



## Prosiding Seminar Sains Antariksa



Homepage: <http://www.lapan.go.id>

### PEMODELAN KORONA MATAHARI GLOBAL UNTUK PRAKIRAAN PENAMPAKANNYA SAAT GERHANA MATAHARI TOTAL (Global Solar Coronal Modeling for the Prediction of Its Appearance During Total Solar Eclipse)

Johan Muhamad dan Agustinus Gunawan Admiranto

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

e-mail: [johan.muhamad@lapan.go.id](mailto:johan.muhamad@lapan.go.id)

#### ABSTRAK

##### Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015

Direvisi: 16-10-2016

Disetujui: 19-10-2016

Diterbitkan: 24-10-2016

##### Kata kunci:

Gerhana Matahari  
Total, Korona,  
Magnetogram, Medan  
magnet, Pemodelan,  
PFSS

Gerhana Matahari Total (GMT) dapat menyingkap penampakan korona Matahari dari permukaan Bumi. Sebagai pengejawantahan dari struktur medan magnet di atmosfer Matahari, bentuk korona sangat dipengaruhi oleh medan magnet di permukaan Matahari. Pada penelitian ini, kami membuat ulang secara teoretis medan magnet di korona pada dua peristiwa GMT, 29 Maret 2006 dan 13 November 2012, berdasarkan data medan magnet global di permukaan Matahari dengan model *Potential Field Source Surface* (PFSS). Informasi medan magnet global di permukaan Matahari diperoleh dari data magnetogram sinoptik sebelum terjadi GMT. Dua penampakan korona pada dua GMT pada periode aktivitas Matahari yang berbeda tersebut dibandingkan untuk melihat perbedaan karakteristik korona Matahari dan akurasi pemodelan. Hasil pemodelan memperlihatkan bahwa model PFSS dapat menghasilkan fitur korona secara umum, terutama loop penghasil *helmet streamer* besar yang dihasilkan oleh medan magnet tertutup raksasa di Matahari. Dengan membandingkan medan magnet korona hasil pemodelan dan pengamatan GMT, disimpulkan bahwa penampakan korona pada GMT yang akan datang dapat diprakirakan sebelum GMT tersebut terjadi.

#### ABSTRACT

##### Keywords:

Total Solar Eclipse,  
Corona, Magnetogram,  
Magnetic field, Modeling,  
PFSS

Total solar eclipse (TSE) can unveil solar corona from the surface of the Earth. As the manifestation of the magnetic field structure of solar atmosphere, the shape of the corona strongly depends on the photospheric magnetic field. In this work, we theoretically reconstructed coronal magnetic fields of two TSEs on March 29<sup>th</sup>, 2006 and November 13<sup>th</sup>, 2012, based on the global photospheric magnetic field by using Potential-Field Source Surface (PFSS) model. Information of the photospheric magnetic field was obtained from the synoptic magnetogram data before the contact time of TSE. These two appearances of TSEs from different solar activity period were compared to identify the characteristics of the corona as well as the accuracy of the model. The model shows that PFSS can reproduce general features of the corona, particularly loops that produce large helmet streamers from the giant closed fields in the Sun. By comparing the model and the observation, we can conclude that the coronal appearance of the TSE can be inferred before the TSE takes place.

## 1. Pendahuluan

Gerhana Matahari Total (GMT) terjadi saat posisi Bumi, Bulan, dan Matahari berada pada satu garis lurus pada bidang ekliptika dengan Bulan berada di antara Bumi dan Matahari. GMT teramati di sebagian wilayah di muka Bumi pada satu lintasan proyeksi bayangan inti Bulan (umbra) yang menandakan bahwa permukaan Bumi yang dilewati lintasan tersebut akan mengalami kegelapan. Saat GMT terjadi, pengamat yang berada di lintasan tersebut akan dapat melihat seluruh piringan Matahari tertutup oleh Bulan selama waktu tertentu sepanjang waktu kontak maksimum. Sebagian wilayah di Indonesia pernah mengalami GMT tanggal 11 Juni 1983 dan akan kembali mengalaminya pada 9 Maret 2016.

