

MODEL MEDAN DIPOL GEOMAGNET : ANALISIS UNTUK EFEK MEDAN MAGNET ANTARPLANET ARAH UTARA-SELATAN (DIPOLE GEOMAGNETIC FIELD MODEL: ANALYSIS OF EFFECTS OF NORTH-SOUTH COMPONENT OF INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD)

La Ode Muhammad Musafar Kilowasid

Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

e-mail: latompe@gmail.com

Diterima 28 Februari 2018; Direvisi 26 November 2018; Disetujui 28 November 2018

ABSTRACT

An analytical model has been reviewed in the context of presence of interplanetary magnetic field at Earth's orbit where the geomagnetic field is approximated as a dipole field. In order to map the geomagnetic field with/without interplanetary magnetic field, the potensial Euler has been applied to derive the representation of magnetic field lines. This paper only consider the effect of north-/southward interplanetary magnetic field to the dipole field. The northward component causes magnetic field reconnection at the polar regions, while the southward component causes reconnection at noon- and midnight-side of equatorial region. Increase of north- and south-ward components of interplanetary magnetic field generally cause compression on the geomagnetic field accompanied by Earth-ward movement of magnetic field reconnection points. The result on the case of geomagnetic storm on July 2000 shows that during the early expansion phase of the storm, reconnection occurred at 19.5 Earth radii (R_E). Then, during the expansion phase with maximum magnetic field strength, reconnection occurred at minimum distance of $8.05R_E$, while at the end of the storm, reconnection site moved away from the Earth, at $26.9R_E$.

Keywords: *interplanetary magnetic-field, dipol field, Euler potential, magnetic reconnection*

ABSTRAK

Ditinjau sebuah model analitik terkait dengan keberadaan medan magnet antarplanet di daerah sekitar orbit Bumi, dan medan magnet Bumi ditinjau sebagai medan dengan konfigurasi dipol. Untuk memetakan medan dipol tanpa gangguan maupun keberadaan medan magnet antarplanet ditetapkan pendekatan potensial Euler untuk merumuskan persamaan garis medan. Makalah ini meninjau medan efek keberadaan komponen arah utara atau selatan medan magnet antarplanet terhadap medan dipol geomagnet. Keberadaan medan magnet antarplanet dengan komponen arah utara mengakibatkan terjadinya rekoneksi garis medan pada daerah kutub, sedangkan medan magnet antarplanet dengan komponen arah selatan mengakibatkan rekoneksi pada daerah siang dan malam di bidang ekuatorial. Peningkatan kekuatan medan magnet antarplanet secara umum mengakibatkan kompresi terhadap medan dipol geomagnet disertai oleh titik rekoneksi bergerak mendekati Bumi. Hasil uji untuk kasus badai magnet yang terjadi pada bulan Juli 2000 menunjukkan bahwa pada awal fase ekspansi badai magnet, rekoneksi magnetik terjadi pada jarak 19,5 radius Bumi (R_E). Selanjutnya selama fase ekspansi ketika kekuatan medan magnet mencapai nilai maksimum, rekoneksi terjadi pada jarak minimum $8,05 R_E$ sementara pada akhir badai magnet lokasi rekoneksi menjauhi dari Bumi yaitu pada jarak $26,9 R_E$.

Kata kunci: *medan magnet antarplanet, medan dipol, potensial Euler, rekoneksi magnet*

1 PENDAHULUAN

Medan magnet Bumi dalam kondisi tanpa gangguan dapat didekati sebagai medan dipol. Pendekatan ini secara mendasar penting untuk menyelidiki interaksi antara magnetosfer dan angin surya. Keberadaan angin surya yang membawa medan magnet antarplanet menyebabkan sistem dipol ideal mengalami distorsi. Berbagai model telah dikembangkan sebelumnya untuk memetakan medan geomagnet baik secara analitik maupun menggunakan analisis numerik (Midgley, 1964; Mead, 1964; Williams & Mead, 1965; Roederer, 1969; Olson & Pfitzer, 1974; Choe & Beard, 1974; Mead & Fairfield, 1975).

Pendekatan numerik dengan memecahkan persamaan magneto-hidrodinamika (MHD) dewasa ini banyak dikembangkan untuk mempelajari efek fluktuasi angin surya terhadap *magnetopause* (Liu, 2012; Chen *et al.*, 2015), rekoneksi medan geomagnet dengan medan magnet antarplanet (Shi *et al.*, 1991; Borowsky 2013; Price *et al.*, 2017). *Magnetopause* merupakan daerah batas luar dari magnetosfer yang posisinya bergantung pada interaksi medan magnet antarplanet dengan medan magnet Bumi.

Selain itu, interaksi medan magnet Bumi dengan medan magnet antarplanet dapat ditinjau melalui pembangkitan gelombang *Ultra-Low Frequency* (ULF) (Song *et al.*, 1999; McGregor *et al.*, 2014; Tasnim *et al.*, 2018). Dari seluruh model ini, secara umum keberadaan angin surya yang membawa medan magnet antarplanet mengakibatkan modifikasi geometri medan magnet Bumi khususnya ketika medan magnet antarplanet memiliki orientasi arah selatan yang mengakibatkan badai magnet (Zhang *et al.*, 2007; Maggiolo *et al.*, 2017). Meskipun demikian, efek interaksi medan magnet antarplanet arah utara dengan medan geomagnet masih dalam penyelidikan (Li *et al.*, 2008; Du *et al.*, 2011).

