

AKTIVITAS MATAHARI SEBAGAI SUMBER PENYEBAB PERUBAHAN GLOBAL DALAM SISTEM MATAHARI - BUMI

Suratno dan Mezak A. Ratag
*Bidang Penelitian Matahari dan Lingkungan Antariksa
Puslitbang Pengetahuan Ionosfer LAPAN*

Ringkasan

Penelitian aktivitas matahari sebagai sumber energi dan gangguan mencakup penelitian tentang pengaruh variabilitas matahari pada sifat-sifat fisika dan kimia atmosfer, mekanisme-mekanisme pembangkitan emisi elektromagnetik dan korpuskular di permukaan matahari dan di atmosfer Bumi, mekanisme transfer massa, momentum dan energi matahari yang menembus sistem kebumihan.

Penelitian atmosfer bumi yang berkaitan dengan datangnya energi dan gangguan mencakup penelitian tentang kopliling ionosfer-termosfer dan responnya terhadap masukan energi dan momentum serta transfer energi dan massa di media antar planet dan sistem magnetosfer-ionosfer.

Abstract

A study of solar activity as a source of energy and disturbance involves the effect of solar variability on the atmosphere's physics and chemistry, the mechanisms of electromagnetic and corpuscular emission generation on the sun and in the earth atmosphere, and the mechanisms of mass, momentum, and energy transfer from the sun to the terrestrial system.

The researches of the Earth's atmosphere related to the incoming energy and disturbance from the Sun include the research of ionosphere-thermosphere coupling, their response to the energy and momentum input, and mass and energy transferred in the interplanetary medium and in the magnetosphere-ionosphere system.

1. Pendahuluan.

Matahari secara kontinyu memancarkan radiasi elektromagnetik dan partikel serta merupakan sumber utama energi bagi bumi dan atmosfernya. Aktivitas matahari mengakibatkan bervariasinya radiasi energi dan partikel dan akan berpengaruh pada komposisi, kondisi fisik dan dinamika atmosfer bumi. Dalam hal radiasi elektro-magnetik, disamping sinar tampak spektrum emisi ekstrem yang berperan pada efek atmosfer adalah sinar-X, Ultra-violet Ekstrem (EUV), Ultra-violet (UV) dan Infra-Merah (IR) (Hunt, B.G., 1988; Brasseur & Verstaete, 1988). Radiasi matahari secara total bervariasi dalam ukuran waktu dari menit sampai tahun. Untuk ukuran waktu panjang terdapat korelasi yang kuat antara luminositas dan tingkat aktivitas matahari. Dalam kaitannya dengan atmosfer bumi, uji statistik dalam selang waktu 3-4 dekade yang lalu menunjukkan bahwa periodisitas atmosfer 10-12 tahun sefasa dengan siklus 11 tahun matahari (Svestka, 1976). Akan tetapi, belum ada mekanisme fisis yang telah teridentifikasi guna menjelaskan hubungan kausal tersebut.

Flare matahari terpicu oleh kompleksitas magnetik dan menghasilkan semburan radiasi elektromagnetik dan partikel berenergi tinggi. Untuk flare besar partikel berenergi tinggi dapat menembus permukaan bumi. Aktivitas matahari yang lain seperti munculnya kelompok-kelompok bintik matahari, prominens, dan plage adalah bentuk aktivitas matahari lain yang juga dikendalikan oleh medan magnetik matahari yang bervariasi (hampir) periodik dengan siklus 11 atau 22 tahun (Svestka, 1976).

Walaupun hanya dalam fraksi yang relatif kecil dibandingkan dengan energi total radiasi matahari, pancaran korpuskular dari matahari dapat menyebabkan pengaruh yang penting di lapisan atmosfer bumi. Arus energinya mengalami proses-proses dinamik khususnya transfer massa, energi dan momentum yang masih memerlukan penelitian dan studi teoritis lebih lanjut.

Angin surya merupakan aliran plasma panas yang secara kontinu keluar dari korona membawa medan magnetik jauh di luar heliosfer dan menyebabkan pengaruh besar di lapisan magnetosfer bumi (O'Mara, 1980). Gejala-gejala yang dapat dideteksi dari permukaan bumi seperti aurora, badai magnetik dan badai kecil aurora menunjukkan bahwa magnetosfer dikendalikan oleh aktivitas matahari. Demikian pula struktur medan magnetik dan distribusi plasma yang dikandungnya dapat mengalami perubahan secara global. Oleh karena itu mekanisme fisis injeksi angin matahari ke sistem magnetosfer dan ionosfer perlu dikaji lebih lanjut.