Pada saat puncak GMT terjadi, cahaya dari permukaan Matahari tidak dapat dilihat di wilayah yang dilintasi GMT sehingga terjadi kegelapan. Namun, di sekeliling piringan Matahari akan tampak pendaran cahaya putih dengan bentuk tertentu. Pendaran cahaya tersebut adalah emisi korona Matahari yang pada saat tidak terjadi GMT terlalu redup untuk dapat dilihat dari Bumi. Korona Matahari merupakan lapisan terluar dari atmosfer Matahari yang suhunya dapat mencapai jutaan Kelvin. Bentuk korona merupakan pengejawantahan *loop* medan magnet yang kakinya tertanam di bawah permukaan Matahari. Oleh karena itu, bentuk korona sangat berkaitan erat dengan medan magnet di permukaan Matahari.

Dengan teknologi yang ada hingga saat ini, medan magnet di korona tidak dapat diukur dan diamati secara langsung. Oleh karena itu, korona Matahari hanya dapat diperkirakan bentuknya melalui ekstrapolasi medan magnet yang tampak di permukaan Matahari (fotosfer). Berbeda dengan di korona, medan magnet di fotosfer telah dapat diamati dan diukur dengan baik. Berbekal informasi medan magnet di fotosfer tersebut, medan magnet di korona dapat dimodelkan dengan menggunakan beberapa teknik ekstrapolasi. Pemodelan korona sangat penting, khususnya untuk memahami proses terjadinya flare dan lontaran massa korona (CME).

Pemodelan korona secara global (*full disk*) dapat memberikan gambaran mengenai kondisi di Matahari secara umum. Oleh karena itu, penting sekali untuk mengetahui seberapa akurat model yang dibuat bila dibandingkan

dengan objek korona sebenarnya. Atas dasar itu, maka momen GMT menjadi sarana yang sangat berharga untuk dapat memperoleh gambaran bentuk korona agar dapat dibandingkan dengan model yang dibuat.

Dalam makalah ini, kami menampilkan hasil pemodelan korona dengan metode *Potential Field Source Surface* (PFSS) dan membandingkannya dengan korona yang tampak pada saat terjadi GMT. Dengan perbandingan tersebut, diharapkan dapat diketahui sejauh mana akurasi model PFSS terhadap hasil pengamatan.

Untuk pengujian, korona pada dua peristiwa GMT tanggal 29 Maret 2006 dan 13 November 2012 direkonstruksi ulang. Perbandingan dua GMT pada periode aktivitas Matahari yang berbeda ini dapat memberikan karakteristik perilaku korona pada saat aktivitas Matahari minimum dan maksimum. Adapun prakiraan penampakan korona pada GMT di waktu yang akan datang, seperti tanggal 9 Maret 2016, lebih dimaksudkan sebagai sarana membangun publisitas LAPAN kepada masyarakat. Lebih jauh dari itu, model korona global dapat digunakan sebagai masukan bagi pemodelan angin surya untuk prakiraan kondisi cuaca antariksa.

## 2. Landasan Teori

Pemodelan korona Matahari dapat dilakukan terhadap suatu daerah aktif tertentu (lokal) atau seluruh permukaan Matahari (global). Pemodelan korona dapat dibuat dengan menganggap bahwa korona Matahari secara dominan dikendalikan oleh medan magnet. Hal ini dapat dibenarkan mengingat tekanan plasma pada bagian atas korona jauh lebih kecil daripada tekanan magnet, yang dinyatakan dalam parameter plasma beta yang rendah ( $\beta < 1$ ) (Gary, 2001).

Beberapa teknik pemodelan korona telah dikembangkan dengan menggunakan data magnetogram di fotosfer sebagai masukannya. Diantara beberapa teknik tersebut ialah *Potential Field Source Surface* (PFSS), *Non-linear Force Free Field* (NLFFF), *magnetohydrostatic* (MHS), dan *full magnetohydrodynamics* (MHD) (Mackay dan Yeates, 2012). Pemodelan dengan teknik PFSS merupakan metode paling umum digunakan karena relatif lebih mudah dibandingkan metode lainnya.