Pemetaan medan magnet dilakukan untuk berbagai tujuan, antara lain untuk memahami interaksi keberadaan angin surya yang membawa medan magnet antarplanet terhadap medan geomagnet, *tracing* lintasan partikel maupun analisis data satelit. Makalah ini meninjau model analitik serta membahas efek medan magnet antarplanet terhadap magnetosfer agar mudah dipahami secara matematis.

Akhir tahun 2016, LAPAN meluncurkan satelit LAPAN-A3 mengitari Bumi pada ketinggian LEO (*Low Earth Orbit*). Satelit tersebut memiliki orbit polar dan membawa muatan magnetometer. Saat ini, satelit LAPAN-A3 telah dapat melakukan transmisi data magnetometer. Dikarenakan memiliki orbit polar, maka rekaman data magnetometer satelit LAPAN-A3 adalah medan magnet yang mencakup daerah kutub hingga ekuator. Data medan magnet yang direkam oleh magnetometer satelit LAPAN-A3 memiliki kontribusi yang berasal dari medan utama, medan ionosferik dan magnetosferik serta medan magnet antarplanet.

Untuk analisis data satelit perlu dikembangkan model medan magnet pada ketinggian orbit satelit. Model tersebut harus memasukkan efek interaksi medan magnet Bumi dengan angin surya yang membawa medan listrik dan medan magnet antarplanet. Sementara itu, untuk analisis lebih komprehensif diperlukan model yang memasukkan model kerapatan partikel ionosferik pada ketinggian orbit satelit.

Sebagai langkah awal dalam membangun model medan magnet untuk analisis data satelit LAPAN-A3, dilakukan konstruksi model interaksi medan magnet Bumi dan medan magnet antarplanet. Pada makalah ini, medan magnet Bumi ditinjau sebagai medan dipol simetri. Untuk memetakan medan magnet Bumi digunakan representasi potensial Euler dari medan magnet. Formulasi garis medan magnet Bumi menggunakan potensial Euler dianalisis

untuk berbagai kondisi medan magnet antarplanet arah utara dan selatan. Selain itu, akan dianalisis juga kondisi terkait badai magnet pada bulan Juli 2000.

Makalah ini terdiri atas 4 bagian. Bagian 1 memberikan gambaran mengenai latar belakang dan tujuan. Bagian 2 menjelaskan formulasi medan magnet dipol simetri menggunakan pendekatan potensial skalar. Secara mendasar pendekatan ini dapat digunakan untuk menyelidiki interaksi medan magnet bumi dengan medan magnet antarplanet, akan tetapi memiliki kelemahan karena penggambaran garis medan dengan pendekatan ini adalah lebih rumit. Bagian 3 menjelaskan formulasi interaksi medan magnet Bumi dengan medan magnet antarplanet dalam pendekatan potensial Euler, bagian 4 memberikan penerapan dan visualisasi interaksi medan magnet Bumi dengan medan magnet antarplanet untuk berbagai nilai komponen B_z medan magnet antarplanet, dan bagian 5 memberikan studi kasus terkait badai magnet pada bulan Juli 2000.

2 FORMULASI MEDAN DIPOL GEOMAGNET

Untuk merumuskan medan magnet geomagnet, ruang sekeliling Bumi awalnya dianggap vakum. Ungkapan vakum diartikan sebagai kondisi di mana tidak ada sistem arus yang mengalir dan tidak ada partikel bermuatan dalam ruang antariksa. Bumi dapat ditinjau sebagai sebuah magnet batang raksasa sehingga ruang antariksa sekitar Bumi terisi oleh medan magnet yang dibangkitkan dari inti bagian dalam Bumi. Pada kondisi yang demikian, medan magnet sekitar Bumi memenuhi persamaan Ampere (Jackson, 1999) yang tereduksi menjadi

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (2-1)$$

Oleh karena itu, medan magnet \mathbf{B} dapat dinyatakan sebagai gradien dari sebuah potensial skalar Φ yang diberikan oleh

$$\mathbf{B} = -\nabla\Phi \quad (2-2)$$

Dalam kondisi yang disebutkan di atas, medan magnet Bumi merupakan sebuah geometri dipol dan potensial dipol dalam representasi sistem koordinat bola (r, θ, φ) memiliki bentuk

$$\Phi = -\frac{\mu_0 M_E \cos \theta}{4\pi r^2} \quad (2-3)$$

dalam hal ini, M_E dan μ_0 masing-masing menyatakan momen dipol Bumi dan suseptibilitas magnetik dalam ruang hampa. Besar θ merupakan sudut polar sehingga sudut lintang diberikan oleh $\lambda = \pi/2 - \theta$ sehingga, $\partial/\partial\theta = -\partial/\partial\lambda$ serta vektor satuan $\hat{\mathbf{e}}_\theta = -\hat{\mathbf{e}}_\lambda$.

Oleh karena

$$\nabla\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial r} \hat{\mathbf{e}}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\theta} \hat{\mathbf{e}}_\theta + \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} \hat{\mathbf{e}}_\varphi \quad (2-4)$$

maka komponen medan magnet dipol diberikan oleh

$$\begin{aligned} B_r &= -\frac{\mu_0 M_E \sin \lambda}{2\pi r^3} \\ B_\lambda &= \frac{\mu_0 M_E \cos \lambda}{4\pi r^3} \end{aligned} \quad (2-5)$$

dan kekuatan medan magnetnya adalah

$$B = \frac{\mu_0 M_E}{4\pi r^2} (1 + 3 \sin^2 \lambda)^{1/2} \quad (2-6)$$

Pada daerah ekuator di permukaan Bumi

$$B_s = \frac{\mu_0 M_E}{4\pi R_E^3} \quad (2-7)$$

sehingga (Walt, 2005),

$$B = B_s \frac{R_E^3}{r^3} (1 + 3 \sin^2 \lambda)^{1/2} \quad (2-8)$$

Persamaan garis gaya medan magnet atau garis medan diberikan oleh

$$d\mathbf{s} \times \mathbf{B} = 0 \quad (2-9)$$

sehingga,

$$\frac{dr}{B_r} = r \frac{d\lambda}{B_\lambda} \quad (2-10)$$

atau

$$\frac{dr}{r} = \frac{2}{\cos \lambda} d(\cos \lambda) \quad (2-11)$$

yang menghasilkan

$$\ln\left(\frac{r}{r_0}\right) = 2 \ln\left(\frac{\cos \lambda}{\cos \lambda_0}\right) \quad (2-12)$$

