



CUACA ANTARIKSA

Respon Termosfer-Ionosfer Akibat Badai Magnet

Oleh

L.M. Musafar | Pussainsa LAPAN

Badai magnet ditimbulkan oleh datangnya awan plasma panas yang berasal dari Matahari ke lingkungan Bumi. Awan plasma panas tersebut, misalnya dapat berupa partikel-partikel dari lontaran massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*). Angin Surya membawa sejumlah energi dan momentum, yang dapat mencapai energi tinggi. Sejumlah energi tersebut ditranspor ke dalam lingkungan antariksa dan atmosfer Bumi melalui berbagai proses fisis. Magnetosfer menyaring energi angin surya, dan memodulasi elektrodinamika serta energi dan momentum partikel yang akan tertimbun di atmosfer atas. Peristiwa transfer momentum dan energi ini dapat mempengaruhi temperatur, angin netral, komposisi partikel netral

maupun plasma serta sifat-sifat elektrodinamika di daerah atmosfer atas.

Peristiwa badai magnet pada umumnya diikuti oleh peningkatan aktivitas substorm. Selama berlangsungnya badai magnet atau *substorm* magnetosferik, partikel-partikel bermuatan terinjeksi ke dalam lingkungan magnetosfer Bumi. Partikel-partikel tersebut selanjutnya terjebak dalam medan magnet Bumi dan bergerak bolak-balik dari satu belahan Bumi menuju belahan Bumi lainnya. Gerak bolak-balik ini ditentukan oleh lokasi titik pantul magnetik dari partikel tersebut. Ketika lokasi titik pantul tersebut berada pada ketinggian ionosferik/atmosferik maka partikel tersebut akan bertumbukan dengan partikel ionosferik/atmosferik. Terjadinya pertukaran momentum antara

dua partikel yang saling bertumbukan tersebut mengakibatkan partikel magnetosferik tidak lagi kembali menuju magnetosfer namun terserap dalam ionosfer Bumi. Proses tumbukan tersebut juga mengakibatkan terjadinya energisasi partikel-partikel ionosferik.

Partikel yang terinjeksi ini membawa sejumlah energi dan momentum dan jumlah tersebut mengalami peningkatan selama badai magnet atau *substorm* magnetosfer. Energi yang bersumber dari daerah magnetosfer ini sangat besar. Akan tetapi, hingga saat ini belum ada cara untuk menghitung atau mengukur berapa banyak energi yang terkandung dalam magnetosfer.

Yang dapat dilakukan saat ini adalah mengukur respon atmosferik terhadap badai

magnet. Pengukuran tersebut dapat dilakukan menggunakan satelit dengan *Low Earth Orbit* (LEO). Konsekuensi dari injeksi energi dan partikel magnetosferik ke atmosfer atas adalah terjadinya proses ekspansi termal dan peningkatan kerapatan atmosferik. Secara fisis, peningkatan kerapatan dapat menjadi tanda adanya peristiwa ekspansi termal. Oleh karena itu, pengukuran kerapatan partikel pada ketinggian atmosfer atas dapat menjadi acuan bagi estimasi jumlah injeksi energi magnetosferik menuju atmosfer atas. Selain itu, proses injeksi energi menuju atmosfer atas dapat diamati melalui jumlah pendinginan molekul netral, misalnya pendinginan nitrogen mono oksida (NO). Selama aktivitas geomagnet tenang, jumlah energi partikel yang tertimbun pada zona aurora mencapai 10-20 gigawatt, sedangkan pada selama badai magnet dapat mencapai 200 gigawatt pada kutub di kedua belahan Bumi.

Ada mekanisme lain yang dominan dalam proses injeksi energi, yaitu proses pemanasan Joule atau pemanasan friksional. Proses ini dapat menghasilkan energi dalam jumlah lebih dari 1000 gigawatt pada kedua belahan Bumi. Total energi yang dihasilkan dalam semua proses tersebut mencapai 2-3 terawatt. Jumlah energi ini sangat besar dibandingkan daya yang dihasilkan oleh radiasi Matahari, termasuk pemanasan akibat flare besar. Jumlah energi input sebesar ini dapat terjadi selama badai magnet. Selain pemanasan Joule, energi kinetik partikel magnetosfer dapat juga terinjeksi melalui aksi gaya $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ atau *ion drag*. Jumlah injeksi energi terkait

ion drag adalah 10-15% dari total pemanasan Joule. Energi kinetik mengalami disipasi terhadap waktu akibat viskositas dan *ion drag* yang mengkonversi energi kinetik energi termal internal dari gas netral.