PFSS pertama kali dikembangkan oleh Schatten et al. (1969) dan Altschuler dan

Newkirk (1969) untuk menjelaskan struktur medan magnet korona dalam kaitannya dengan angin surya. Prinsip dasar dari metode ini ialah penyelesaian persoalan medan potensial pada koordinat bola dengan menggunakan dua sarat batas. Medan potensial berarti bahwa korona dianggap bebas arus (*current free*) sehingga tidak ada gaya Lorentz yang bekerja. Sedangkan dua sarat batas diperoleh dari data medan magnet radial di permukaan Matahari serta satu permukaan sumber (*source surface*) yang berada pada ketinggian tertentu ( $R_{ss}$ ). Dalam metode PFSS, medan magnet pada permukaan sumber dianggap sepenuhnya radial sehingga seluruh komponen tangensial pada ketinggian ini dianggap nol.

Pada awalnya, masukan medan magnet fotosfer dari magnetogram diperoleh untuk komponen garis pandang (*line of sight*). Wang dan Sheeley (1992) menyempurnakan teknik perhitungan PFSS dengan masukan berupa komponen radial. Dalam mencari solusi PFSS, anggapan bahwa tidak adanya arus listrik di korona berarti bahwa, sehingga vektor medan magnet,  $B$ , dapat dinyatakan sebagai,

$$B = -\nabla\psi, \quad \dots (2-1)$$

Dengan  $\psi$  merupakan skalar potensial. Untuk memenuhi aturan Gauss pada medan magnet,  $\nabla \cdot B = 0$ , maka dapat diperoleh,

$$\nabla^2\psi = 0. \quad \dots (2-2)$$

Persamaan (2-2) merupakan persamaan Laplace dan dapat dicari solusinya pada koordinat bola dengan menggunakan teknik separasi variabel. Dengan mengetahui solusi persamaan (2-2), maka solusi untuk medan magnet pada tiga komponen vektor dapat dinyatakan sebagai persamaan (2-3), (2-4), dan (2-5) berikut (Mackay dan Yeates, 2012),

$$B_r(r, \theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l b_{lm} c_l(r) P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi} \quad \dots (2-3)$$

$$B_{\theta}(r, \theta, \varphi) = -\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l b_{lm} d_l(r) \frac{dP_l^m(\cos \theta)}{d\theta} e^{im\varphi} \quad \dots (2-4)$$

$$B_{\varphi}(r, \theta, \varphi) = -\sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \frac{im}{\sin \theta} b_{lm} d_l(r) P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad \dots (2-5)$$

dengan

$$c_l(r) = \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-l-2} \left[ \frac{l+1+l(r/R_{ss})^{2l+1}}{l+1+l(R_s/R_{ss})^{2l+1}} \right] \quad \dots (2-6)$$

$$d_l(r) = \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-l-2} \left[ \frac{1-(r/R_{ss})^{2l+1}}{l+1+l(R_s/R_{ss})^{2l+1}} \right] \quad \dots (2-7)$$

$R_s$  adalah jari-jari Matahari,  $R_{ss}$  adalah jarak permukaan sumber,  $b_{lm}$  merupakan koefisien harmonik bola (*spherical harmonic*) dari komponen medan magnet radial pada permukaan Matahari, merupakan polinomial Legendre terkait (*associated Legendre polynomial*). Bilangan  $l$  dan  $m$  pada persamaan (2-3) hingga (2-7) merupakan orde dan derajat harmonik bola yang secara praktis bernilai terbatas (*finite*) antara 1 sampai  $L_{max}$ .

Untuk mencari solusi medan potensial pada PFSS, hanya diperlukan medan magnet radial sebagai masukan. Jika kita memiliki informasi medan magnet radial pada fotosfer, maka secara praktis kita dapat membuat model korona di Matahari dengan teknik PFSS dengan menghitung persamaan (2-3) sampai (2-7). Adapun informasi medan magnet radial dapat diperoleh dari data magnetogram yang dapat disusun secara sinoptik untuk menghasilkan informasi permukaan Matahari global. Sedangkan jarak permukaan sumber ( $R_{ss}$ ) merupakan parameter bebas yang dapat ditentukan dalam pembuatan model, tetapi umumnya digunakan besaran  $2.5 R_s$  mengikuti Altschuler dan Newkirk (1969).