Jika jarak garis medan ekuatorial ditulis sebagai r_{eq} dan $\lambda_0 = 0$ maka

$$\ln\left(\frac{r}{r_{eq}}\right) = 2 \ln(\cos \lambda)$$

atau

$$r = r_{eq} \cos^2 \lambda \quad (2-13)$$

Dengan menuliskan jarak ekuatorial garis medan dalam satuan radius Bumi sebagai $r_{eq} = R_E L$ dan $r = L' R_E$ maka

$$L' = L \cos^2 \lambda \quad (2-14)$$

Dalam hal ini besaran L dikenal dengan nama parameter *McIlwain* (McIlwain, 1961; 1966).

Sebuah garis medan akan memotong permukaan Bumi pada suatu sudut lintang tertentu yaitu pada jarak $L' = 1$ sehingga $\cos^2 \lambda_s = 1/L$ (Kivelson & Russell, 1995) dan dapat dituliskan sebagai

$$\lambda_s = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{L}}\right) \quad (2-15)$$

Sudut potong garis medan pada permukaan Bumi ini dikenal *invariant latitudinal*. Oleh karena itu, dalam ungkapan parameter *McIlwain*, kekuatan medan dipol dapat dituliskan sebagai

$$B = \frac{B_s (1+3 \sin^2 \lambda)^{1/2}}{L^3 \cos^2 \lambda} \quad (2-16)$$

Persamaan (2-16) memiliki implikasi bahwa dengan melakukan pengukuran medan magnet ekuatorial pada permukaan Bumi, dapat diperkirakan kekuatan medan magnet pada suatu ketinggian dan lintang tertentu dari pusat Bumi.

3 REPRESENTASI GARIS MEDAN MAGNET

Medan magnet \mathbf{B} , jika dinyatakan melalui potensial vektor \mathbf{A} memiliki bentuk

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3-1)$$

dan vektor medan magnet dalam sistem koordinat kartesian diberikan oleh

$$\mathbf{B}(x, y, z) = B_x \hat{\mathbf{e}}_x + B_y \hat{\mathbf{e}}_y + B_z \hat{\mathbf{e}}_z \quad (3-2)$$

sedangkan potensial vektor diberikan oleh

$$\mathbf{A}(x, y, z) = A_x \hat{\mathbf{e}}_x + A_y \hat{\mathbf{e}}_y + A_z \hat{\mathbf{e}}_z \quad (3-3)$$

Dari persamaan (2-5) diketahui bahwa medan magnet hanya memiliki dua komponen dalam sistem koordinat bola, yaitu masing-masing dalam arah sejajar dan tegak lurus terhadap A_z . Dengan demikian, dapat direkonstruksi sebuah sistem koordinat sedemikian rupa sehingga medan magnet hanya terletak pada bidang xy dan $\partial/\partial z = 0$ yang memberikan

$$\mathbf{A}(x, y) = \hat{\mathbf{e}}_z A_z(x, y) \quad (3-4)$$

Oleh karena itu, medan magnet dapat dituliskan dalam ungkapan,

$$\mathbf{B}(x, y) = \nabla \times (\hat{\mathbf{e}}_z A_z) + B_z \hat{\mathbf{e}}_z \quad (3-5)$$

dan

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad \text{dan} \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (3-6)$$

Dari pernyataan ini, hanya ada dua variabel saling bebas karena adanya

sifat bebas divergensi dari medan magnet, $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$. Dengan demikian, medan magnet terletak dalam bidang xy dan dapat dituliskan sebagai

$$\mathbf{B}_\perp = \nabla \times A_z(x, y) \hat{\mathbf{e}}_z = \nabla A_z(x, y) \times \hat{\mathbf{e}}_z \quad (3-7)$$

Berdasarkan persamaan (3-7), \mathbf{B}_\perp tegak-lurus terhadap ∇A_z maupun $\hat{\mathbf{e}}_z$. Oleh karena itu, kontur ekuipotensial A_z merupakan medan magnet yang diproyeksikan pada bidang xy . Perbedaan potensial vektor antara dua garis medan merupakan besar fluks magnetik yang berkaitan dengan garis medan potensial vektor A dapat diperoleh dengan melakukan integrasi terhadap persamaan $B_x = \partial A_z / \partial y$ dan $B_y = \partial A_z / \partial x$. Dengan demikian representasi garis medan ini adalah kasus khusus dari *potensial Euler* dengan $\alpha = A_z$ dan $\beta = z$ (Parks, 2004).