Sistem berikutnya yang perlu dikaji adalah sistem ionosfer-termosfer. Sistem ini dikontrol oleh masukan energi dari atas dan dari bawah yang bervariasi sangat tinggi. Transfer energi dan momentum dari atas melalui magnetosfer dan dari bawah melalui atmosfer merupakan penyebab perubahan-perubahan parameter di daerah ini. Energi matahari pada rentang panjang gelombang dibawah 300 nm sangat menentukan struktur dasar, sifat-sifat kimia, termal dan dinamika lapisan ionosfer. Proses ionisasi, transfer energi dan momentum, kuat medan magnet yang berubah-ubah berpengaruh pada temperatur dan komposisi ion. Pada waktu terjadi aktivitas magnetik yang kuat, yang terbawa oleh angin matahari atau badai magnetosfer, energi ditransfer ke daerah teratas sistem ionosfer-termosfer. Energi ini kadang-kadang melebihi energi radiasi elektromagnetik matahari. Transfer energi magnetosferik ini antara lain berupa transfer energi melalui proses pemanasan *Joule* (disipasi arus listrik di ionosfer), pemanasan oleh presitipasi partikel ke atmosfer, serta proses hantaran momentum ke gas-gas netral dari ion-ion di ionosfer yang mengalami pergeseran dalam medan listrik yang dikendalikan oleh interaksi angin matahari dengan magnetosfer.

Pemanasan ozon di stratosfer dan uap air di troposfer menjalar ke atas ke termosfer bawah mengakibatkan terjadinya sirkulasi global di daerah ini. Propagasi gelombang planetari dan gelombang pasang surut mampu menembus sampai termosfer atas, mengubah komposisi kimia dan struktur termal atmosfer.

Atmosfer tengah juga memberikan tanggapan terhadap perubahan aktivitas matahari dan aktivitas di permukaan bumi seperti aktivitas vulkanik, tektonik, meteorologi, antropogenik, dan biosfer. Fluks ultraviolet yang sebagian besar diserap oleh atmosfer tengah, mengendalikan konsentrasi ozon dan struktur temperatur di lapisan tersebut. Di lain pihak, energi kinetik dan momentum serta radiasi dari troposfer dihantarkan ke atmosfer tengah yang juga berpengaruh pada struktur

temperaturnya. Reaksi balik ke atmosfer bawah, mempengaruhi struktur suhu di troposfer dan diduga berpengaruh pada pola iklim di permukaan bumi (Crowder, 1995). Oleh karena itu perlu dipelajari dan dilakukan penelitian lebih mendalam tentang aktivitas matahari dan keterkaitannya dengan perubahan-perubahan fisis atmosfer bumi.

2. Pengaruh Variabilitas Matahari pada Lingkungan Hidup

Dalam upaya memperoleh diagnosis lengkap mengenai osilasi 10-12 tahun atmosfer yang diduga bersumber dari aktivitas matahari, perlu dipelajari mekanisme fisis respons atmosfer terhadap siklus 11 tahun aktivitas matahari dalam kaitannya dengan perubahan global troposfer dan stratosfer. Di samping itu perlu diselidiki pula tanggapan elemen-elemen troposfer terhadap datangnya lontaran masa korona (*coronal mass ejection*), hantakan angin matahari (*solar wind shocks*) dan struktur sektor magnetiknya, serta *solar flare* dan perubahan untuk jangka pendek.

Forcing matahari termasuk timbulnya gangguan atmosfer atas karena pengaruh aktivitas matahari sangat berperan di ketinggian diatas 100 km. Pada ketinggian ini mekanisme yang mendasar adalah transfer energi *solar-terrestrial* seperti absorpsi EUV, UV, radiasi korpuskular dan kontribusinya pada pemanasan global, dan proses-proses penyebab perubahan komposisi kimia (Dickinson, 1986). Walaupun secara statistik telah terungkap korelasi kuat antara periodisitas atmosfer dan variabilitas matahari, namun mekanisme fisis transfer energi ke atmosfer bawah masih belum dapat diterangkan (Friis-Christensen & Lassen, 1992). Untuk itu perlu diungkapkan mekanisme fisis dan atau mekanisme kimiawi yang berkaitan dengan propagasi keluaran variabilitas matahari ke bawah ke daerah atmosfer rendah. Jika dapat dijelaskan mekanisme-mekanisme tentang korelasi statistik antara periodisitas (10-12 tahun) atmosfer dan variabilitas matahari maka pemantauan variabilitas matahari dapat digunakan untuk memperoleh prakiraan iklim jangka panjang dan peningkatan akurasi prediksi cuaca dan iklim global dan regional.

