

SIMULASI MAGNETOHIDRODINAMIKA NON-IDEAL PADA INTERAKSI BADAI MATAHARI TERHADAP PLANET VENUS

(Non-ideal Magnetohydrodynamics Simulation of the Interction of Sun Storm upon the Planet Venus)

Bambang Setiahad

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
Watukosek, Gempol P.O. Box 04, Pasuruan 67155, Jawa Timur
e-mail: bsetiapx@sby.centrin.net.id

ABSTRAK

Dinamika perubahan parameter fisis di sekitar planet Venus pada waktu diterpa badai magnetik dari Matahari dipelajari dengan menggunakan persamaan diferensial parsial bergantung waktu nonideal dua dimensi. Pemecahan persamaan diferensial MHD bergantung waktu secara numerik dilakukan dengan menentukan lebih dulu komputasi suku-suku nonideal sebagai *diffusive step*, setelah itu hasilnya dihitung sebagai pemecahan persamaan diferensial MHD ideal sebagai *convective step*. Pada planet Venus yang tidak bermedan magnet parameter fisis akan berubah secara mendadak pada saat terjadi badai magnetik dari Matahari. Salah satunya adalah peningkatan temperatur di ketinggian 20 km dari permukaan planet Venus yang mencapai sekitar 150 °C.

Kata kunci: Badai Matahari, simulasi MHD non-ideal, dampak di Venus.

ABSTRACT

The study of physical parameter value of Venus and its surrounding in the magnetic storm of the sun is studied using non-ideal partial differential equation. The numerical solution of this differential equation begin with the computation of non-ideal term as the diffusive step and the result is then, used to solve the ideal MHD (magnetohydrodynamics) differential equation as the convective step. Venus without magnetic field shows abrupt changes in the magnetic storm of the sun. One of the dramatic changes is the rising of the temperature at height 20 km which reaches up to 150 °C.

Kata kunci: Sun storm, non-ideal MHD simulation, impact in Venus.

Makalah diterima 17 September 2005

1. PENDAHULUAN

Planet Venus adalah planet yang mirip dengan Bumi (disamping itu juga Planet Mars). Planet Venus diambil sebagai suatu model sistem fisis planet yang tidak

bermedan magnet dalam usaha mempelajari apakah planet Venus memiliki kemampuan perlindungan terhadap aktivitas Matahari yang berbahaya seperti badai magnetik (*magnetic storm*). Bumi yang diketahui memiliki medan magnet ternyata

memberikan perlindungan terhadap perubahan mendadak parameter fisis tersebut sewaktu terjadi aktivitas yang berbahaya dari Matahari (Setiahadi, 2004b).

Pada waktu Matahari melepaskan badai magnetik selalu disertai dengan semburan partikel yang sebagian besar terdiri dari elektron. Pada peristiwa ini akan tampak semburan partikel tersebut sebagai awan karena tidak kurang 10 hingga 100 juta ton massa elektron dengan kepadatan yang cukup tinggi lepas dari permukaan Matahari. Semburan partikel tersebut sampai pada planet Venus atau Bumi dan masih mampu bergerak dengan laju 300-500 km/jam. Medan magnet yang menyertainyapun bisa mencapai 10 Gauss (Setiahadi *et al.* 1998).

Dengan kepadatan yang cukup tinggi, awan badai magnetik diduga dalam propagasinya ke ruang angkasa mengalami proses-proses internal dalam awan tersebut. Proses tersebut antara lain interdifusi dan interkonversi beberapa parameter fisis dalam awan magnetik tersebut selama propagasinya dan interaksinya dengan sistem fisis planet Venus. Seluruh proses tersebut dapat dicakup dalam suatu sistem persamaan diferensial Navier-Stokes dua dimensi (Setiahadi dan Sakurai, 1997) melalui penambahan suku-suku nonideal untuk menggambarkan secara *self-consistent* proses interdifusi dan interkonversi di dalam awan tersebut, serta pada waktu interaksinya dengan sistem fisis planet Venus.