Pada sisi lain, terdapat konveksi medan listrik pada daerah lintang tinggi yang juga membawa energi magnetosferik. Peristiwa konveksi ini digerakkan oleh parameter angin surya dan medan magnet antarplanet serta pola presipitasi aurora. Efek dari proses ini mirip dengan peningkatan kerapatan atmosferik yang timbul akibat pemanasan Joule dan pemanasan partikel aurora.

Jika peningkatan kerapatan dapat menjadi indikator bagi proses injeksi energi, maka sebaliknya, proses pemulihan kerapatan gas netral yang berlangsung cepat dapat menjadi tolok ukur bagi proses *thermal loss*. Salah satu dari proses *thermal loss* di atmosfer atas adalah konduksi termal dalam arah vertikal dari menuju atmosfer bawah yang temperaturnya lebih rendah. Ada pula proses lain yang memiliki kebergantungan terhadap waktu yang dikenal dengan pendinginan radiatif inframerah oleh molekul NO. Hal ini dapat terjadi karena (a) efek presipitasi partikel selama badai magnet di zona aurora mengakibatkan peningkatan produksi NO melalui proses disosiasi dan ionisasi nitrogen molekular dan (b) efek relaksasi vibrasional atom O dalam NO yang dapat tereksitasi akibat perubahan temperatur.

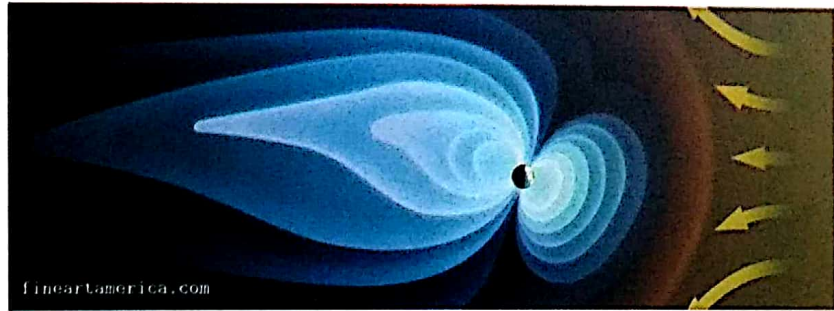
Telah lazim diketahui bahwa kemunculan aurora merupakan manifestasi visual dari sebuah badai magnet. Akan tetapi, jumlah energi dalam presipitasi

aurora hanya sekitar 20% dari fluks energi selama badai magnet yang terinjeksi menuju ionosfer maupun atmosfer atas. Walaupun jumlah energi dalam presipitasi aurora tidak dominan namun ionisasi atmosfer zona aurora berperan penting dalam proses transfer energi elektromagnetik. Proses presipitasi ini menjadi efektif apabila terjadi peningkatan kerapatan plasma lapisan E ionosfer yang mengakibatkan peningkatan konduktivitas dan disipasi Joule akibat arus listrik yang mengalir di zona aurora. Energi yang dihasilkan dalam jauh lebih besar dibandingkan energi yang di bawa oleh partikel pada daerah tersebut.

Gerak *ion drift* di atmosfer atas berlangsung cukup lambat karena seringnya terjadi peristiwa tumbukan pada daerah tersebut. Selama badai magnet yang diakibatkan CME, kecepatan *ion drift* mengalami peningkatan besar hingga mencapai ribuan meter/detik pada ketinggian puncak lapisan F. Pada daerah lintang tinggi, ini terjadi karena plasma ionosferik secara langsung memberi respon terhadap medan listrik magnetosfer. Selain itu, selama badai magnet juga terjadi deplesi besar pada kerapatan plasma mengalami deplesi cukup besar, padahal pada saat yang sama juga terjadi peningkatan ionisasi di zona aurora. Deplesi ini diakibatkan perubahan komposisi partikel netral akibat pemanasan Joule. Gerak *up-welling* mengakibatkan peningkatan jenis molekul netral yang menggambarkan terjadinya peningkatan jumlah *loss* partikel-partikel ionosferik. Kecepatan angin netral di lintang