3. Matahari Sebagai Pembangkit Tenaga dan Sumber Gangguan

Untuk meningkatkan pemahaman proses fisis pembangkitan energi di dan di bawah permukaan matahari, penyimpanan energi, proses-proses emisi dan konversi serta kecepatan gangguan yang ditimbulkan, *pertama* perlu mengamati secara terus-menerus fenomena-fenomena yang terjadi di permukaan matahari seperti bintik matahari, flare, prominens, granulasi dan fenomena-fenomena yang lain. *Kedua*, kita perlu mempelajari dan melakukan penelitian tentang dinamika plasma dan medan elektromagnet serta fenomena rotasi diferensial, konveksi, gerak bintik matahari dalam kaitannya dengan aktivitas flare.

Pengamatan variasi radiasi matahari pada pita gelombang sinar-X, EUV, UV, sinar tampak, infra merah dan pada pita gelombang radio serta partikel-partikel terlempar baik dalam skala waktu pendek maupun skala waktu panjang juga perlu dilakukan secara terus menerus. Hal itu perlu dilakukan guna mengetahui variabilitas matahari dan pengaruhnya pada cuaca terestrial yang pada dasarnya dikendalikan oleh fluks foton dari matahari. Perubahan-perubahan kecil pada iradiansi total matahari (atau perubahan iradiansi spektral pada pita-pita kritis misalnya EUV,

UV dan sinar *X*) dapat mengakibatkan perubahan sistem atmosfer bumi. Pengamatan dapat dilakukan dari udara dan darat. Pengamatan dari udara dilakukan dengan misi pesawat ruang angkasa, satelit, dan peralatan pengamatan melalui roket dan balon. Pengamatan darat dilakukan melalui observatorium optik dan radio. Di samping itu perlu dipantau pula radiasi elektromagnetik bintang-bintang yang sejenis dengan matahari.

4. Respons Atmosfer Tengah Terhadap *Forcing* Atas dan Bawah

Fluktuasi keluaran energi elektromagnetik matahari khususnya pada pita gelombang Ultra-violet dan pita gelombang yang lebih pendek berperan sebagai *forcing* atmosfer tengah melalui proses-proses fotokimia. Disamping energi gelombang, masuknya partikel-partikel energetik, angin matahari, dan energi magnetik juga berpengaruh pada atmosfer tengah.

Perpindahan energi kinetik dan momentum dari troposfer bawah ke atmosfer tengah merupakan *forcing* dari bawah ke atas. Perpindahan energi tersebut pada awalnya disebabkan oleh radiasi matahari yang merupakan transformasi troposfer melalui proses-proses meteorologis, biologis dan antropogenik. Bentuk *forcing* yang lain adalah adanya gelombang gravitasi yang berasal dari atmosfer bawah, yaitu gelombang planetari, gelombang *Rossby*, pasang surut, troposfer *Miscellaneous* dan *forcing* tropis (*QBO: Quasi Biennial Oscillation* dan *SAO: Semi Annual Oscillation*). Pasang-surut atmosfer adalah gerakan global yang disebabkan oleh gaya tarik matahari dan bulan. Gelombang planetari ditimbulkan oleh hembusan angin melalui orografi dan tidak meratanya tekanan termal geografis. Daerah-daerah ekuator sangat berperan pada perilaku atmosfer tengah secara global. Hampir semua volume udara yang masuk ke lapisan stratosfer dari atmosfer bawah datang melalui daerah ekuator (Hunt, 1988).

5. Kopling Ionosfer-Termosfer dan Responnya Terhadap Masukan Energi dan Momentum

Lapisan ionosfer merupakan lapisan plasma yang terbagi atas beberapa daerah yaitu daerah D, E dan daerah F, yang masing-masing memiliki karakteristik tertentu. Konveksi di daerah E dan F dikendalikan oleh plasma dan medan angin netral dan evolusinya melalui medan magnet yang menghubungkan kedua lapisan tersebut. Perlu dipahami sumber dan potensi rosot (*sink*) dari struktur kerapatan dan kecepatan plasma. Hal lain yang perlu dipelajari adalah perubahan struktur plasma di lapisan tersebut oleh datangnya radiasi *EUV* dan partikel berenergi tinggi dari matahari; hukum-hukum Resonator Alfvén Ionosfer dan Lapisan Turbulensi Plasma di atmosfer; pengaruh proses-proses gelombang pada fenomena atmosferik alami dan buatan; implementasi teknik diagnostik baru tentang ionosfer; hukum-hukum tingkatan/kekuatan relatif gelombang *HM*, gelombang gravitasi atmosfer, dan lain-lain hantaran energi dan pengaruh-pengaruh aktivitas matahari.