Pengamatan korona Matahari selama ini menunjukkan bahwa bentuk korona Matahari berubah sesuai dengan kondisi aktivitas di Matahari (Loucif dan Koutchmy, 1988). Perubahan bentuk korona mengindikasikan perlunya penyesuaian parameter pada model PFSS yang akan dibuat. Parameter penting yang dapat disesuaikan agar dapat memodelkan korona dengan baik ialah jarak permukaan sumber. Penyelidikan atas jarak permukaan sumber pada PFSS sebagai pengaruh dari variasi aktivitas di Matahari menunjukkan bahwa nilai  $R_{ss}$  cenderung meningkat saat aktivitas Matahari minimum (Arden et al., 2014).

Pada makalah ini, ditunjukkan bagaimana perubahan struktur korona saat periode Matahari aktif dan tenang. Dengan membandingkan dua model dan dua pengamatan pada aktivitas Matahari yang berbeda, diharapkan dapat diketahui parameter jarak permukaan sumber yang tepat untuk dua fase yang berbeda. Parameter jarak permukaan sumber yang tepat ini digunakan

dalam prakiraan penampakan GMT yang akan terjadi di masa mendatang.

### 3. Data dan Metode

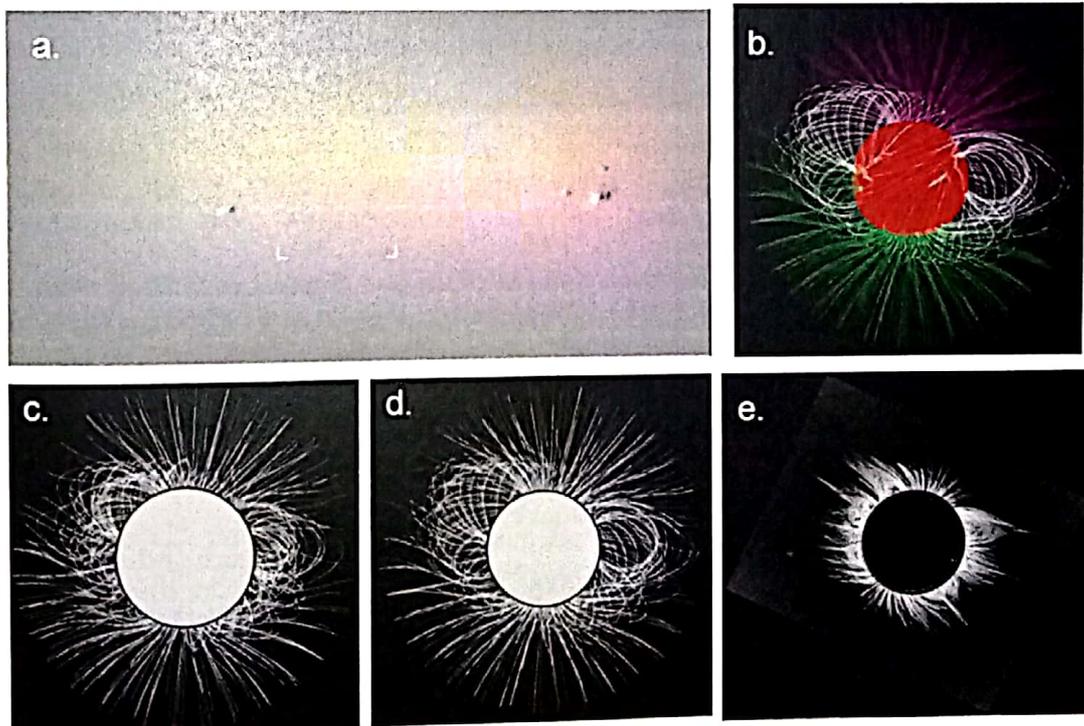
Sebagai masukan model PFSS digunakan data asimiliasi magnetogram sinoptik pada basis data *solar software* (SSW) (Schrijver dan DeRosa, 2003). Untuk studi, dipilih dua kejadian GMT yang berbeda yakni 29 Maret 2006 dan 13 November 2012. Data tersebut dibuat dari magnetogram *Michelson Doppler Imager* (MDI) pada wahana *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). Data-data tersebut dapat diperoleh secara online melalui paket PFSS pada SSW yang dijalankan melalui perangkat lunak IDL.