2. TEORI PERSAMAAN DASAR MHD

Persamaan transfer MHD nonideal yang digunakan disini adalah persamaan dasar transfer Navier-Stokes dengan penambahan suku-suku yang relevan dengan proses-proses nonideal dalam awan badai magnetik. Dalam notasi aljabar vektor dapat dituliskan sebagai berikut; Persamaan transfer masa,

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} = \mathbf{a} \nabla^2 \mathbf{r} \quad (1)$$

Persamaan transfer momentum,

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} \vec{V} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} \vec{V} = -\nabla P + \left(\nabla \times \vec{B} \right) \times \vec{B} + \mathbf{r} \vec{G} + \mathbf{n} \nabla^2 \mathbf{r} \vec{V} \quad (2)$$

Persamaan transfer magnetik,

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} + \nabla \cdot \vec{B} \vec{V} = \left(\vec{B} \cdot \nabla \right) \vec{V} + \vec{V} \left(\nabla \cdot \vec{B} \right) + \mathbf{h} \nabla^2 \vec{B} \quad (3)$$

Persamaan transfer politropik,

$$\frac{\partial}{\partial t} P + \nabla \cdot P \vec{V} = -(\mathbf{g} - 1) P \left(\nabla \cdot \vec{V} \right) + \mathbf{k} \nabla^2 P \quad (4)$$

Persamaan gas ideal,

$$P = \mathbf{r} T \quad (5)$$

Seluruh simbol-simbol yang digunakan pada persamaan (1)-(5) mempunyai arti fisis yang biasa dipakai dalam fisika, yaitu masing-masing adalah rapat massa ρ , medan magnet \vec{B} , momentum $\mathbf{r} \vec{V}$, tekanan skalar P , temperatur T , dan konstanta politropik \mathbf{g} (Jackson, 1975).

Persamaan (5) menunjukkan proses interdifusi dan interkonversi dalam MHD nonideal pada badai magnetik Matahari mengikuti hukum-hukum termodinamika klasik. Misalnya proses difusi pada ρ dan P dapat menyebabkan perubahan temperatur. Demikian juga proses difusi medan magnet \vec{B} dapat memberikan perubahan temperatur. Proses difusi medan magnet ini dikenal sebagai proses rekoneksi medan magnet. Adanya proses tersebut menunjukkan pula bahwa kopling antara satu peristiwa fisis dengan peristiwa fisis lainnya dapat terjadi.

2.1 Langkah Difusif

Proses nonideal umumnya dinyatakan sebagai *double-derivative* (operator Laplacian: ∇^2). Karena struktur *double-derivative* berbeda dari suku-suku proses ideal yang *single-derivative* (Tajima, 1989), maka dilakukan langkah komputasi terpisah. Cara ini hanya boleh dipakai jika langkah waktu (*time step*) dalam komputasi cukup kecil dan harus dilakukan pada *time-*

level yang sama. Persamaan dasar MHD (2.1)-(2.4) dapat dinyatakan sebagai persamaan diferensial parsial difusi berikut, Persamaan transfer difusi massa,

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} = \mathbf{a} \nabla^2 \mathbf{r} \quad (6)$$

Persamaan transfer difusi momentum,

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} \vec{V} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} \vec{V} = \mathbf{n} \nabla^2 \mathbf{r} \vec{V} \quad (7)$$

Persamaan transfer difusi magnetik,

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} + \nabla \cdot \vec{B} \vec{V} = \mathbf{h} \nabla^2 \vec{B} \quad (8)$$

Persamaan transfer difusi termal,

$$\frac{\partial}{\partial t} P + \nabla \cdot P \vec{V} = \mathbf{k} \nabla^2 P \quad (9)$$

