksa melalui partikel energetik yang ditimbulkannya dan memicu badai geomagnet. Bukan hanya teknologi di ruang angkasa, badai geomagnet juga dapat mengganggu bahkan merusak teknologi di permukaan Bumi. Astronot dan penumpang pesawat yang melintasi daerah kutub bisa terganggu secara langsung akibat radiasi EM dan partikel. Badai geomagnet dapat diikuti dengan badai ionosfer.

Waspada badai Matahari

Dengan menggunakan teleskop, peneliti LAPAN mengamati jumlah dan posisi *sunspot*. Hal ini bermanfaat untuk mengetahui kondisi Matahari. Data jumlah dan posisi *sunspot* juga diperlukan untuk memprediksi kapan terjadinya badai Matahari.

Gangguan sistem dan orbit wahana antariksa

Aktivitas Matahari bisa mengakibatkan anomali satelit. Sebuah proton relativistik yang ditimbulkan oleh badai Matahari dapat langsung merusak komponen elektronik satelit melalui mekanisme *single event upset* (SEU). Elektron energetik (baik yang relativistik maupun yang energinya lebih rendah) dapat menimbulkan pemuaian (*charging*) pada satelit yang jika diikuti dengan pelepasan muatan (*discharging*) dapat mengakibatkan kerusakan fatal. Gangguan cuaca antariksa juga dapat menyebabkan penurunan ketinggian orbit satelit dan berkurangnya akurasi prediksi orbit sehingga meningkatkan resiko tubrukan antar benda buatan.

Medan Magnet Bumi

Bumi merupakan magnet raksasa yang medan magnetnya menjangkau sampai ke luar angkasa. Magnet Bumi disebut geomagnet. Layaknya magnet batang, geomagnet mempunyai kutub Utara-Selatan dan garis-garis gaya magnet. Sifat geomagnet seperti perisai raksasa bagi Bumi. Ia menahan dan membelokkan partikel-partikel bermuatan dan angin surya yang dapat membahayakan manusia dan teknologi yang dikembangkan.

Pembentukan geomagnet

Para ahli memperkirakan bahwa geomagnet berasal dari proses yang terjadi di dalam inti Bumi yang tersusun atas besi dan nikel. Inti Bumi tersusun atas inti dalam yang bersifat padat dan inti luar yang bersifat cair. Inti luar bergerak berputar mengelilingi inti dalam, mengikuti gerakan rotasi Bumi. Di inti luar juga terjadi perpindahan panas secara konveksi. Kedua gerakan inilah yang membangkitkan arus listrik sehingga menghasilkan medan magnet seperti efek dinamo. Proses ini berlangsung terus-menerus dalam kurun waktu sangat lama sehingga menghasilkan geomagnet seperti yang teramati sekarang.

Garis-garis gaya magnet Bumi dapat menjangkau puluhan ribu kilometer.

Pembalikan Kutub Magnet Bumi

Arah orientasi geomagnet dapat mengalami pembalikan. Prosesnya berlangsung selama ribuan tahun dengan ditandai terjadinya pelemahan kuat medan magnet. Saat posisi kutub magnet utara-selatan baru tercapai, fase pemulihan kuat medan magnet terjadi secara cepat. Peristiwa pembalikan kutub magnet sering dihubungkan dengan isu "kiamat" 2012. Berdasarkan rekaman magnetik pada batuan di Bumi, telah terjadi beberapa kali pembalikan kutub magnet dengan peri-

ode sekitar jutaan tahun. Ketika peristiwa ini terjadi, kemungkinan sistem navigasi (penentuan posisi dan arah menggunakan kompas) akan terganggu. Pelemahan kuat medan magnet diperkirakan hanya sepersepuluh dari kuat medan saat ini. Oleh karena itu, peristiwa pembalikan kutub magnet Bumi tidak akan terlalu memberikan dampak pada kehidupan di Bumi. Karena prosesnya berlangsung sangat lama, manusia akan mampu beradaptasi dengan peristiwa ini.

Kutub-kutub magnet Bumi tidak tepat berimpitan dengan kutub-kutub geografi Bumi. Kutub-kutub magnet Bumi berselisih sekitar 11,5° dari kutub geografis dan setiap tahunnya mengalami pergeseran.

Vektor geomagnet

Medan magnet di suatu tempat di permukaan Bumi dapat digambarkan sebagai vektor dengan komponen-komponennya. Ada tujuh komponen geomagnet yang merepresentasikan arah dan besarnya.

Keterangan:

- F : intensitas total medan magnet
- H : komponen horizontal medan magnet Bumi
- Z : komponen vertikal medan magnet Bumi. Z bernilai positif jika mengarah ke bawah
- X : komponen arah utara-selatan Bumi
- Y : komponen arah timur-barat Bumi
- D : sudut deklinasi komponen H dari utara Bumi
- I : sudut inklinasi vektor F terhadap bidang horizontal. I bernilai positif jika mengarah ke bawah

Pengukuran geomagnet

Untuk mengukur nilai mutlak dan variasi geomagnet, kita dapat menggunakan magnetometer landas-Bumi. Terdapat dua macam pengukuran geomagnet, yaitu pengukuran bergerak dan statis. Pengukuran bergerak yang menggunakan dua magnetometer dilakukan untuk survei-survei geofisika. Pengukuran statis dilakukan untuk menentukan variasi medan magnet diurnal (harian) dan non-diurnal, serta menentukan nilai absolut geomagnet. Di LAPAN, para peneliti geomagnet mengukur variasi medan magnet diurnal dan nondiurnal. LAPAN memiliki beberapa stasiun pengamat dirgantara yang mengoperasikan magnetometer untuk pengamatan variasi harian geomagnet di beberapa wilayah Indonesia.

Magnetosfer

Medan magnet Bumi menjangkau ribuan kilometer ke antariksa. Medan magnet ini membentuk daerah magnetik yang menyelubungi Bumi. Daerah ini disebut magnetosfer. Bagi Bumi, magnetosfer seperti perisai yang melindungi dari serangan partikel bermuatan akibat aktivitas Matahari.

Perisai *bow shock*

Ketika aliran angin surya yang memiliki kecepatan supersonik memasuki daerah magnetosfer yang memiliki kecepatan subsonik akan terjadi gelombang kejut berbentuk seperti perisai yang dinamakan *bow shock*. Ketebalan *bow shock* sekitar 100 km sampai 2 kali jari-jari Bumi dan berjarak antara 12 hingga 20 kali jari-jari Bumi dari Bumi. Daerah di belakang *bow shock* yang berisi angin surya yang sudah diperlambat, dipanaskan, dan *turbulent* dinamakan *magnetosheath*.

IGRF (International Geomagnetic Reference Field)

merupakan model magnetosfer yang digunakan untuk menghitung vektor medan magnet di permukaan Bumi hingga ketinggian tertentu. Model IGRF direvisi setiap 5 tahun sekali oleh IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy).