Pembuatan model korona dilakukan dengan menggunakan paket PFSS pada SSW yang dibuat oleh Marc DeRosa dan Carolus Schrijver (model LMSAL) dengan mengatur parameter jarak permukaan sumber dan orientasi penampakan Matahari dari Bumi. Pada kasus GMT saat periode Matahari tenang (29 Maret 2006), digunakan parameter jarak

permukaan sumber ( $R_{ss}$ ) sebesar  $2.5 R_s$  dan  $2.9 R_s$ . Sementara itu, untuk GMT pada periode Matahari aktif digunakan parameter jarak permukaan sumber ( $R_{ss}$ ) sebesar  $2 R_s$  dan  $2.5 R_s$ .

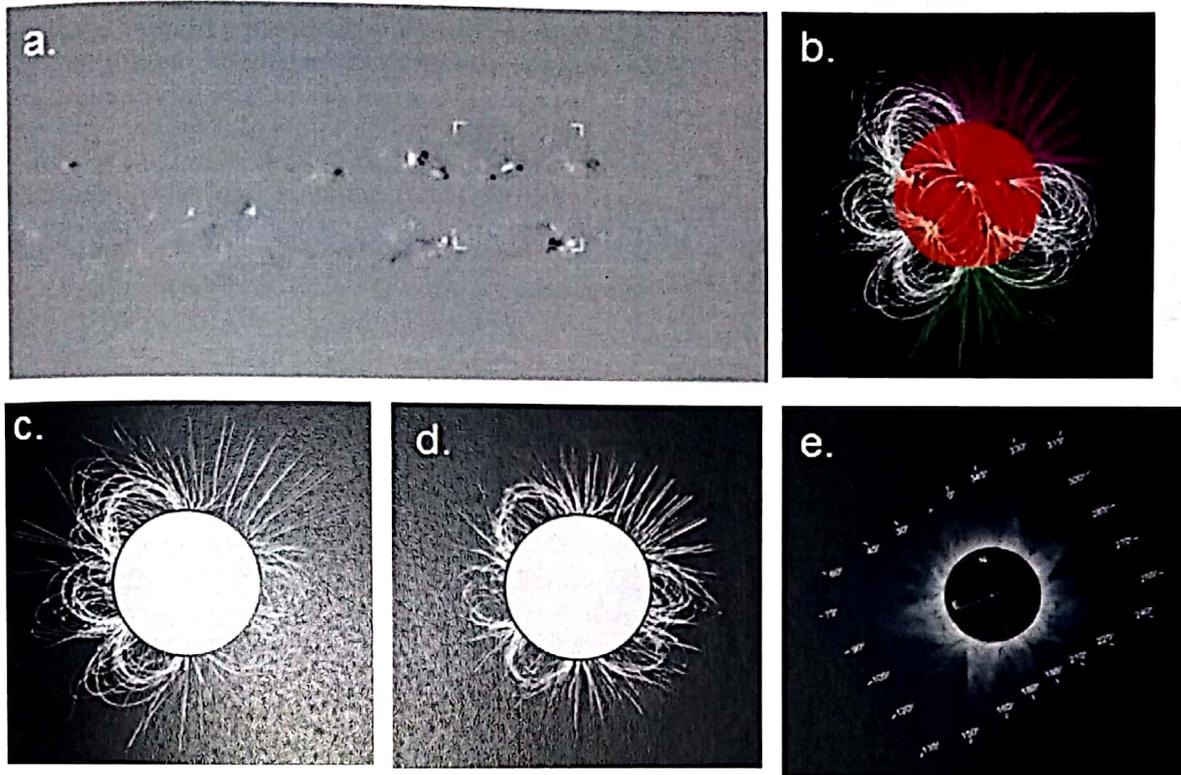
Karena keterbatasan data, untuk GMT tahun 2006 digunakan data magnetogram tanggal 29 Maret 2006 pukul 06:04 UT atau sekitar 4 jam sebelum waktu puncak GMT pukul 10:12 UT. Sedangkan untuk GMT tahun 2012, digunakan data magnetogram pada 13 November 2012 pukul 18:04 UT atau sekitar 4 jam sebelum puncak gerhana pukul 22:12 UT.