Untuk merepresentasikan medan dipol menggunakan potensial vektor dalam sistem koordinat bola, $\partial / \partial \varphi = 0$. Dalam kasus ini, medan magnet disajikan sebagai

$$\mathbf{B}(r, \theta) = \nabla \times A_\varphi(r, \theta) \hat{\mathbf{e}}_\varphi + B_\varphi(r, \theta) \hat{\mathbf{e}}_\varphi \quad (3-8)$$

Secara eksplisit, komponen medan magnet diberikan oleh

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (A_\varphi r \sin \theta) \\ B_\theta &= \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial r} (A_\varphi r \sin \theta) \end{aligned} \quad (3-9)$$

Gradien sebuah fungsi skalar pada suatu bidang (r, θ) dapat didefinisikan sebagai

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{\mathbf{e}}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\mathbf{e}}_\theta \quad (3-10)$$

dan dapat dipilih

$$f = A_\varphi r \sin \theta \quad (3-11)$$

yang memenuhi hubungan

$$\mathbf{B} \cdot \nabla f = 0 \quad (3-12)$$

Sebagai akibatnya, garis-garis medan magnet ditentukan melalui hubungan

$$A_\varphi r \sin \theta = \text{konstan} \quad (3-13)$$

Dengan menggunakan bentuk komponen medan dipol yang diberikan oleh persamaan (2-5) dan mengintegrasikan persamaan (3-9), maka potensial vektor A_φ menjadi

$$A_\varphi = -\kappa \frac{\sin \theta}{r^2} \quad (3-14)$$

dengan

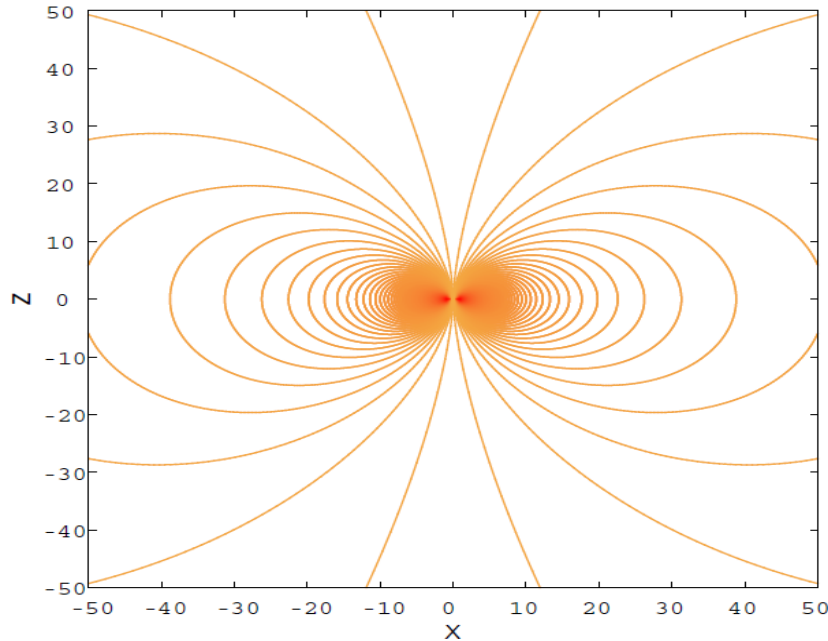
$$\kappa = \frac{\mu_0 M_E}{4\pi} = B_s R_E^3 \quad (3-15)$$

Mengingat medan magnet permukaan mengalami perubahan yang sangat lambat dibandingkan fluktuasi angin surya maka dalam skala waktu yang pendek, persamaan $A_\varphi r \sin \theta = \text{konstan}$ merupakan persamaan garis medan sebagai fungsi dari r dan θ saja.

4 EFEK MEDAN MAGNET ANTARPLANET ARAH UTARA-SELATAN

Langkah pertama untuk membahas efek medan magnet antarplanet terhadap medan magnet Bumi adalah dengan menguji efek komponen arah utara-selatan dari medan magnet antarplanet. Andaikan, vektor medan magnet antarplanet \mathbf{b} dalam sistem koordinat GSE (*geocentric solar ecliptic*) dengan sumbu- x positif GSE mengarah ke Matahari, sumbu- z mengarah ke utara, tegak lurus terhadap bidang ekliptika, dan sumbu- y sesuai aturan tangan kanan, $\hat{\mathbf{e}}_x \times \hat{\mathbf{e}}_y = \hat{\mathbf{e}}_z$ (Hapgood, 1992). Transformasi vektor satuan dari sistem koordinat GSE ke sistem koordinat bola diberikan oleh

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{e}}_x &= -\hat{\mathbf{e}}_r \cos \phi \cos \theta - \hat{\mathbf{e}}_\theta \cos \phi \sin \theta \\ &\quad + \hat{\mathbf{e}}_\phi \sin \phi \\ \hat{\mathbf{e}}_y &= -\hat{\mathbf{e}}_r \sin \phi \cos \theta - \hat{\mathbf{e}}_\theta \sin \phi \sin \theta \\ &\quad + \hat{\mathbf{e}}_\phi \cos \phi \\ \hat{\mathbf{e}}_z &= -\hat{\mathbf{e}}_r \sin \theta - \hat{\mathbf{e}}_\theta \cos \theta \end{aligned}$$



Gambar 4-1: Garis-garis gaya medan magnet dipol tanpa gangguan yang dihitung menggunakan potensial Euler. Jarak dalam arah sumbu-X dan Z dinyatakan dalam satuan radius Bumi. Kontur garis gaya medan magnet dihitung untuk potensial ekuatorial $-0,2818$ mV pada jarak $X = 100R_E$ dengan pertambahan sebesar $0,0019$ mV/m.