Arus cincin (*ring current*)

Arus cincin yang mengelilingi Bumi pada daerah ekuator terjadi akibat aliran partikel bermuatan dengan arah timur-barat. Jika terjadi rekoneksi pada bagian siang Bumi dalam waktu yang singkat, maka arus cincin hanya akan terbentuk pada daerah yang mengalami rekoneksi tersebut. Jika peristiwa itu berlangsung lama maka arus cincin akan terbentuk sempurna. Akibatnya, rekoneksi arus cincin mengalami penambahan partikel bermuatan sehingga menyebabkan penambahan arus listrik yang akan mempengaruhi komponen H medan magnet. Karena Dst (*disturbance storm time*) dihitung berdasarkan variasi komponen H sehingga jika terjadi perubahan komponen H yang besar akan terlihat dari nilai Dst-nya. Penurunan nilai Dst ini mengindikasikan terjadinya badai geomagnetik.

--Saat terjadi badai Matahari, magnetosfer berperan sebagai perisai Bumi--

Bagaimana bentuk magnetosfer?

Karena adanya tekanan angin surya, magnetosfer berbentuk menyerupai komet. Di bagian yang menghadap Matahari (sisi siang), magnetosfer terkompresi. Garis-garis gaya magnetnya sekitar 10 kali jari-jari Bumi. Pada sisi malam Bumi, magnetosfer membentang hingga 100 kali jari-jari Bumi sehingga bentuknya seperti ekor komet (dinamakan *magnetotail*). Magnetosfer laksana perisai Bumi yang mampu meredam terjangan radiasi berbahaya dari partikel-partikel yang dipancarkan Matahari seperti partikel alfa, beta, dan elektron serta ion berenergi tinggi.

Sabuk radiasi Van Allen

Sabuk Van Allen terdiri atas dua buah sabuk radiasi berbentuk donat yang berisi partikel bermuatan. Proton menempati sabuk dalam sedang elektron menempati sabuk dalam dan luar. Partikel dalam sabuk radiasi ini terperangkap mengikuti garis-garis magnet Bumi di ketinggian sekitar 1000-60.000 km di atas permukaan Bumi. Sebagian sabuk dalam terletak lebih dekat dengan permukaan Bumi yang daerahnya disebut *South Atlantic Anomaly* (SAA). Satelit di orbit rendah yang melintasi SAA (saat ini pusatnya di atas Samudera Atlantik di sebelah timur Brasil), dapat mengalami gangguan.

Badai Geomagnetik

Tidak semua plasma dalam angin surya mampu ditahan oleh magnetosfer. IMF yang mengarah ke selatan dapat menyatu dengan medan magnet Bumi yang mengarah ke utara (mengalami rekoneksi) dan membuka jalan bagi masuknya plasma dalam angin surya ke magnetosfer. Jika terjadi dengan cukup kuat, peristiwa ini mampu melemahkan magnet Bumi sehingga disebut badai geomagnetik. Badai geomagnetik menguatkan terjadinya aurora dan dapat menyebabkan gangguan pada teknologi di luar angkasa maupun di permukaan Bumi. Badai geomagnetik bisa dipicu oleh CME dan CIR namun tidak oleh flare.

Rekoneksi antara dua medan magnet yang berlawanan arah. Bulatan merah adalah partikel

Rekoneksi antara IMF (mengarah ke selatan) dan medan magnet Bumi (mengarah ke utara) di sisi siang memicu terjadinya badai geomagnetik

sebelum

sesudah

Rekoneksi antara sesama medan magnet Bumi di sisi malam memicu terjadinya ekspansi substorm.

Geomagnetically Induced Current (GIC)

Fenomena GIC merupakan salah satu efek dari badai geomagnetik. Ketika terjadi badai geomagnetik besar, akan timbul medan listrik di Bumi yang kemudian menghasilkan medan magnet sekunder yang cukup besar sehingga menghasilkan arus listrik induksi di permukaan Bumi. Arus listrik induksi inilah yang kemudian dikenal sebagai fenomena GIC. Adanya GIC dapat berdampak negatif pada jaringan listrik, telekomunikasi, dan jaringan pipa bawah tanah. Trafo tegangan tinggi pada jaringan listrik menerima beban berlebih dari GIC yang mengakibatkan kerusakan dan gangguan pada keseluruhan jaringan listrik. Selain mengganggu jaringan listrik, GIC juga menyebabkan korosi jaringan pipa bawah tanah secara elektrokimia, serta mempengaruhi jaringan telekomunikasi. Kejadian ini banyak diamati di daerah-daerah lintang tinggi. Kejadian GIC pernah terjadi saat badai geomagnetik sangat kuat pada tahun 1989, yaitu rusaknya pembangkit tenaga listrik Quebec, Kanada.

Mungkinkah GIC terjadi di Indonesia?

Selama ini fenomena GIC baru diamati di daerah-daerah lintang tinggi dan lintang menengah. Hal itu terjadi karena efek dari badai magnetik lebih mempengaruhi lintang-lintang tersebut. Akan tetapi, fenomena badai merupakan kejadian global yang efeknya dirasakan pada semua lintang meskipun dengan intensitas yang berbeda. Karena itu, untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya fenomena GIC di Indonesia maka LAPAN melakukan penelitian tentang fenomena GIC di Indonesia dengan monitoring indeks Dst.

Substorm

merupakan fenomena yang mencakup pengumpulan energi (hasil interaksi magnetosfer dengan angin surya) di magnetotail dan pelepasannya di zona aurora ionosfer (yang tampak sebagai aurora). Substorm terdiri atas 3 fase, yaitu fase pertumbuhan, ekspansi, dan pemulihan. Pada fase pertumbuhan, IMF yang mengarah ke selatan mengakibatkan rekoneksi dengan magnetosfer sisi siang. Peristiwa ini menimbulkan penimbunan energi di magnetotail sehingga akhirnya terjadi rekoneksi di sisi malam akibat bertemunya garis-garis medan magnet yang berlawanan arah. Dari lokasi rekoneksi partikel energetik disemburkan ke arah Bumi dan ke arah yang berlawanan. Semburan ini adalah tanda berlangsungnya fase ekspansi. Setelah energi substorm dilepaskan, fase pemulihan terjadi, yaitu magnetosfer kembali ke kondisi semula secara perlahan.

Substorm fase ekspansi 16

Indeks AE

Indeks AE digunakan untuk mengukur variasi arus di ionosfer yang ditimbulkan oleh *substorm* (dinamakan elektrojet aurora) dan sebagai salah satu cara untuk melacak tingkat aktivitas geomagnetik pada skala global. Indeks AE merupakan jumlah absolut indeks AU dan AL. Indeks AU mengindikasikan arus elektrojet maksimum pada arah timur, sedangkan indeks AL mengindikasikan arus elektrojet maksimum pada arah barat.

Aurora: pertunjukan cahaya di langit

Aurora terjadi karena interaksi partikel bermuatan dari magnetosfer dengan atom dan molekul di daerah kutub menghasilkan pendaran cahaya dalam beberapa warna di langit. Umumnya aurora hanya terlihat di sekitar kutub. Aurora yang terjadi di sekitar kutub utara disebut Aurora Borealis sedangkan di kutub selatan disebut Aurora Australis. Dari Bumi, aurora hanya terlihat di malam hari dan biasanya di sekitar bulan September-Oktober dan Maret-April setiap tahun. Dari luar angkasa, aurora bisa terlihat setiap saat. Saat badai geomagnetik, transfer energi dari angin surya ke magnetosfer bertambah besar. Akibatnya, efek *substorm* juga meningkat sehingga aurora bisa terlihat lebih menawan.