Dengan melihat kemiripan pada ruas kiri, maka dapat dituliskan suatu persamaan,

$$\frac{\partial}{\partial t} Q + \nabla \cdot Q \vec{V} = \mathbf{x} \nabla^2 Q \quad (10)$$

sebagai persamaan umum transfer difusif dengan $\mathbf{x} \equiv \mathbf{x}(\mathbf{a}, \mathbf{n}, \mathbf{h}, \mathbf{k})$ merupakan kuantitas yang mengatur besarnya berbagai proses difusi. Kuantitas \mathbf{x} dapat diartikan juga sebagai suatu kuantitas yang mencerminkan kopling dan interdependensi yang diantisipasi dalam persamaan diferensial parsial bergantung waktu MHD nonideal. Dalam kenyataannya \mathbf{x} dapat bersifat homogen dan isotropis untuk peristiwa transfer yang relatif lambat. Akan tetapi untuk transfer yang bersifat eksplosif \mathbf{x} dapat berubah menjadi nonhomogen dan nonisotropis terhadap ruang maupun terhadap waktu.

Nilai $\nabla^2 Q$ dalam ruas kanan persamaan (10) dihitung dengan cara *two-step half-cell centered-difference scheme* sebagai berikut,

$$Q_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(Q_{i+1} + Q_i) \quad (11)$$

turunan pertama kemudian di definisikan sebagai,

$$\nabla Q = (Q_{i+\frac{1}{2}} - Q_{i-\frac{1}{2}})(x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}})^{-1} = \bar{Q}_i \quad (12)$$

dan turunan kedua sebagai,

$$\nabla \bar{Q} = (\bar{Q}_{i+\frac{1}{2}} - \bar{Q}_{i-\frac{1}{2}})(x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}})^{-1} = \nabla^2 Q \quad (13)$$

dengan $x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}$ adalah lebar sel Eulerian (*Eulerian cell-width*). Setelah selesai dihitung maka hasil pada Q disubstitusikan ke dalam besaran umum ruas kanan S pada persamaan (18) persamaan transfer ideal (14)-(17).

2.2 Langkah Konvektif

Pemecahan secara numerik persamaan diferensial parsial MHD ideal sama seperti yang digunakan oleh Setiahadi (2004b) dalam memecahkan komponen besaran fisis utama yaitu rapat massa, momentum, medan magnet, dan medan tekanan. Perbedaannya adalah pengaruh proses-proses nonideal juga dimasukan tetapi dilakukan secara implisit pada akhir langkah difusif. Sehingga secara keseluruhan langkah konvektif sebenarnya merupakan komputasi menyeluruh untuk memecahkan persamaan MHD nonideal. Persamaan dasar diferensial parsial menjadi persamaan MHD ideal (Setiahadi, 2004b),

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} \vec{V} + \nabla \cdot \mathbf{r} \vec{V} \vec{V} = -\nabla P + \left(\nabla \times \vec{B} \right) \times \vec{B} + \mathbf{r} \vec{G} \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} + \nabla \cdot \vec{B} \vec{V} = \left(\vec{B} \cdot \nabla \right) \vec{V} + \vec{V} \left(\nabla \cdot \vec{B} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} P + \nabla \cdot P \vec{V} = -(\mathbf{g} - 1)P \left(\nabla \cdot \vec{V} \right) \quad (17)$$

dengan

$$\frac{\partial}{\partial t} Q + \nabla \cdot Q \vec{V} = S \quad (18)$$

merupakan persamaan umum transfer ideal dan S adalah fungsi sumber yang secara implisit sudah memperhitungkan pengaruh proses-proses nonideal pada parameter-

parameter utama, yaitu ρ , \vec{r} , \vec{V} , \vec{B} , dan P . Fungsi sumber S kemudian dihitung untuk memberikan solusi akhir dalam satu siklus komputasi.