Untuk menguji efek komponen utara-selatan dari medan magnet antarplanet, ditinjau medan magnet antarplanet memiliki kekuatan konstan dan hanya berada dalam arah-z (arah utara atau selatan). Uji ini hanya berlaku untuk ruang vakum. Jika komponen medan magnet antarplanet, $b_i = b_z \hat{e}_z$ dilukiskan dalam sistem koordinat bola, diperoleh bentuk

$$\begin{aligned} b_r &= b_z \cos \theta \\ b_\theta &= -b_z \sin \theta \end{aligned} \quad (4-1)$$

yang selanjutnya memberikan komponen azimuth potensial vektor terkait medan magnet antarplanet

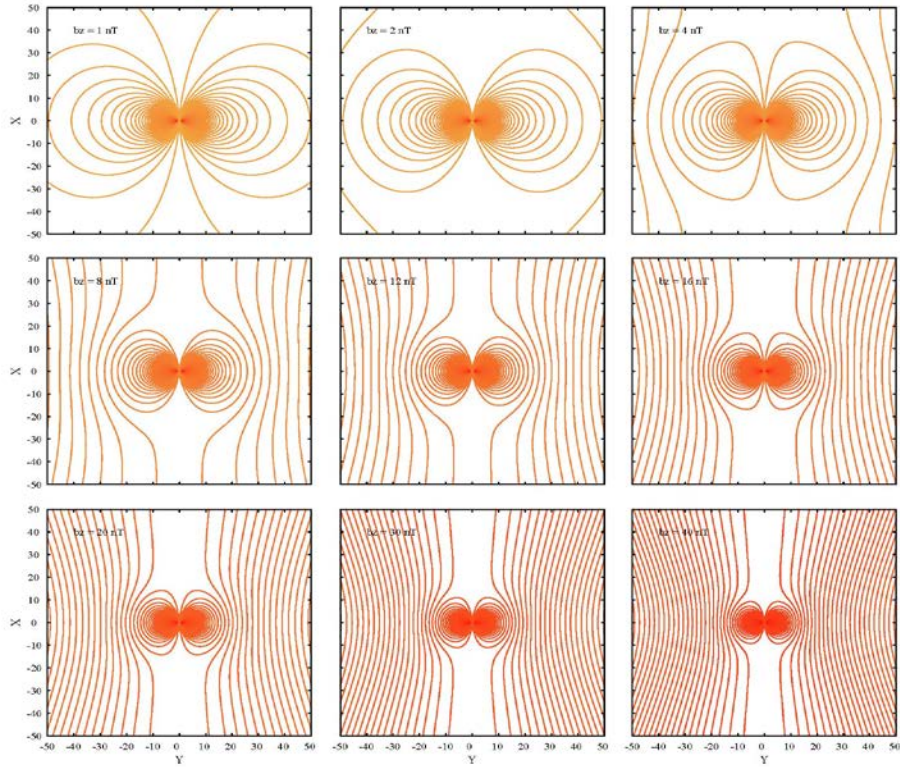
$$A'_\varphi = \frac{b_0}{2} r \sin \theta \quad (4-2)$$

dengan b_0 menyatakan kekuatan medan magnet antarplanet. Dengan demikian fungsi ekuipotensial terkait potensial vektor yang diberikan oleh (3-14) dan (4-2) menjadi

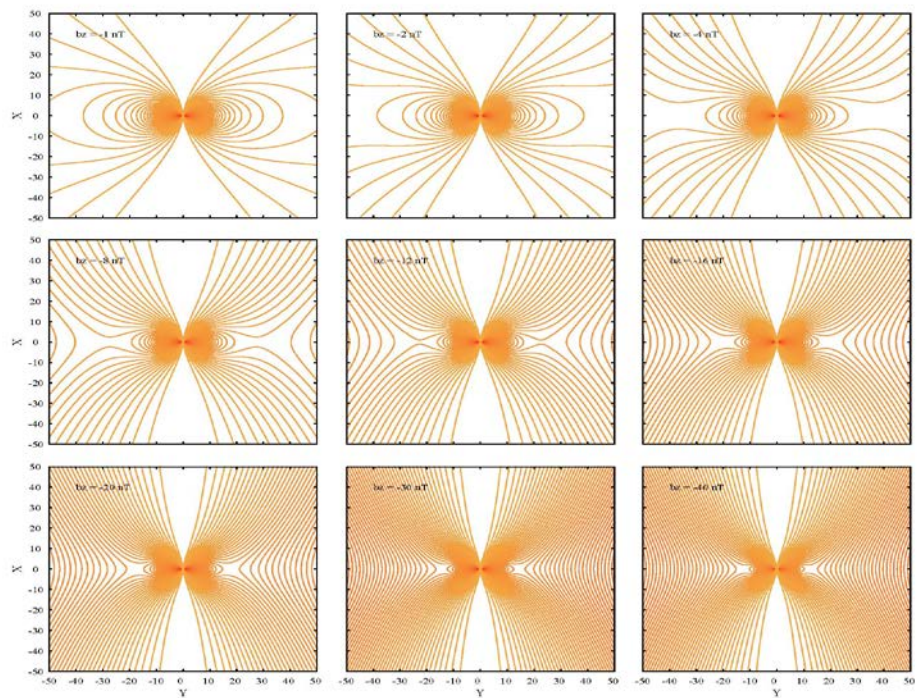
$$r \sin^2 \theta \left(\frac{b_0}{2} - \frac{\kappa}{r^3} \right) = \text{konstan} \quad (4-3)$$

Geometri garis medan berbeda bergantung pada b_0 apakah bernilai positif atau negatif. Untuk kondisi tanpa kehadiran medan magnet antarplanet, persamaan (4-3) tereduksi kembali menjadi (3-14) dan menghasilkan konfigurasi medan magnet dengan garis-garis medan yang ditunjukkan dalam Gambar 4-1.