Aurora dilihat dari luar angkasa

Indeks Kp dan K

Keadaan geomagnet dapat diindikasikan oleh indeks Kp dan K. Indeks K mengindikasikan aktifitas magnetosfer dalam lingkup lokal, sedangkan indeks Kp mengindikasikan aktifitas magnetosfer global. Indeks Kp merupakan nilai rata-rata dari indeks K pada seluruh observatorium di lintang menengah. Data indeks Kp dihitung dalam interval waktu setiap 3 jam. Kedua indeks ini dinyatakan dalam skala 0-9. Skala 0 untuk kondisi tenang, sedangkan skala 9 untuk kondisi magnetosfer sangat terganggu. Data indeks K untuk lokal Indonesia dapat diakses melalui situs LAPAN di www.dirgantara-lapan.or.id.

Indeks Dst

Indeks Dst (*disturbance storm time*) merupakan suatu indeks geomagnetik yang menggambarkan kuat vektor geomagnet komponen H (arah utara-selatan geomagnet). Saat terjadi badai geomagnetik, indikasinya adalah penurunan atau pelemahan kuat medan magnet yang mengarah ke utara. Oleh karena itu, indeks Dst mengalami penurunan saat badai geomagnetik. Badai geomagnet kuat ($Dst < -100$) dan sangat kuat ($Dst < -300$ nT) biasanya disebabkan oleh CME. CIR biasanya hanya menghasilkan badai geomagnetik sedang dan lemah ($Dst > -100$ nT). Kadang didapati pula badai geomagnetik yang dipicu oleh CME yang disertai CIR. Beda dengan CME yang waktu badai geomagnetiknya iregular, badai yang dipicu CIR sifatnya periodik dengan periode sekitar 27 hari.

Indeks Dst ini menunjukkan bahwa selama bulan Nopember 2012 terjadi badai sedang pada tanggal 1 dan kuat pada tanggal 14.

Pulsa geomagnetik

Kemunculan pulsa geomagnetik berkorelasi dengan IMF, angin surya, *substorm*, serta aktifitas geomagnet lainnya. Menurut IAGA, pulsa geomagnetik diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *continuous pulsations* (Pc) dan *irregular pulsations* (Pi). Pulsa geomagnetik Pc dan Pi ini dibagi kembali menjadi tujuh sub tipe berdasarkan rentang periodenya. Klasifikasi pulsa geomagnetik ini dapat dilihat pada tabel di samping.

Klasifikasi		Perioda (detik)
Pc	Pc1	0.2 – 5
	Pc2	5 – 10
	Pc3	10 – 45
	Pc4	45 – 150
	Pc5	150 – 600
Pi	Pi1	1 – 40
	Pi2	40 – 150

Aurora Borealis yang terjadi di Alaska, 9 Oktober 2007

Ionosfer

Selain cahaya tampak, Matahari juga memancarkan sinar ultraviolet (UV) yang semakin banyak dengan kejadian *flare*. Radiasi UV inilah yang memunculkan proses fotoionisasi (ionisasi oleh cahaya) di bagian atas atmosfer. Sinar UV akan mengionisasi molekul-molekul di sana sehingga terbentuklah bagian atmosfer yang berisi ion-ion positif dan elektron. Bagian atmosfer inilah yang disebut ionosfer.

Variasi harian dan lapisan ionosfer

Dalam kondisi harian, ionosfer terpengaruh oleh rotasi Bumi. Pada siang hari, saat pancaran radiasi Matahari maksimum, terbentuk empat bagian lapisan ionosfer, yaitu lapisan F2, F1, E, dan D yang masing-masing berurutan dalam ketinggian. Pada malam hari, rekombinasi, kebalikan proses ionisasi, lebih terjadi di lapisan bawah ionosfer (lapisan E dan D) serta lapisan F1 bergabung dengan F2 sehingga hanya ada satu lapisan ionosfer, yaitu lapisan F.

Variasi musiman dan variasi terhadap siklus Matahari

Tidak hanya rotasi Bumi, ionosfer juga dipengaruhi oleh pola musiman dan siklus Matahari. Untuk pola musiman, lapisan D, E, dan F1 mencapai kerapatan elektron tertinggi pada musim panas, sedangkan lapisan F2 mencapai kerapatan elektron tertinggi pada musim dingin. Saat puncak aktivitas Matahari, kerapatan elektron semua lapisan ionosfer meningkat. Sebaliknya, saat aktivitas Matahari menurun, kerapatan elektron semua lapisan ionosfer menurun.

Mengamati Ionosfer

Pengamatan lapisan ionosfer selalu berkembang. Dahulu pengamatan dilakukan dengan roket namun kini yang umum adalah pemancaran gelombang radio. Misalnya, penggunaan radar ionosfer atau ionosonda. Ionosonda memancarkan frekuensi 3 – 30 MHz ke ionosfer. Oleh ionosfer, frekuensi tertentu akan dipantulkan kembali ke ionosonda. Oleh ionosonda, frekuensi balik akan direkam.

Cahaya malam

Pada malam hari, dengan tidak adanya cahaya Matahari, ion-ion di lapisan ionosfer bagian bawah cenderung kembali membentuk molekul netral. Elektron-elektron akan menumbuk ion-ion positif yang kemudian membentuk molekul atau atom netral tak stabil. Proses ini disebut rekombinasi. Sebagian energi hasil reaksi rekombinasi dalam bentuk cahaya tampak yang lemah (merah atau hijau). Cahaya ini disebut *airglow* yang warnanya menunjukkan molekul penyusun suatu lapisan ionosfer dan ketinggiannya.

Pendaran cahaya hijau *airglow* menunjukkan hasil rekombinasi atom oksigen di lapisan D ionosfer

Sejarah Penelitian Ionosfer

Kendati ionosfer memang dihasilkan dari atmosfer atas yang berinteraksi dengan sinar UV, namun penelitian adanya ionosfer bukan berawal dari penelitian tentang ionisasi molekul atmosfer oleh sinar UV. Penelitian ionosfer diawali dengan ditemukannya teori dan perilaku gelombang elektromagnetik, serta komunikasi nirkabel dengan gelombang radio.

Model 3-D ionosfer secara global

Penemuan gelombang radio

Pada tahun 1820, Hans Christian Oersted, seorang ilmuwan Denmark, memperlihatkan jika seutas kawat dialiri arus listrik akan dapat menimbulkan medan magnet. Eksperimen Oersted membuktikan medan listrik menyebabkan medan magnet. Tahun 1864, James Clerk Maxwell secara matematis mengemukakan teori radiasi elektromagnetik dan adanya gelombang radio. 23 tahun kemudian, fisikawan Jerman, Heinrich Hertz, membuktikan teori Maxwell. Hertz dapat mengaplikasikan teori Maxwell bagaimana menghasilkan dan menerima gelombang radio serta perilakunya.