Berbagai peralatan yang digunakan untuk pengamatan yaitu MU-Radar untuk pengukuran konveksi dan struktur dalam ukuran besar, ionosonda, *HF* dan *VHF* radar untuk pengukuran iregularitas lapisan E dan F, riometer untuk pengukuran

absorpsi yang disebabkan datangnya partikel, *incoherent scatter radar*, magnetometer, dan lain-lain.

Karena memiliki keterkaitan dengan magnetosfer juga, maka sistem ionosfer-termosfer merupakan kopling dari atas dan bawah. Analisis hasil pengamatan variabilitas global atau sistem tersebut akan dapat digunakan untuk membuat model-model fisis, model empiris, klimatologi dan lain-lain model yang merupakan kombinasi model dari hasil pengamatan yang berbeda. Di samping itu, akan diperoleh pula informasi tentang proses transfer energi dan juga kecermatan memprediksi pengaruh variabilitas matahari pada sistem tersebut.

Sistem ionosfer-termosfer pada daerah ekuator dan kutub mempunyai perbedaan karakteristik yang jelas. Di daerah ekuator radiasi matahari diserap dalam jumlah yang relatif besar, dan di vektor medan magnet bumi sejajar atau hampir sejajar. Sedangkan di daerah lintang tinggi tidak demikian halnya. Proses dinamik, elektrodinamik dan proses plasma yang ganjil di daerah ini merupakan ciri khas sistem ionosfer-termosfer. Guna meningkatkan pemahaman tentang pengaruh ionosfer ekuator dalam aplikasinya sebagai media komunikasi *HF* dan *VHF* perlu dipelajari proses-proses anomali ionisasi, elektrojet ekuator, dan *bubble* plasma equatorial (yang salah satu manifestasinya adalah iregularitas *spread-F*).

Gejala gelombang-gelombang pasang surut, planetari dan gravitasi serta angin pada daerah ketinggian 80-150 km mempengaruhi sifat iklim di daerah lintang rendah ($<35^\circ$) sampai daerah lintang tinggi ($>65^\circ$) di bawah pengaruh gangguan matahari/magnetosfer dalam orde waktu pendek (hari) sampai panjang (skala siklus matahari).

Respons atmosfer tengah dan mesopause/termosfer bawah terhadap gangguan aktivitas matahari atau magnetosfer dan aktivitas terestrial atau aktivitas antropogenik sangat penting diketahui karena keterlibatannya pada variasi konsentrasi ozon yang akan berakibat terjadinya perubahan iklim global.

5. Transfer Energi dan Massa di Media Antar Planet dan Sistem Magnetosfer-Ionosfer

Dalam masalah hantaran energi dan massa di medium antar planet dan di dalam sistem magnetosfer-ionosfer perlu dipelajari proses-proses percepatan, difusi, konveksi, dan ketidakstabilan yang mengakibatkan aliran-aliran korpuskular yang kompleks, gelombang-gelombang plasma dan medan-medan dalam sistem angin matahari-magnetosfer-ionosfer.

Aktivitas matahari ditandai pula dengan adanya peningkatan intensitas angin matahari, yang dalam penjarannya ke bumi sebenarnya melibatkan keberadaan gelombang kejut, arus dan kabut magnetik. Telaah mengenai hal ini akan memberikan informasi tentang mekanisme transfer gangguan dari matahari ke sistem bumi dan atmosfernya.

Untuk itu diperlukan kegiatan penelitian, meliputi :

- a. plasma angin matahari dan medan magnet, gelombang kejut, kabut magnetik;
- b. partikel berenergi tinggi >30 KeV;
- c. plasma antar planet dan semburan radio matahari;

- d. struktur plasma antar planet dan yang berkaitan dengan *flare*, *prominence*, lubang korona dan *current sheets*;
- e. angin matahari dan pengaruhnya pada interface magnetosfer, polaritas medan magnet antar planet, *Sudden Commencement Geomagnetic Storm*;
- f. interaksi angin matahari dengan komet.