tinggi mengalami peningkatan terhadap peningkatan konveksi magnetosferik, padahal peristiwa tumbukan jarang terjadi. Jadi, harus ada sumber momentum untuk mengakibatkan peningkatan kecepatan angin netral. Pada belahan Bumi selatan ada dua vorteks angin netral. Salah satu dari vorteks tersebut sangat kuat pada sektor senja yang berlawanan arah jarum jam atau anti siklon. Vorteks ini beresonansi inersia dengan konveksi ion dan partikel netral sehingga peningkatan pemanasan Joule mengakibatkan terjadinya peningkatan temperatur pada daerah ini. Vorteks lainnya adalah vorteks siklon pada sektor fajar. Vorteks ini bersifat lebih lemah dan tidak beresonansi dengan gerak plasma. Vorteks sektor fajar selalu divergen dan membentuk daerah dingin berkepadatan rendah selama terjadinya pemanasan Joule.

Di daerah ionosfer bagian bawah, tumbukan antara molekul netral dan ion lebih sering terjadi. Gaya inersia komponen netral atmosferik bersifat lebih masif dibandingkan gaya kolisional yang mengalami peningkatan. Efek gerak ion nyaris tidak terlihat pada ketinggian ini. Kecepatan angin pada ketinggian ini lebih kecil dibandingkan daerah di atasnya. Daerah ionosfer bagian bawah merupakan daerah dimana *difusi eddy* bercampur dan meredam angin netral, dan di termosfer bawah proses difusi molekuler berlangsung lambat karena memiliki kerapatan lebih tinggi. Akibatnya, momentum angin netral terdisipasi lambat. Akan tetapi, selama badai magnet, kecepatan angin dapat mengalami peningkatan yang dapat melebihi drift ion. Peningkatan ini dapat



terkait dengan peningkatan medan listrik selama badai magnet. Peningkatan kecepatan angin dan konduktivitas menghasilkan aksi dinamo yang dapat menggerakkan gaya elektromagnetik atau fluks Poynting dari termosfer bawah ke menuju magnetosfer. Akan tetapi, total daya yang dihasilkan cukup kecil dibandingkan fluks yang dibangkitkan oleh angin surya selama fasa badai magnet sehingga dampak aksi dinamo ini terhadap magnetosfer cukup kecil.

Perubahan dinamis selama badai magnet juga menimbulkan sejumlah proses fisis di atmosfer atas. Peningkatan angin meridian di lintang tengah mendorong plasma ke arah sejajar medan magnet menuju daerah dengan komposisi partikel netral berbeda. Selain itu, sirkulasi global juga membawa molekul-molekul dari termosfer bawah ke arah atas dan arah ekuator. Akibatnya, terjadi perubahan rasio jumlah atom netral terhadap molekular netral, dan juga mengakibatkan perubahan laju loss ionosfer. Proses fisis terkait perubahan komposisi ini mirip dengan proses dalam sirkulasi musiman antarhemisfer yang menciptakan struktur komposisi global. Sistem angin yang terjadi selama badai magnet juga menimbulkan gangguan dinamo dan melalui proses transpor plasma disturbansi ini dapat memodifikasi kekuatan dan

lokasi *equatorial ionospheric anomaly* (EIA).

Aspek lain dari efek badai magnet terhadap dinamika global atmosfer atas terkait dengan pemanasan di lintang tinggi. Termosfer diketahui sebagai medium yang cukup lembam. Akan tetapi medium tersebut dapat mendukung terciptanya gelombang gravitasi skala besar. Gelombang skala besar ini memiliki kecepatan tinggi sehingga dapat menyebar secara global dalam waktu cukup singkat. Munculnya gelombang skala besar tersebut dapat diawali oleh adanya paksaan impulsif yang berasal dari lintang tinggi yang kemungkinan diakibatkan oleh pemanasan di lintang aurora. Gelombang ini menghasilkan mekanisme yang mampu untuk mentransmisi efek dari perubahan tekanan ke seluruh belahan Bumi.

Tulisan ini hanya membahas sebagian kecil dari fenomena atau proses termosferik dan ionosferik yang dipengaruhi badai magnet. Masih fenomena lainnya, seperti respon komposisi partikel netral penyusun atmosferik dan ionosferik serta respon elektrodinamika dan plasma yang terkait dengan fenomena-fenomena menarik di ionosfer seperti terciptanya *composition bulge* dan SED (*storm-enhanced density*) yang berkaitan dengan SAPS (*sub-auroral polarization stream*).