Komunikasi jarak jauh

Temuan Hertz tentang gelombang radio kemudian dimanfaatkan oleh Guglielmo Marconi, seorang Italia yang lahir 25 April 1874, untuk komunikasi tanpa kabel (*wireless*). 12 Desember 1901, Marconi berhasil memancarkan sinyal gelombang radio melintasi lautan Atlantik dari Cornwall (Inggris) ke St. John's, Newfoundland (Kanada) yang berjarak 3380 km. Dari keberhasilannya itu, Marconi membuktikan bahwa sinyal gelombang radio mengalami pemantulan melalui atmosfer terlebih dahulu sebelum diterima oleh penerima gelombang.

Hans Christian Oersted

Atas jasanya, Marconi dianugerahi Nobel pada tahun 1909

Ionosfer terdiri atas beberapa lapisan

Adanya lapisan pemantul gelombang radio di atmosfer membuat para ilmuwan semakin penasaran ingin mengetahui lebih jauh lapisan tersebut. Di antaranya adalah Edward Appleton yang pertama kali mengembangkan ionosonda pada tahun 1924. Dari saat itulah, diketahui adanya ionosfer. Setahun setelah pengembangan ionosonda, Appleton menemukan adanya lapisan pemantul yang lain, yaitu lapisan F ionosfer.

Atas jasanya, Appleton dianugerahi Nobel pada tahun 1947

Ionosfer hari ini

Penelitian tentang ionosfer saat ini sangat penting karena lapisan ini merupakan media perambatan bagi sinyal-sinyal komunikasi satelit dan radio. Tidak hanya ionosonda, radar, roket, dan satelit sekarang digunakan untuk mendukung penelitian ionosfer. Ini karena kondisinya selalu berubah atau dinamis. Radar ionosfer seperti riometer dan *incoherent scatter radar* berguna mengamati absorpsi, kerapatan, suhu, dan komposisi ionosfer. Satelit digunakan untuk mengetahui struktur dan dinamika ionosfer. Saat ini, ionosfer pun sudah dimodelkan dalam 3-D.

Penemuan lapisan pemantul

Tertarik dengan apa yang dilakukan Marconi, Oliver Heaviside dan Arthur Kennelly melakukan penelitian lebih lanjut tentang adanya lapisan pemantul gelombang radio di atmosfer. Tahun 1902, mereka membuktikannya. Atas jasa mereka, lapisan ini dinamakan lapisan Kennelly-Heaviside yang kemudian hari dikenal sebagai lapisan E ionosfer.

Gelombang frekuensi sangat tinggi keluar dari atmosfer

Penelitian Ionosfer di Indonesia

Penelitian ionosfer dimulai LAPAN sejak tahun 1975 yang pada saat itu masih berupa kajian. Selanjutnya, penelitian berkembang dengan pengadaan alat pemantau ionosfer yang disebut ionosonda. Stasiun pertama didirikan di Pameungpeuk yang mengoperasikan ionosonda vertikal dan ionosonda *drift*. Selain di Pameungpeuk, saat ini ionosonda vertikal juga telah dioperasikan di Biak, Pontianak, Manado, dan Kototabang.

Ionosonda

Terdapat tiga jenis ionosonda yang dimiliki oleh LAPAN, yaitu IPS-51, IPS-71, dan CADI. IPS-51 dan IPS-71 adalah ionosonda buatan Australia, sedangkan CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) buatan Kanada. Ketiga ionosonda beroperasi selama 24 jam dengan memancarkan gelombang HF (1–22,6 MHz) setiap 15 menit. Jangkauan pancaran gelombang kedua ionosonda ini hingga ketinggian 90–600 km.

Radar MF (Medium Frequency)

Peralatan MF-Radar bekerja pada frekuensi 1,98 MHz ini digunakan untuk penelitian pola aliran udara atau angin netral pada lapisan mesosfer dan termosfer di ketinggian 60–100 Km (lapisan D dan E ionosfer) di atas ekuator. Radar ini digunakan untuk studi dinamika atmosfer atas.

Radar VHF

Radar VHF LAPAN termasuk jenis radar MST (mesosfer-stratosfer-termsfer). Radar ini dapat dipakai untuk penelitian irregularitas atau ketidakaturan ionosfer pada lapisan E dan F seperti fenomena Es (E Sporadis) dan ESF (*Equatorial Spread F*), serta penelitian VHF-TEP (*Very High Frequency-Trans Equatorial Propagation*) di daerah ekuator.

Ionospheric Scintillation Monitor (ISM)

ISM adalah peralatan pengamatan untuk penelitian sintilasi ionosfer. Pengamatan dan penelitian efek sintilasi ionosfer menggunakan ISM sangat bermanfaat dalam studi geodinamik, survei, pemetaan dan lain-lain.

Airglow Imager

Peralatan *airglow imager* yang kini dioperasikan di Kototabang merupakan hasil kerjasama LAPAN dengan University of Kyoto, Jepang untuk mengamati perilaku atmosfer atas. Alat ini termasuk alat pengamat atmosfer atas secara optik. Hasil dari alat ini adalah data gelombang gravitasi yang menunjukkan adanya transfer energi di daerah atmosfer atas. Selain itu, alat ini mengamati komposisi molekul-molekul di ionosfer bawah dengan menangkap cahaya-cahaya dari lapisan tersebut.

Sistem komunikasi radio HF

Sistem komunikasi radio HF digunakan untuk menguji keberhasilan perambatan gelombang radio melalui ionosfer. Ada dua hal penting yang ingin dicapai dengan sistem komunikasi radio HF ini, yaitu untuk menguji hasil prediksi frekuensi dan digunakan sebagai sarana pengiriman data hasil pengamatan peralatan yang terdapat di stasiun-stasiun LAPAN ke Pussainsa, Bandung.

TEC Meter

Total Electron Content (TEC) meter dioperasikan untuk mengetahui karakteristik ionosfer memanfaatkan teknologi GPS yang relatif lebih handal daripada radiosonda atau balon. Penelitian TEC terkini sudah diaplikasikan ke dunia penerbangan, geodesi, dan navigasi khususnya informasi koreksi posisi pengguna GPS.

Mengamati Ionosfer

Elektron-elektron di masing-masing lapisan ionosfer memiliki frekuensi osilasi tertentu yang bergantung pada kerapatan elektronnya. Gelombang radio yang frekuensinya sama dengan frekuensi osilasi elektron di suatu lapisan ionosfer akan dipantulkan oleh elektron-elektron di lapisan tersebut, sedangkan gelombang radio yang frekuensinya lebih rendah akan diserap dan gelombang radio yang frekuensinya lebih tinggi akan diteruskan. Sifat lapisan ionosfer inilah yang kemudian digunakan oleh peneliti ionosfer untuk memahami karakteristiknya.

Sinyal GPS

Satelit GPS yang berguna untuk navigasi oleh peneliti ionosfer dapat dijadikan perangkat untuk memahami ionosfer. Sinyal gelombang radio satelit GPS akan mengalami pembiasan dan perubahan intensitas ketika melewati ionosfer sebelum akhirnya diterima oleh penerima sinyal GPS di Bumi. Perubahan yang terjadi pada sinyal GPS inilah yang digunakan oleh peneliti ionosfer untuk mempelajari kondisi ionosfer.