Di ruang antariksa dimana kepadatan massa dapat sebanding dengan kepadatan medan magnet dan merambat dalam kecepatan tinggi, gelombang moda cepat akan menentukan stabilitas komputasi setiap saat. Karena itu pada akhir langkah konvektif dilakukan pemantauan gelombang moda cepat yang berkembang dalam ruang komputasi. Gelombang moda cepat terdiri dari komponen gelombang suara

$$C_s = \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad (4.6)$$

dan komponen gelombang Alfvén (Alfvén, 1942):

$$V_A = \sqrt{\frac{B^2}{\rho}} \quad (4.7)$$

Sehingga moda cepat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_F = \sqrt{C_s^2 + V_A^2} \quad (4.8)$$

Dalam komputasi ruas kiri persamaan transfer MHD propagasi moda cepat dalam satu siklus dibatasi tidak boleh melebihi setengah lebar sel komputasi,

$$\frac{1}{2}(x_{i+1} - x_i) > V_F dt \quad (4.9)$$

dengan $\frac{1}{2}(x_{i+1} - x_i)$ lebar setengah sel, dan dt adalah lebar waktu dalam satu siklus komputasi (Setiahadi, 1997). Untuk mengantisipasi penjarangan *error* numerik terhadap ruang maupun waktu karena pemisahan langkah difusif dan konvektif, maka lebar setengah sel persamaan (4.9) direduksi lagi menjadi $\frac{1}{5}(x_{i+1} - x_i)$. Sebelum siklus baru komputasi dimulai hasil solusi numerik parameter-parameter fisis utama disimpan dititik nodal terdekat secara Eulerian.

3. SIMULASI

Dalam daerah komputasi berukuran 80.000 km x 100.000 km, planet Venus diletakkan di tengah pada posisi 40.000 km

dari sisi kiri arah datangnya badai magnetik dan 40.000 km dari selatan. Ukuran planet Venus tidak ditampilkan disini karena tidak relevan. Yang ditampilkan adalah kondisi fisis batas-batas lapisan atmosfer planet atau *planetary boundary layers* (PBL). PBL planet Venus dianggap sama dengan Bumi seperti yang digunakan oleh Setiahadi (2004b). Karena Venus mempunyai total massa planet hampir sama dengan Bumi.

Menurut pengamatan satelit dan hasil simulasi dekat permukaan Matahari (Setiahadi *et al.*, 1998) *loop* badai magnetik yang baru dilepaskan dari Matahari mempunyai laju propagasi hingga mencapai 500 km/det dengan total massa elektron dari lapisan korona sekitar $10.0 \sim 100.0 \times 10^6$ ton dengan kuat medan magnet rata-rata 500 Gauss. Jarak Matahari-Venus sejauh 108.0×10^6 km menyebabkan *loop* medan magnet badai yang dilepaskan Matahari akan mengalami peluruhan dan difusi ruang selama perjalanannya menuju Venus. Geometri *loop* berubah menjadi geometri planar. Sedangkan laju propagasi, kuat medan magnet dan massa total elektronnya akan berkurang hampir secara eksponensial.

Badai magnetik dari Matahari diasumsikan dilepaskan dari daerah posisi *heliografik* yang berimpit dengan bidang *ekliptika* dan pada arah tepat ke Venus. Sehingga kedatangan badai magnetik disekitar Venus dapat disimulasikan datang dari batas daerah komputasi sebelah kiri dengan laju 300 km/det dan dengan medan magnet yang terbawa sebesar 10 Gauss tegak lurus arah rambat. Rapat massa elektron rata-rata sebelum berinteraksi dengan PBL planet Venus diambil sekitar 850 km/m^3 . Durasi hembusan badai magnetik dalam komputasi dilakukan selama 30 menit.

Simulasi badai magnetik dilakukan dengan MHD ideal dan MHD nonideal. Hasilnya adalah keduanya memberikan kenaikan temperatur secara mendadak pada permukaan planet Venus sampai mencapai 150°C pada saat badai mencapai PBL paling bawah dari planet Venus. Dalam waktu 5~7 menit setelah badai mencapai PBL yang paling dalam (20 km diatas permukaan planet) solusi MHD ideal segera

menunjukkan adanya penurunan temperatur hingga 90 °C.