Kondisi di mana medan magnet antarplanet memiliki komponen arah utara ditunjukkan dalam Gambar 4-2 untuk berbagai nilai kekuatan. Dapat dilihat dalam panel atas bagian kiri bahwa kehadiran medan magnet antarplanet arah utara di sekitar medan dipol geomagnet mengakibatkan terjadinya rekoneksi garis pada daerah kutub. Selain itu, peningkatan kekuatan medan magnet dengan arah-utara juga mengakibatkan terjadinya peningkatan kerapatan garis medan magnet pada daerah sekitar Bumi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4-2.



Gambar 4-2: Konfigurasi medan dipol geomagnet ekuatorial untuk berbagai nilai komponen medan magnet antarplanet arah utara. Kontur garis gaya medan magnet dihitung untuk potensial sebesar $-0,2840$ mV pada jarak $X = 100R_E$ dan bertambah sebesar $0,0019$ mV/m.



Gambar 4-3: Konfigurasi medan dipol geomagnet ekuatorial untuk berbagai nilai komponen medan magnet antarplanet arah selatan. Kontur garis gaya medan magnet dihitung untuk potensial sebesar $-0,2840$ mV pada jarak $X = 100R_E$ dan bertambah sebesar $0,0019$ mV/m.

Di sisi lain, efek dari keberadaan medan magnet antarplanet yang memiliki komponen arah selatan ditunjukkan dalam Gambar 4-3 untuk berbagai nilai kekuatan medan. Dapat dilihat pada semua panel dalam Gambar 4-3 bahwa keberadaan medan magnet antarplanet yang memiliki komponen arah-selatan mengakibatkan terjadinya rekoneksi pada belahan siang dan malam hari. Keberadaan medan magnet antarplanet yang demikian juga mengakibatkan terjadinya kompresi garis-garis medan dipol geomagnet menuju bidang ekuatorial. Selain itu, peningkatan kekuatan medan magnet arah-selatan mengakibatkan titik rekoneksi magnetik mendekati Bumi, selain peningkatan kerapatan garis-garis medan magnet seperti untuk medan magnet antarplanet dengan orientasi menuju utara.

5 DISKUSI DAN RINGKASAN

Selanjutnya, model dipol dari medan geomagnet yang dibahas di atas akan diterapkan untuk kasus badai magnet. Dalam makalah ini dipilih kasus badai magnet yang terjadi pada bulan Juli, 2000. Badai magnet ini merupakan badai magnet besar dan efek maksimum dari badai tersebut teramati melalui terjadinya reduksi medan magnet Bumi sekitar 301 nT pada pukul 01.00 UT, 16 Juli 2000.

Nilai awal untuk input model dipilih pada pukul 04.00, 13 Juli 2000, yaitu ketika gangguan geomagnet yang ditunjukkan melalui indeks Dst adalah 0 nT. Selanjutnya, medan magnet tereduksi hingga mencapai nilai reduksi maksimum dan kemudian diikuti fase-pulih badai magnet hingga tanggal 19 Juli 2000. Informasi mengenai badai magnet ini ditunjukkan dalam panel atas Gambar 5-1. Sedangkan panel bawah Gambar 5-1 menunjukkan data medan magnet antarplanet yang terekam oleh satelit ACE (*Advanced Composition Explorer*) yang ditempatkan pada titik

Lagrangian pada garis yang menghubungkan Matahari-Bumi.

Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4-3 di atas, salah satu efek penting dari keberadaan komponen utara-selatan medan magnet antarplanet adalah rekoneksi magnetik antara medan dipol geomagnet dengan medan magnet antarplanet. Secara teoritis, rekoneksi magnet terjadi pada kondisi di mana medan magnet superposisi bernilai nol. Syarat agar medan magnet superposisi bernilai nol hanya dapat terpenuhi jika kekuatan medan superposisi lenyap. Oleh karena itu, berdasarkan persamaan (2-5) dan (4-1) serta menggunakan (3-14) maka lokasi titik rekoneksi dapat ditentukan melalui hubungan

$$\left(-\frac{2B_s}{L^3} + b_z\right) \cos \theta = 0 \quad (5-1)$$

$$\left(\frac{2B_s}{L^3} + b_z\right) \sin \theta = 0 \quad (5-2)$$

yang menyatakan komponen radial dan latitudinal dari medan superposisi.

Untuk kasus daerah ekuatorial, persamaan (5-1) secara otomatis terpenuhi untuk semua nilai L . Oleh karena itu, lokasi rekoneksi daerah ekuatorial ditentukan dengan menggunakan persamaan (5-2). Oleh karena besaran B_s/L^3 dalam tanda kurung persamaan (5-2) selalu bernilai positif maka syarat rekoneksi pada bidang ekuatorial hanya dapat terjadi untuk b_z negatif, yaitu medan magnet antarplanet dengan orientasi arah selatan.