Untuk memperoleh pemahaman tentang transfer energi, momentum dan massa antara magnetosfer dan ionosfer diperlukan pemantauan dari darat pada proses-proses magnetosferik secara terus menerus untuk jangka waktu yang lama. Peralatan yang digunakan adalah magnetometer dengan sensor-sensor sensitivitas tinggi yang harus dipasang secara melintang mulai dari daerah kutub (atau di lintang tinggi), lintang tengah dan daerah ekuator. Oleh karenanya, diperlukan kerja sama internasional. Peralatan lain yang mendukung adalah ionosonde, riometer, alat pemantau aktivitas matahari secara optik dan radar.

Dalam kaitan ini, lingkup penelitian yang bisa dilakukan mencakup antara lain:

- a. proses transfer energi pada lapisan batas magnetosfer;
- b. perubahan konveksi magnetosferik dan arus listrik sebagai respons variasi kondisi angin matahari;
- c. gelombang *ULF* mode global yang terkait dengan variasi angin matahari dan substorm magnetosferik;
- d. propagasi gelombang *ULF* ke daerah ekuator;
- e. membuka dan menutupnya arus-arus medan dalam sistem magnetosfer-ionosfer.
- f. efek medan gelombang *ULF*, *ELF* dan *VLF* pada *substorm*.

7. Kesimpulan

Dari uraian diatas maka dapat disusun suatu simpul-simpul program yang mencakup penelitian hubungan Matahari-Bumi, sebagai berikut :

- 1. Pengaruh Variabilitas Matahari pada Lingkungan Hidup**
 - 1.1. Pengaruh variabilitas matahari jangka panjang pada atmosfer.
 - 1.2. Pengaruh variabilitas matahari jangka pendek pada kondisi fisis dan komposisi kimia atmosfer bawah dan tengah.
- 2. Matahari Sebagai Pembangkit Tenaga dan Sumber Gangguan**
 - 2.1. Fenomena-fenomena di permukaan matahari (bintik matahari, flare, prominens, granulasi).
 - 2.2. Dinamika plasma dan medan elektromagnet matahari.
 - 2.3. Variasi radiasi elektromagnetik dan partikel dari matahari.
 - 2.4. Variasi radiasi elektromagnetik bintang-bintang sejenis matahari.
- 3. Respons Atmosfer Tengah Terhadap Forcing Atas dan Bawah**
 - 3.1. Kopling keatas energi gelombang.
 - 3.2. Dinamika atmosfer tengah ekuator.
 - 3.3. Kopling atmosfer tengah dan atmosfer atas.

4. **Kopling Ionosfer-Termosfer dan Responnya terhadap Masukan Energi dan Momentum**
 - 4.1. Aspek global struktur plasma.
 - 4.2. Transfer energi dan momentum dalam sistem ionosfer-termosfer.
 - 4.3. Dinamika dan kopling sistem ionosfer-termosfer.
 - 4.4. Sistem ionosfer-termosfer ekuator.
 - 4.5. Kopling mesosfer-termosfer bawah
5. **Transfer Energi dan Massa di Media Antar Planet dan Sistem Magnetosfer-Ionosfer**
 - 5.1. Dinamika plasma dan partikel energetik di ruang antar planet.
 - 5.2. Kopling Magnetosfer-Ionosfer dan responnya terhadap masukan energi dan momentum.

Daftar Pustaka

- Brasseur, G., Verstraete, M.M., 1988, *Solar Terrestrial Energy Program*, Proceeding of SCOSTEP Symposium.
- Crowder, B., 1995, *The Wonders of the Weather*, An AGPS press Publ., Canberra.
- Dickinson, R.E., 1986, *Physics of the Sun*, Vol. III, P.A. Sturrock et al. (eds), D Reidel Publ. Co., hal. 155.
- Friis-Christensen, E., Lassen, K., 1992, *COSPAR COLLOQUIA SERIES* Vol. 5, STEP, Baker D.N., et al. (eds), hal. 529
- Hunt, B.G., 1988, *Solar Terrestrial Energy Program*, Proceeding of SCOSTEP Symposium.
- O'Mara A.H., 1980, *Solar Activity and Variationsm of Meteorologigal Parameters*, Proceeding of The Int. Conference on Sun and Climate, Tolouse, France, hal. 221
- Svestka, Z., 1976, *Solar Flare*, D. Reidel Publ. Co.