Total Electron Content (TEC)

Perubahan yang terjadi pada sinyal GPS ketika melewati ionosfer mengandung informasi kondisi ionosfer. Informasi tersebut adalah jumlah atau kandungan elektron yang ada di ionosfer. Kandungan elektron di ionosfer disebut *total electron content* (TEC). Sinyal GPS akan mengalami *delay time* dan perubahan fase saat melalui ionosfer. Kedua hal ini dapat diketahui dengan menggunakan TEC. Secara kuantitatif, TEC berarti jumlah elektron dalam kolom vertikal berbentuk silinder dengan penampang seluas 1 m^2 sepanjang lintasan sinyal dalam lapisan ionosfer pada ketinggian sekitar 350 km. 1 TEC Unit (TECU) sama dengan 10^{16} elektron/ m^2 . Pada umumnya TEC berkisar antara 1 sampai 200 TECU.

Ionogram

Ionosonda merupakan radar ionosfer yang menggunakan gelombang radio HF, yaitu 2–20 MHz. Ionosonda memancarkan gelombang dengan frekuensi pada *range* tersebut secara vertikal ke atas menuju ionosfer. Gelombang yang frekuensinya sama dengan frekuensi osilasi di suatu lapisan ionosfer akan dipantulkan balik ke Bumi. Oleh ionosonda, frekuensi yang terpantul dari ionosfer akan direkam menjadi jejak frekuensi osilasi dan ketinggian ionosfer. Jejak frekuensi osilasi dan ketinggian ionosfer ini disebut ionogram. Dari ionogram, peneliti akan memperoleh gambaran kondisi lapisan ionosfer.

Memodelkan ionosfer

Berdasarkan data frekuensi tertinggi yang masih dapat dipantulkan di lapisan F2 (foF2) dan TEC di Indonesia dan seluruh stasiun ionosonda di dunia, peneliti ionosfer LAPAN memodelkan ionosfer di atas Indonesia dan sekitarnya. Model ionosfer yang dikembangkan ini berupa model nilai foF2 *near-real time* untuk setiap jam. Selain itu, peneliti ionosfer LAPAN juga mengembangkan model prediksi frekuensi radio HF antara Jakarta dan ibu kota seluruh provinsi di Indonesia. Model nilai TEC Indonesia juga dikembangkan di LAPAN. Sama dengan model foF2, model TEC merupakan model *near-real time* tiap jam. Semua model ini dapat dilihat di situs <http://www.dirgantara-lapan.or.id>.

Lanjutkan membaca "Efek Ionosfer" di halaman 27

Dampak Ketidakteraturan Lapisan Ionosfer

Flare dan CME dengan intensitas besar jika mengarah ke Bumi akan berdampak pada kondisi magnetosfer dan ionosfer. Dampaknya di magnetosfer adalah badai magnetik yang diantaranya dapat merusak jaringan listrik. Di ionosfer, dampaknya adalah perubahan atau dinamika kelistrikan dan kerapatan elektron di sana. Akibat dari dinamika ionosfer ini adalah gangguan sistem teknologi komunikasi dan navigasi. Fenomena inilah yang disebut efek ionosfer pada aplikasi gelombang radio.

Komunikasi radio HF

Komunikasi radio *high frequency*/HF (3–30MHz) memanfaatkan ionosfer sebagai media pemantul dalam propagasi (perambatan) gelombangnya. Meskipun komunikasi ini terlihat sederhana, komunikasi radio HF harus selalu ada dalam sistem komunikasi suatu negara. Ini karena komunikasi radio HF dapat berperan dalam keadaan darurat. Komunikasi ini tidak membutuhkan infrastruktur

yang mahal. Hanya perangkat radio HF, antenna, dan catu daya yang dibutuhkan dalam komunikasi ini.

Komunikasi blackout

Saat *flare* super besar mengarah ke Bumi, Matahari akan memancarkan sinar-X berintensitas sangat tinggi. Dalam waktu sekitar 8 menit, sinar-X ini sudah mencapai ke lapisan D ionosfer. Di lapisan ini sinar-X akan mengionisasi molekul-molekul di sana sehingga kerapatan elektronnya meningkat dengan drastis. Ini akan menyebabkan penyerapan (absorpsi) energi gelombang radio HF, terutama frekuensi rendah, sehingga terjadi pelemahan sinyal (*fading*). Bahkan, peningkatan kerapatan elektron yang sangat besar di lapisan D ionosfer dapat menyerap semua rentang gelombang radio HF. Kondisi ini akan menyebabkan terputusnya komunikasi radio HF.

Fenomena ini disebut *blackout communication* atau *shortwave fadeout* (SWF).

Kemunculan lapisan E sporadis (Es)

Kemunculan lapisan E dapat terjadi pada malam hari, yaitu saat terjadinya hujan meteor dan perubahan transportasi elektron. Fenomena ini disebut E sporadis (Es). Es mempunyai kerapatan elektron yang sangat tinggi sehingga dapat memantulkan gelombang VHF. Oleh karena itu, kemunculan Es dapat menyebabkan interferensi gelombang VHF untuk siaran televisi.

Badai ionosfer

Saat terjadi badai geomagnetik, partikel dan energi elektromagnetik dari CME dan *flare* akan masuk ke lapisan ionosfer Bumi tanpa terhalangi oleh

magnetosfer. Saat partikel dan energi itu masuk ke ionosfer, akan terjadi perubahan dalam skala yang luas pada distribusi kerapatan elektron, kelistrikan, dan TEC di lapisan F ionosfer. Fenomena ini disebut badai ionosfer. Dampak badai ionosfer ada dua, yaitu penurunan (badai ionosfer negatif) dan peningkatan (badai ionosfer positif) kerapatan elektron di lapisan F2. Saat terjadi badai ionosfer negatif, terjadi kerapatan elektron lapisan F2 turun drastis sehingga nilai frekuensi kritis F2 (f_oF_2) juga turun drastis. Efeknya adalah komunikasi radio HF jarak jauh tidak dapat berjalan karena komunikasi tersebut menggunakan frekuensi tinggi. Sebaliknya, badai ionosfer positif bermanfaat bagi komunikasi radio frekuensi tinggi karena meningkatkan kerapatan elektron di ionosfer.

Error atau kesalahan GPS

Error atau kesalahan GPS Satellite GPS digunakan untuk menentukan posisi (navigasi) dan ketinggian suatu objek di Bumi (penerima sinyal GPS). Penentuan posisi didasari pengukuran waktu penjarangan sinyal gelombang radio dari satelit GPS hingga ke penerima sinyal GPS. Untuk mengukur waktu penjarangan tersebut, diperlukan penentu waktu yang akurat pada penerima sinyal GPS. Selain itu, posisi dan ketinggian orbit satelit juga harus diketahui. Kemudian, hal yang tidak

kalah penting adalah menentukan waktu tunda sinyal ketika menjalar melalui atmosfer, yaitu melewati lapisan ionosfer (mengandung partikel bermuatan) dan lapisan troposfer (mengandung uap air). Pemantulan beberapa kali gelombang radio saat dipermukaan Bumi (multipath) juga menjadi faktor kesalahan saat menentukan posisi menggunakan GPS. Dari semua faktor yang menyebabkan kesalahan navigasi GPS, ionosfer adalah yang terbesar.