Solusi MHD nonideal menunjukkan temperatur turun lebih lambat yaitu 9~12 menit setelah badai mencapai PBL paling bawah. Tetapi setelah itu MHD nonideal memberikan penurunan temperatur jauh lebih cepat daripada MHD ideal. Bersamaan dengan mulai lepasnya medan magnet meninggalkan PBL planet Venus. Ini menunjukkan pada saat itu disipasi temperatur menjadi lebih dominan dan cepat terbawa bersama dengan medan magnet yang mulai meninggalkan planet Venus.

4. KESIMPULAN

Planet Venus yang tidak bermedan magnet menunjukkan perubahan dan peningkatan temperatur secara mendadak pada waktu terkena badai magnetik. Kedua jenis interaksi MHD dalam simulasi ini tidak menunjukkan perbedaan besar pada penurunan temperatur. Atmosfer planet Venus tidak cukup untuk memberikan perlindungan terhadap peningkatan temperatur akibat badai magnetik. Dibandingkan dengan Bumi yang bermedan magnet, pada ketinggian yang sama (20 km) hanya menyebabkan kenaikan temperatur kurang dari 3 °C.

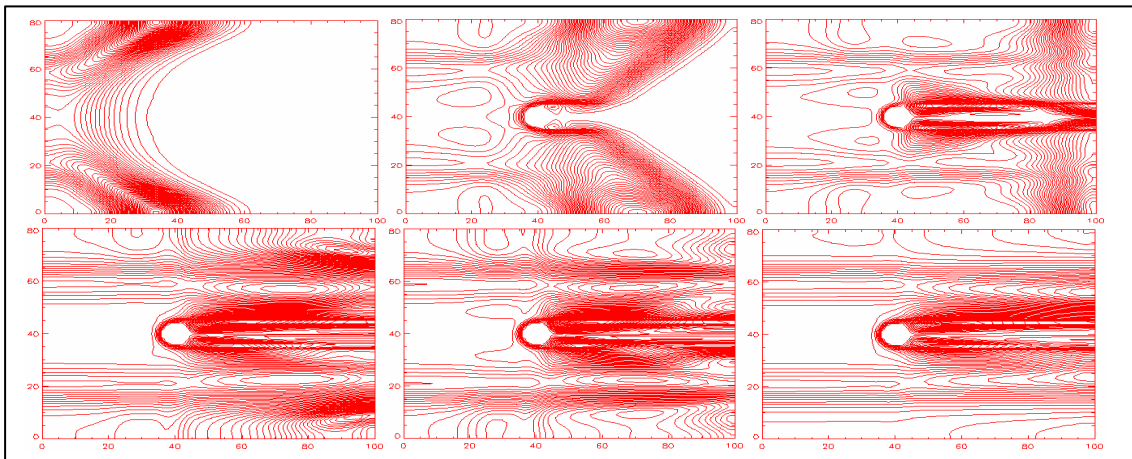
Proses-proses interdifusi dan interkonversi dapat secara bergantian menjadi dominan dalam ruang maupun waktu yang bersifat nonlinier. Semua ini hanya dapat terlihat jika dilakukan simulasi numerik yang memecahkan secara serentak dan *self-consistent* pada persamaan diferensial parsial MHD nonideal, sehingga hasilnya sering sulit diduga.