Untuk daerah kutub, persamaan (5-2) terpenuhi secara otomatis. Sebagai akibatnya, lokasi rekoneksi daerah kutub hanya ditentukan menggunakan persamaan (5-1). Jadi,

$$L_{rp} = \left(\frac{2B_s}{b_z}\right)^{1/3} \quad (5-3)$$

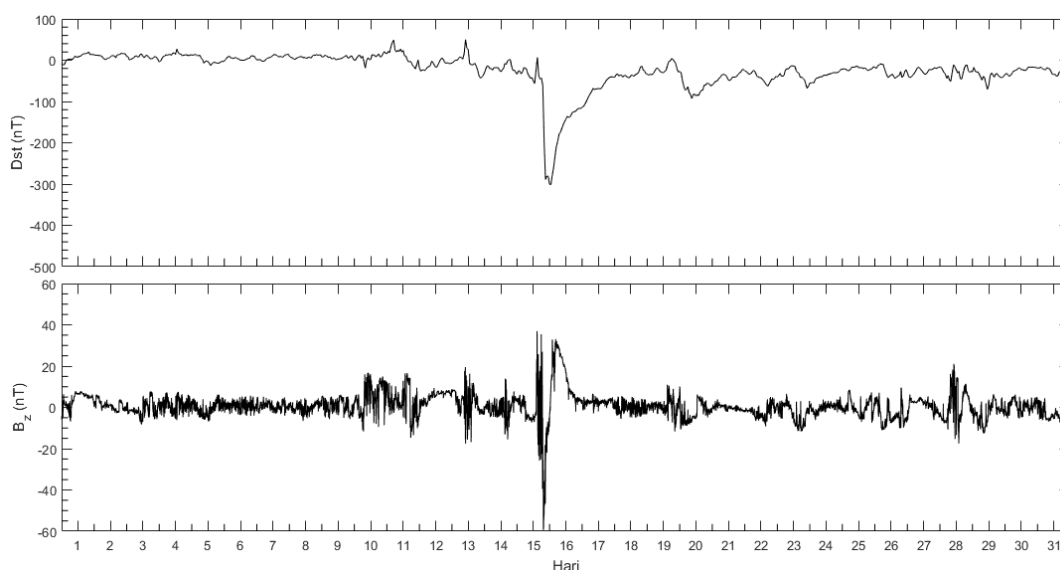
$$L_{re} = \left(\frac{B_s}{b_z}\right)^{1/3} \quad (5-4)$$

dengan L_{rp} dan L_{re} secara berturut-turut menyatakan posisi titik rekoneksi untuk medan magnet antarplanet arah utara dan selatan dalam satuan radius Bumi yang masing-masing berkaitan dengan rekoneksi pada daerah kutub dan ekuatorial.

Berdasarkan data hasil rekaman satelit ACE, fase ekspansi badai magnet diawali oleh SSC (*storm sudden commencement*) yang terjadi pukul 16.00 UT tanggal 15 Juli, 2000 ketika medan magnet mengalami peningkatan hingga 7,0 nT. Peningkatan secara tiba-tiba ini terkait dengan perubahan arah medan magnet antarplanet dari arah utara dengan kekuatan 2,4 nT menjadi -4,0 nT dan kondisi medan magnet antarplanet menuju selatan ini terus berlanjut hingga pukul 23:00 UT dengan maksimum mencapai nilai -59,4 nT yang terjadi pada pukul 19:00 UT. Kekuatan medan magnet arah selatan sebesar 4 nT pada awal fase ekspansi badai mengakibatkan terjadinya rekoneksi magnetik pada garis Matahari-Bumi pada jarak sekitar $19,5R_E$. Sedangkan, pada nilai maksimum kekuatan medan magnet arah selatan -59,4 nT titik rekoneksi berada pada $8,05R_E$. Pada akhir badai magnet sebelum medan magnet Bumi

mengalami fase-pulih, medan magnet antarplanet dengan nilai -1,6 nT mengakibatkan rekoneksi magnetik yang terjadi pada jarak $26,9R_E$.

Hasil ini menggambarkan bahwa untuk kasus badai magnet yang terjadi pada bulan Juli 2000 diawali dengan rekoneksi magnetik pada jarak $19R_E$ dan selanjutnya titik rekoneksi bergerak makin mendekati Bumi hingga pada jarak $8,05R_E$ mengikuti peningkatan kekuatan medan magnet antarplanet arah selatan. Pergerakan titik rekoneksi magnetik yang makin mendekati Bumi ini mengakibatkan injeksi partikel ke dalam lingkungan magnetosfer dan ionosfer menjadi lebih efektif. Walaupun hasil ini tidak memberikan nilai realistis dari lokasi rekoneksi namun model ini memberikan gambaran bahwa peningkatan kekuatan medan magnet arah-selatan selama berlangsungnya badai magnet mengakibatkan posisi rekoneksi magnetik bergerak makin mendekati Bumi. Nilai yang lebih realistis dari titik rekoneksi magnetik harus memperhitungkan lokasi magnetopause yang terbentuk akibat keberadaan tekanan dinamis angin surya yang berada di luar cakupan makalah ini.



Gambar 5-1: Data indeks Dst sebagai representasi dari manifestasi badai magnet pada bulan Juli tahun 2000 ditunjukkan pada panel atas. Sedangkan panel bawah menunjukkan medan magnet antarplanet komponen utara-selatan yang terekam oleh satelit ACE pada rentang waktu yang sama.

6 KESIMPULAN

Telah ditinjau sebuah model analitik untuk membahas efek kehadiran angin surya yang membawa medan magnet antarplanet di sekitar orbit Bumi. Perhitungan kekuatan medan dipol geomagnet dilakukan dengan menerapkan potensial Euler dalam merepresentasikan medan magnet. Cara yang serupa diterapkan dalam meninjau efek keberadaan angin surya yang membawa medan magnet antarplanet di sekitar orbit Bumi.