--Faktor-faktor kesalahan navigasi GPS--

Sintilasi

Cahaya bintang tampak berkelap-kelip disebabkan karena adanya pergerakan dan perubahan kerapatan molekul-molekul di atmosfer Bumi. Sama halnya dengan cahaya bintang, gelombang radio satelit akan mengalami perubahan kuat sinyal dengan cepat ketika melewati ionosfer. Perubahan kuat sinyal ini ditandai dengan perubahan amplitudo dan fase gelombang radio yang dinamakan sintilasi. Sintilasi disebabkan oleh ketidakhomogenan kerapatan elektron di lapisan F atau yang disebut *spread F*. Untuk daerah kutub, penyebab

utama sintilasi adalah *auroral particle precipitation* yang terkait dengan *sub-storm*. Sedang untuk daerah ekuator, sintilasi dapat disebabkan oleh *plasma bubble* yaitu daerah berkerapatan elektron rendah di lapisan F. Seperti halnya *substorm*, *plasma bubble* juga dipengaruhi oleh cuaca antariksa sehingga ditemukan lebih banyak *plasma bubble* saat puncak aktivitas Matahari. Sintilasi yang dapat dialami oleh satelit GPS maupun satelit telekomunikasi juga dapat diindikasikan oleh TEC.

Grafik yang menunjukkan adanya penurunan kerapatan elektron karena *plasma bubble*

Sintilasi pada sinyal salah satu satelit telekomunikasi Indonesia di orbit geostasioner yang tampak pada *spectrum analyzer*. Frekuensi sinyal sekitar 4 GHz.

Saat melewati ionosfer, gelombang radio mengalami sintilasi yang disebabkan oleh *plasma bubble*

Cuaca Antariksa Ekstrem

Telah kita ketahui bahwa cuaca antariksa berpotensi merusak teknologi dan kesehatan bahkan keselamatan manusia. Masalahnya adalah semakin hari kita semakin bergantung pada teknologi yang kita ciptakan sendiri sehingga gangguan sekecil apapun pada teknologi tersebut bisa menimbulkan kecemasan. Tapi, perlukah kita cemas secara berlebihan?

Belajar dari sejarah

Dinamika cuaca antariksa mengakibatkan efeknya senantiasa bervariasi. Umumnya kita yang tinggal di lintang rendah tidak merasakan efek yang ditimbulkan oleh cuaca antariksa tersebut bahkan sejak kita lahir. Mereka yang tinggal di lintang tinggi seperti di Amerika Utara dan Eropa lebih sering merasakan efek itu dalam wujud indahanya Aurora Borealis. Memang terkadang dampaknya fenomenal seperti yang terjadi pada Maret 1989 ketika arus induksi yang berasal dari badai geomagnet merusak pembangkit tenaga listrik di Kanada, Amerika, dan Inggris.

Jika dilihat dari indeks Dst-nya, badai Maret 1989 adalah yang terbesar sejak 1932 dengan nilai Dst mencapai -548 nT. Namun, ternyata badai tersebut bukanlah yang terbesar dalam sejarah, badai yang terjadi pada September 1859 diyakini jauh lebih besar (ada yang memperkirakan Dst-nya mencapai -1760 nT). Untungnya ketika itu manusia belum bergantung pada teknologi seperti sekarang sehingga dampaknya hanya merusak jaringan telegraf yang sedang berkembang saat itu.

Badai super seperti badai Sept 1859 yang terkenal dengan nama *Carrington event* sangat jarang terjadi. Sayangnya catatan sejarah mengenai badai geomagnet yang kita miliki sangat terbatas sehingga sulit memperkirakan periode kejadiannya. Oleh karena itu, tidak ada alasan untuk kece- masan yang berlebihan. Yang diperlukan adalah pemahaman yang lebih baik tentang cuaca antariksa sehingga kita mampu mengantisipasi dampak negatifnya dengan lebih baik.

Tabel 25 badai geomagnet terbesar berdasarkan indeks Dst sejak 1932 hingga 2002.

Date	Time (UT h)	Peak value (nT)
14 Mar. 1989	01	-548
05 Jul. 1941	13	-453
28 Mar. 1946	14	-440
15 Jul. 1959	19	-434
11 Feb. 1958	11	-428
13 Sep. 1957	10	-426
26 May 1967	04	-391
31 Mar. 2001	08	-383
01 Mar. 1941	18	-382
09 Nov. 1991	01	-375
24 Mar. 1940	20	-366
19 Sep. 1941	06	-359
25 Jan. 1938	23	-352
26 Jan. 1949	00	-350
22 Jan. 1938	11	-344
08 Jul. 1958	20	-334
13 Nov. 1960	09	-333
30 Apr. 1960	18	-325
01 Apr. 1960	18	-325
05 Sep. 1957	03	-324
14 Jul. 1982	03	-322
04 Sep. 1958	22	-305
23 Sep. 1957	07	-302
16 Jul. 2000	00	-301
25 Mar. 1991	00	-297

Geomagnetic Storm Effects March 1989

Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours

Transformer Damage

Lanjutkan membaca "Antisipasi Cuaca Antariksa Ekstrem" di halaman 33

Antisipasi Cuaca Antariksa Ekstrem

Untuk mengantisipasi dampak negatif cuaca antariksa, LAPAN, khususnya Pussainsa, membangun sistem peringatan dini bahaya cuaca antariksa ekstrem. Upaya pertama adalah pembangunan sistem pengiriman data dari setiap stasiun pengamatan dirgantara ke peneliti-peneliti di Pussainsa secara *online*. Upaya berikutnya pembangunan ruang monitoring cuaca antariksa untuk menampilkan kondisi Matahari, ruang antarplanet, magnetosfer, dan ionosfer secara *real-time*. Selanjutnya, LAPAN menyebarkan informasi kondisi cuaca antariksa ke pihak-pihak yang membutuhkan informasi ini.

Waspada badai Matahari

Melalui pengoperasian instrumen optik seperti teleskop, LAPAN memantau secara kontinu aktivitas Matahari. LAPAN juga mengoperasikan pengamatan antariksa secara radio seperti spektrograf tipe SN4000 untuk memantau perubahan spektrum yang dihasilkan oleh aktivitas Matahari. Perubahan spektrum ini bermanfaat untuk mengetahui ledakan-ledakan yang terjadi di Matahari melalui gelombang radio yang dipancarkan mengarah ke Bumi. Dengan demikian, semua peristiwa di Matahari yang berpotensi memberikan dampak negatif pada aktivitas manusia dapat segera diketahui.

Waspada badai geomagnetik

Secara *real-time*, data geomagnet dari setiap stasiun pengamatan dikirim ke Pussainsa di Bandung. Selanjutnya, data tersebut diolah menjadi data variasi harian geomagnet, indeks K, pulsa geomagnetik (Pc3, Pc4, dan Pc5), dan polarisasi. Hasil pengolahan indeks K, Pc3, dan Pc5 dijadikan informasi untuk mengetahui aktivitas geomagnet lokal dan global akibat cuaca antariksa. Pemantauan indeks Dst secara *real-time* juga dilakukan oleh LAPAN. Selain itu, peneliti geomagnet LAPAN mengembangkan sistem Deteksi Otomatis SC Badai Geomagnetik untuk mendeteksi badai geomagnetik.