Medan magnet sebuah planet, selain dapat digunakan untuk navigasi konvensional, ternyata sangat menentukan dalam memberikan efek perlindungan terhadap peningkatan temperatur secara mendadak, selain itu juga memberikan memberikan suatu cara membelokkan arus elektron yang berbahaya lewat mekanisme turbulensi MHD (Setiahadi, 2004b). Simulasi pada planet Venus menunjukkan tidak ada cara sistem fisis di planet tersebut untuk

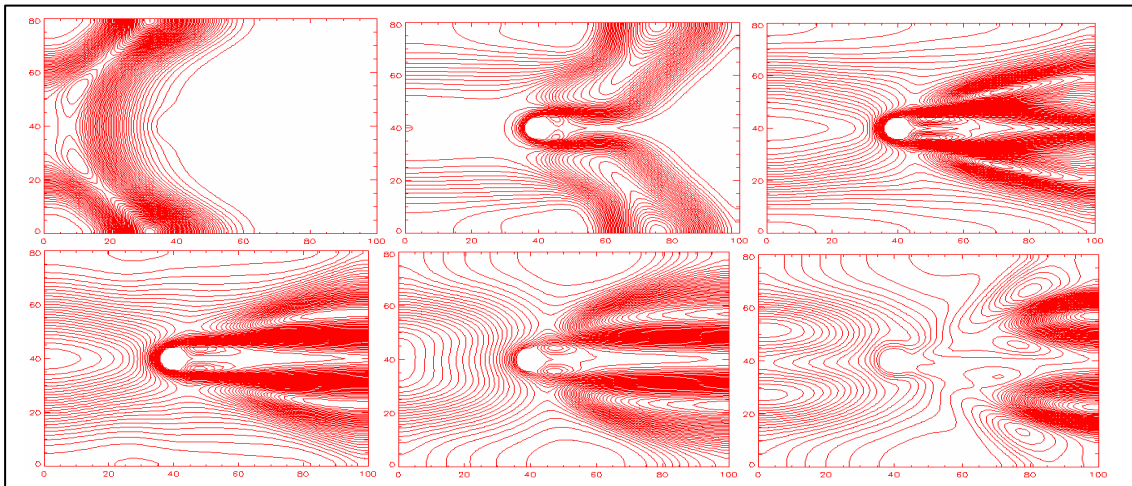
membelokkan aliran deras plasma elektron yang berbahaya.

Daftar Pustaka

- Alfven, H. (1942), **Nature**, **105**, p. 405.
- Jackson, J.D. (1975), *Classical Electrodynamics* (Second Edition), Wiley Eastern Limited, New Delhi, p. 469–498.
- Setiahadi, B. (2004a), *Studi Perbandingan Interaksi MHD Badai Matahari Terhadap Bumi dan Venus*, **Proceeding Seminar MIPA IV**, ITB Bandung, p. 135.
- Setiahadi, B. (2004b), *Simulasi MHD Interaksi Angin Matahari dengan Medan Magnet Bumi*, **Seminar Matematika Nasional XII**, Denpasar, Bali, p. 293.
- Setiahadi, B., Anwar, B., Akioka, M., Sakurai, T. (1998), *Non-Linear Evolution of Erupting Coronal Magnetic Fields*, in **Observational Plasma Astrophysics**, T. Watanabe *et al.* (eds.), Kluwer Academic Publ., p. 353.
- Setiahadi, B., Sakurai, T. (1997), *Simulation by Vectorized Computation for Giant Electron Plasma Cloud Ejection*, **ICME**, Bandung, Indonesia, p. 203
- Setiahadi, B. (1997), *A Test for An Interplanetary Hydromagnetic Numerical Simulation*, **Report on the Work Done in CRL**, Tokyo, Japan.
- Tajima, T. (1989), *Computational Plasma Physics: With Applications to Fusion and Astrophysics*, Addison-Wesley Publ. Co, Inc., p. 68–72, p. 142-152.



Gambar 1. Hasil simulasi MHD ideal yang menunjukkan medan magnet dan awan elektron yang berbahaya tidak segera meninggalkan PBL planet Venus, menyebabkan temperatur tidak cepat menurun pada akhir waktu komputasi.



Gambar 2. Hasil simulasi MHD nonideal menunjukkan medan magnet meninggalkan PBL planet Venus bersamaan dengan menurunnya temperatur. Hal ini dimungkinkan oleh adanya proses nonideal dan kopling antara proses difusi medan magnet dan temperatur.