Dengan model ini ditunjukkan bahwa medan magnet antarplanet yang memiliki komponen arah-utara mengakibatkan terjadinya rekoneksi garis medan pada daerah bagian kutub Bumi, sedangkan medan magnet antarplanet dengan komponen arah-selatan mengakibatkan rekoneksi medan magnet pada bagian siang dan malam di daerah ekuatorial. Peningkatan kekuatan medan baik untuk komponen arah-utara maupun selatan mengakibatkan lokasi titik rekoneksi bergerak mendekati bumi. Model ini juga diuji untuk analisis titik rekoneksi magnetik selama fase ekspansi badai magnet pada bulan Juli, 2000. Fase ekspansi badai diawali oleh rekoneksi magnetik yang terjadi pada jarak $19,5R_E$. Selanjutnya selama fase ekspansi ketika kekuatan medan magnet mencapai nilai maksimum titik terdekat rekoneksi magnetik diukur dari pusat Bumi pada jarak $8,05R_E$ dan pada akhir badai magnet lokasi rekoneksi menjauhi dari Bumi yaitu pada jarak $26,9R_E$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan saran dan masukan konstruktif untuk perbaikan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

Borowsky, J.E., 2013. *Physical-based Solar Wind Driver Functions for the Magnetosphere: Combining the Reconnection-coupled MHD Generator*

- with the Viscous Interaction, *Journal of Geophysical Research*, 118, 7119-7150.
- Chen, S-H., G. Le, and M-C. Fok, 2015. *Magnetospheric Boundary Perturbations on MHD and Kinetic Scales*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 113-137.
- Choe, J.Y., and D.D. Beard, 1974. *The Compressed Geomagnetic Field as a Function of Dipole Tilt*, *Planetary and Space Science*, 22, 4, 595-608.
- Du, A.M., B.T. Tsurutani, and W. Sun, 2011. *Solar Wind Energy Input during Prolonged, Intense North Interplanetary Magnetic Fields: A New Coupling Function*, *Journal of Geophysical Research*, 116, A12215.
- Hapgood, M.A., 1992. *Space Physics Coordinate Transformation: A User Guide*, *Planetary and Space Science*, 40, 711-717.
- Jackson, J.D., 1999. *Classical Electrodynamics, Third Edition*, John Wiley and Sons.
- Kivelson, M.G., and C.T. Russell, 1995. *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press.
- Li, W.H., J. Raeder, M.F. Thomsen, B. Lavraud, 2008. *Solar Wind Plasma Entry into the Magnetosphere under Northward IMF Conditions*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113, A4, 204.
- Liu, W.W., 2012. *Interaction of Solar Wind Pressure with the Magnetosphere: IMF Modulation and Cavity Mode*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117, A08234.
- Maggiolo, E., M. Hamrin, J. De Keyser, T. Pitkanen, G. Cessateur, H. Gunell, L. Maes, 2017. *The Delayed Time Response of Geomagnetic Activity to the Solar Wind*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 11109-11127.
- McGregor, L., M.K. Hudson, and W.J. Hughes, 2014. *Modeling Magnetospheric Response to Synthetic Alfvén Fluctuations in the Solar Wind: ULF Wave Fields in the Magnetosphere*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 8801-8812.
- McIlwain, C.E., 1961. *Coordinates for Mapping the Distribution of Magnetically Trapped*

- Particles, *Journal of Geophysical Research*, 66, 3681-3691.
- McIlwain, C.E., 1966. *Magnetic Coordinates, in Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field*, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.
- Mead, G.D., 1964. *Deformation of the Geomagnetic Field by the Solar Wind*, *Journal of Geophysical Research*, 69, 1181-1195.
- Mead, G.D., and D.H. Fairfield, 1975. *A Quantitative Magnetospheric Model Derived from Spacecraft Magnetometer Data*, *Journal of Geophysical Research*, 80, 523-534.
- Midgley, J.E., 1964. *Perturbation of the Geomagnetic Field-A Spherical Harmonic Expansion*, *Journal of Geophysical Research*, 69, 1197-1200.
- Olson, W.P., and K.A. Pfitzer, 1974. *A Quantitative Model of the Magnetospheric Magnetic Field*, *Journal of Geophysical Research*, 79, 3739-3748.
- Parks, G.K., 2004, *Physics of Space Plasmas: An Introduction, Second Edition*, Westview Press, Advanced Book Programs.
- Price, L., M. Swisdak, J.F. Drake, J.L. Burch, P. A. Cassak, R.E. Ergun, 2017. *Turbulence in Three-dimensional Simulations of Magnetopause Reconnection*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 11086-11099.
- Roederer, J.G., (1969). *Quantitative Models of the Magnetosphere*, *Review of Geophysics*, 7, 77-96.
- Shi, Y., C.C. Wu, and L.C. Lee, 1991. *Magnetic Field Reconnection Patterns at the Dayside Magnetopause: An MHD Simulation Study*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 96, 17627-17650.
- Song, P., D.L. DeZeeuw, T.I. Gombosi, C.P.T. Groth, K.G. Powell, 1999. *A Numerical Study of Solar Wind-Magnetosphere Interaction for Northward Interplanetary Magnetic Field*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104, 28361-28378.
- Tasnim, S., I.H. Cairns and M.S. Wheatland, 2018. *A Generalized Equatorial Model for the Accelerating Solar Wind*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 1061-1085.
- Walt, M., 2005. *Introduction to Geomagnetically Trapped Radiation*, Cambridge University Press.
- Williams, D.J., and G.D. Mead, 1965. *Nightside Magnetospheric Configuration as Obtained from Trapped Electrons at 1100 Kilometers*, *Journal of Geophysical Research*, 70, 3017-3029.
- Zhang, J., I.G. Richardson, D.F. Webb, N. Gopalswamy, E. Huttunen, J.C. Kasper, N.V. Nitta, W. Poomvises, B.J. Thompson, C.C. Wu, S. Yashiro, A.N. Zhukov, 2007. *Solar and Interplanetary Sources of Major Geomagnetic Storms ($Dst \leq 100$ nT) During 1996-2005*, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112, A10102.