Pemantauan satelit

Saat ini, Indonesia memiliki satelit orbit rendah yang digunakan untuk pemantauan wilayah dan satelit orbit tinggi untuk komunikasi. Semua satelit ini memiliki potensi mengalami kerusakan pada saat terjadi cuaca antariksa ekstrem. Mengantisipasi hal itu, LAPAN mengembangkan alat pemantau lintasan satelit dan perangkat lunak untuk menganalisis cuaca antariksa yang berdampak mengganggu sistem teknologi satelit.

Pengamatan ionosfer secara *real-time*

Ionosfer yang sangat berpengaruh pada penjaran gelombang radio juga tidak luput dari pengamatan secara *online* oleh LAPAN. Ionogram merekam keadaan ionosfer setiap 15 menit dan hasilnya dikirim secara *real-time* dari setiap stasiun pengamatan ke Pussainsa Bandung untuk mengetahui kondisi ionosfer setiap saat. Peneliti ionosfer LAPAN juga mengembangkan model ionosfer berupa peta TEC dan foF2 secara *near real-time*.

Ruang monitoring cuaca antariksa Pussainsa LAPAN

Layanan evaluasi kanal real-time

Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi Pussainsa telah menyiapkan paket program pelayanan yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kanal real time (EKRT) untuk komunikasi radio. Perangkat ini akan terus dikembangkan, sejalan dengan perkembangan hasil penelitian di bidang.

EKRT dapat digunakan sebagai panduan dalam berkomunikasi radio berdasarkan informasi dari data terintegrasi meliputi kondisi matahari, model prediksi, model regional, dan sistem *Automatic Link Establishment (ALE)*.

Jaringan Pengamatan Dirgantara Pusat Sains Antariksa

Pusat Sains Antariksa LAPAN, mempunyai lebih dari 30 instrumentasi penelitian di 8 lokasi pengamatan di Indonesia. Meliputi instrumentasi untuk Bidang Matahari dan Antariksa seperti *radio spectrograph* dan teleskop optik di Tanjungsari dan Watukosek, instrumentasi untuk

Bidang Ionosfer dan Telekomunikasi seperti GPS – GISTM di semua lokasi pengamatan dan Ionosonda di 7 lokasi, dan instrumentasi untuk Bidang Geomagnet Antariksa seperti magnetometer yang terpasang di 6 lokasi pengamatan.

Jaringan Transfer Data Pengamatan Pusat Sains Antariksa

Setiap lokasi pengamatan dilengkapi dengan jaringan VPN (*Virtual Private Network*) berbasis komunikasi via satelit yang bekerjasama dengan PT. Lintasarta. Jaringan transfer data ini menghubungkan tiap instrument yang tersebar di daerah ke pusat data di Bandung. Secara berkala VPN Client mengirimkan data pengamatan dari instrumentasi ke Server di Bandung. Data hasil pengamatan kemudian ditampung dan dikelola dalam Database Server (dapat diakses melalui alamat web <http://foss.dirgantara-lapan.or.id>). WEB Server kemudian menyebarkan informasi

hasil litbang Pusat Sains Antariksa ke internet melalui dua layanan portal yang dapat diakses pada <http://www.dirgantara-lapan.or.id> dan <http://swm.dirgantara-lapan.or.id>. Alamat yang terakhir merupakan layanan monitoring cuaca antariksa yang dibangun dan dikelola untuk memberikan informasi terkini cuaca antariksa yang berguna bagi masyarakat dalam mengantisipasi dampak gangguan cuaca antariksa.

Layanan Portal Pusat Sains Antariksa

Pussainsa memiliki tiga buah portal untuk layanan penelitian. <http://www.dirgantara-lapan.or.id> merupakan portal layanan informasi yang memuat layanan informasi aktifitas Matahari dan kemagnetan Bumi serta prediksi frekuensi komunikasi. <http://swm.dirgantara-lapan.or.id> merupakan layanan portal yang memuat informasi monitoring cuaca antariksa yang selalu menampilkan info terkini ten-

tang keadaan cuaca antariksa dan prediksi gangguan yang mungkin akan timbul. <http://foss.dirgantara-lapan.or.id> merupakan portal yang berisi akses kepada data hasil pengamatan yang sifatnya terbatas dan ditujukan sebagai layanan kepada para peneliti untuk mendapatkan dan bertukar data penelitian.

The image shows a screenshot of the LAPAN Space Weather Monitoring website and a file explorer window. The website is titled "SPACE WEATHER MONITORING" and "NATIONAL INSTITUTE OF AERONAUTICS AND SPACE (LAPAN)". It features a navigation menu with "HOME", "AKTIFITAS MATAHARI", "GEOMAGNET", and "IONOSFER". The main content area displays "KONDISI SAAT INI CUACA ANTARIKSA" (Current Space Weather Conditions) with a table of activities and their status.

Aktivitas	Status	Tanggal Update
MATAHARI	Normal	2012-08-24 12:50:37
IONOSFER	Aktif	2012-08-24 12:50:59
GEOMAGNET	Badai	2012-08-24 12:50:48

The file explorer window shows a directory structure with folders like "beacon", "Disdrometer", "MAWS", "MWIR", "WPR", "beacon-bik", "ktb", "mnd", "mypages", "pmp", "ptk", "tjs", "tjs.sync.run", and "wtik".

<http://www.dirgantara-lapan.or.id>

<http://swm.dirgantara-lapan.or.id>

<http://foss.dirgantara-lapan.or.id>

Penutup

Fenomena cuaca antariksa sangat menarik dan penting untuk dipahami. Alam sejak awal telah menghadirkan berbagai fenomena yang menantang manusia untuk mengembangkan kapasitasnya lebih jauh lagi. Tiga fenomena yakni aurora, *sunspot* (bintik Matahari), dan pergeseran jarum kompas awalnya tidak diketahui keterkaitannya satu sama lain. Seiring berjalannya waktu dan perkembangan pengetahuan dan teknologi, akhirnya kita mengetahui bahwa aurora dan pergeseran jarum kompas sama-sama terkait dengan badai geomagnet yang terjadi karena adanya semburan plasma dari Matahari yang berinteraksi dengan magnetosfer Bumi. Bintik Matahari sendiri adalah indikator aktivitas Matahari. Semakin banyak dan kompleks bintik Matahari-nya maka semakin kuat semburan plasma yang mampu dilontarkan Matahari. Semakin kuat pula penampakan aurora dan pergeseran jarum kompas yang mungkin terjadi.

Manusia telah lama bergaul dengan alam dan mengenal sedikit banyak tabiatnya. Pada dasarnya kita tinggal di Bumi yang nyaman. Jauh lebih sering kita mendapati Bumi dalam keadaannya yang menyenangkan dibanding dalam keadaan “murka” dengan gempa bumi, gunung meletus, tsunami, dan sebagainya. Dan, ketika manusia dengan teknologi ruang angkasanya “menjauh” dari Bumi (dengan berbagai alasan), kita pun semakin mengenal alam ini. Semburan plasma (yang berisi partikel energetik) dan radiasi elektromagnetik mengisi ruang antarplanet dan dapat membahayakan misi luar angkasa dan astronotnya. Selain itu, semburan plasma yang kita kenal dengan CME (dan CIR) bisa juga mengakibatkan badai geomagnet yang bukan hanya dapat merusak teknologi di luar angkasa tapi juga di permukaan Bumi. Selanjutnya, badai geomagnet bisa mengakibatkan badai ionosfer yang mengganggu sinyal telekomunikasi.

Badai Matahari laksana bencana alam lainnya yang kadang kita temui di Bumi. Kebanyakan diantaranya berukuran kecil sehingga umumnya tidak berdampak apa-apa. Frekuensi bencana alam yang super besar sangat kecil. Beda cuaca antariksa dengan bencana alam lainnya adalah pengaruh langsung cuaca antariksa lebih ke teknologi. Badai Matahari, yang kita kenal, yang paling dahsyat sekalipun (seperti *Carrington event*) tidak mengaki-

batkan rumah-rumah dan gedung-gedung hancur, mayat-mayat bergelimpangan di mana-mana tapi yang dipengaruhi adalah teknologi modern yang mungkin kita gunakan sehari-hari. Jaringan listrik dan telekomunikasi (via telepon maupun internet) adalah dua contoh teknologi yang banyak digunakan secara langsung oleh masyarakat dan rawan gangguan cuaca antariksa (selain itu teknologi navigasi berbasis satelit juga semakin populer). Masalahnya adalah semakin hari kita semakin bergantung pada teknologi-teknologi tersebut sehingga kerusakannya sedikit banyak akan berdampak secara ekonomi dan sosial.

Potensi bencana akibat cuaca antariksa tidak perlu menghadirkan keceemasan yang berlebihan. Pertama, badai Matahari atau ledakan Matahari tidak menghancurkan seluruh Matahari karena hanya berupa ledakan di lokasi tertentu yang relatif kecil di Matahari. Kedua, tidak seorang pun tahu kapan badai Matahari super besar akan terjadi sehingga tidak ada alasan untuk mengkhawatirkan tanggal atau periode waktu tertentu. Yang dibutuhkan adalah pemahaman yang lebih baik tentang cuaca antariksa dengan memantaunya secara rutin dan mempersiapkan teknologi cadangan (khususnya terkait komunikasi yang sangat penting dalam keadaan darurat) yang tidak bergantung pada satelit dan ketersediaan listrik. Bagi yang tinggal di lintang rendah, resiko akibat cuaca antariksa memang lebih kecil dibanding bagi mereka di lintang tinggi namun masalah yang timbul di lintang tinggi akan mengimbas ke lintang rendah karena faktor globalisasi. Pemantauan cuaca antariksa perlu dilakukan sepanjang waktu sebab resiko bukan hanya di puncak aktivitas Matahari. Lubang korona dan sinar kosmik yang turut mempengaruhi cuaca antariksa cenderung lebih kuat setelah puncak dan di masa minimum aktivitas Matahari.

Alam pada dasarnya diciptakan untuk manusia. Di alam itu manusia hidup dan beraktivitas dan dengan memahami berbagai fenomena alam termasuk cuaca antariksa manusia telah belajar banyak hal sehingga mampu meningkatkan kemaslahatan hidupnya. Sungguh beruntung seseorang yang dengan pemahamannya tentang alam menjadikan dia lebih bijak dan semakin mengenal penciptanya.

Daftar Pustaka

- Berman, L. & J.C. Evans. 1983. *Exploring the Cosmos*. USA: Little Brown and Company.
- Davies, Ken. 1965. *Ionospheric Radio Propagation*. Washington DC: US Government Printing Office.
- Goodman, J. M. 2005. *Space Weather and Telecommunications*. New York: Springer Science+Business Media, Inc..
- IPS Radio and Space Services Australia. *Introduction to HF Radio Propagation*. <http://www.ips.gov.au>, download 25 Februari 2003.
- Jacobs, J. A. et al. 1964. *Classification of Geomagnetic Micropulsations*. J. Geophys. Res. 69, 180–181.
- Kennel, C.F. 1995. *Convection and Substorm*. New York: Oxford University Press.
- Maltsev, Y. P. 2003. *The Point of Controversy in Magnetic Storm Study (Review)*. *Physics of Auroral Phenomena*. Proc. XXVI Annual Seminar, Apatity, pp. 33–40.
- Menvielle, M. 1998. *Derivation and Dissemination of Geomagnetic Indices*. *Revista Geofisica*, 48, 51–66.
- Muslim, B., dkk. 2007. *Model Sederhana Ionosfer Lintang Rendah Indonesia untuk Parameter foF2 (MSILRI versi 2002)*. Publikasi Ilmiah LAPAN tentang Pengembangan Model Ionosfer Regional Indonesia. Jakarta: LAPAN.
- Suhartini, S. 2007. *Lapisan Ionosfer dan Perambatan Gelombang Radio HF*. Publikasi Ilmiah LAPAN tentang Lapisan Ionosfer, Manajemen Frekuensi, dan Teknis Komunikasi Radio. Jakarta: LAPAN.
- Viljanen, A., A. Pilkkinen & R. Pirjola. 2002. *General Mechanism of Geomagnetically Induced Currents in Power Systems and Pipelines*. Proceedings GA02, p0427, URSI.
- Yumoto, K. 2006. *Studies on Geomagnetic Field and the Relationship with The Sun, Solar Physics Seminar 2006, Natl.Obs.* Malaysia: National Space Agency.

Sumber gambar:

- Cuaca Antariksa:** www.clfloyddesign.com, hesperia.gsfc.nasa.gov, science.nasa.gov
- Karakteristik Matahari:** www.adlerplanetarium.org, www.ias.u-psud.fr, crab0.astr.nthu.edu.tw
- Aktivitas Matahari:** www.astronomycast.com, 1.bp.blogspot.com, blog.nj.com, folk.uio.no, astronomy.neatherd.org, www.space.com
- Siklus Matahari:** apod.nasa.gov, www.sflorg.com, www.nascom.nasa.gov, soho.nascom.nasa.gov/gallery
- Dampak Aktivitas Matahari:** www.dii.unisti.it, govcentral.monster.com, Bidang MIPA PUSPAINS LAPAN
- Medan Magnet Bumi:** focus.aps.org, <http://scienceblogs.com/highlyallochthonous/2008/03/dynamo>, <http://anishmagnetism.files.wordpress.com/2009/01/earth-magfield>
- Magnetosfer:** www.dmi.dk, www.ngdc.noaa.gov, mm04.nasaimages.org
- Badai Geomagnetik:** nasa-mm04.us.archive.org, www.astrosurf.com, http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a010100/a010104/Substorms3_web, www.kva-engineering.com, www.latrobe.edu.au, images.astronet.ru
- Ionosfer:** www.rish.kyoto-u.ac.jp, www.windows.ucar.edu, www.iihr.uiowa.edu
- Penelitian Ionosfer:** woodenspears.com, homepages.tesco.net, phys.bspu.unibel.by, www.gearthblog.com, radiojove.gsfc.nasa.gov
- Penelitian atmosfer di Indonesia:** mediaphotobucket.com
- Mengamati Ionosfer:** www.gisdevelopment.net
- Efek Ionosfer:** www.dnva.no, www.astrosurf.com, people.bath.ac.uk
- Antisipasi Cuaca Antariksa Ekstrem:** govcentral.monster.com, PUSPAINS LAPAN