Untuk uji verifikasinya, digunakan hasil pengamatan GMT pada beberapa penelitian sebelumnya. Pada GMT tanggal 29 Maret 2006, data diperoleh dari pengamatan dengan menggunakan fotografi *white-light* yang dilakukan di Helwan, Mesir (Ambrož et al., 2009). Sementara itu, untuk GMT tanggal 13 November 2012, data diperoleh dari pengamatan di Queensland, Australia (Pasachoff et al., 2015).



**Gambar 4-1.** (a) Peta magnetogram sinoptik medan magnet radial 29 Maret 2006 pukul 06.04 UT sebagai masukan model PFSS. Daerah persegi yang berada di dalam batas empat tanda siku putih merupakan daerah yang menghadap Bumi. (b) Model PFSS untuk korona Matahari dengan  $R_{ss} = 2.5 R_s$  merupakan daerah yang menghadap Bumi. (c) Model PFSS seperti pada gambar (b) dengan garis putih menandakan medan magnet tertutup. (d) Model PFSS seperti pada gambar (b) dengan garis merah menandakan medan magnet terbuka ke luar Matahari, dan mengarah ke dalam Matahari, garis hijau merupakan medan magnet terbuka ke luar Matahari, dan mengarah ke dalam Matahari. (e) Model PFSS seperti pada gambar (b) dengan garis hitam menandakan medan magnet tertutup.

warna hitam putih dan muka piringan Matahari ditutup dengan lingkaran abu-abu untuk menimbulkan efek gerhana. (d) Model PFSS dengan  $R_{ss} = 2.5 R_s$  dan pengaturan tampilan seperti pada gambar (c). (e) Hasil pengamatan GMT 29 Maret 2006 dari Mesir dengan penyesuaian orientasi sumbu Matahari diputar 26 derajat searah jarum jam dari gambar aslinya (Ambrož et al, 2009) sehingga sesuai dengan orientasi saat tampak dari Bumi.



**Gambar 4-2.** (a)Peta magnetogram sinoptik medan magnet radial 13 November 2012 pukul 18.04 UT sebagai masukan model PFSS. Daerah persegi yang berada di dalam batas empat tanda siku putih merupakan daerah yang menghadap Bumi. (b) Model PFSS untuk korona Matahari dengan  $R_{ss} = 2.5 R_s$  dengan orientasi seperti tampak dari Bumi. (c) Model PFSS seperti pada gambar (b) dengan warna hitam putih. (d) Model PFSS dengan  $R_{ss} = 2 R_s$ . Seluruh pengaturan tampilan sama seperti gambar 4-1. (e) Hasil pengamatan GMT 13 November 2012 dari Australia dengan penyesuaian orientasi sumbu Matahari diputar 22 derajat berlawanan arah jarum jam dari gambar aslinya (Pasachoff et al, 2015) sehingga sesuai dengan orientasi saat tampak dari Bumi.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Peta sinoptik sebagai masukan model dan hasil pemodelan korona dengan metode PFSS untuk GMT 29 Maret 2006 ditampilkan pada Gambar 4-1. Pada Gambar 4-1(a) tampak hanya terdapat dua daerah aktif besar pada peta sinoptik. Ini menunjukkan bahwa kondisi Matahari secara umum berada pada kondisi tidak terlalu aktif. Daerah Matahari yang menghadap Bumi pada peta sinoptik berada di dalam daerah persegi yang dibatasi oleh empat tanda siku putih. Dari Gambar ini terlihat bahwa hampir tidak ada daerah aktif pada daerah

tersebut kecuali satu daerah aktif di sebelah kiri area persegi yang merupakan daerah aktif peninggalan rotasi sebelumnya. Daerah aktif ini akan sangat mempengaruhi bentuk korona karena posisinya di dekat tepian piringan Matahari.

Gambar 4-1(b) menunjukkan pemodelan korona global dengan menggunakan PFSS untuk  $R_{ss} = 2.9 R_s$ . Tampak pada gambar tersebut bahwa korona didominasi oleh fluks terbuka pada kedua kutub Matahari. Secara umum, penampakan korona lebih tampak seperti medan dipole karena sedikitnya daerah aktif di lintang rendah. Adanya daerah aktif di sisi jauh Matahari mempengaruhi bentuk korona di

sebelah barat sehingga menciptakan medan tertutup yang cukup besar.

Gambar 4-1(c) dan 4-1(d) memperlihatkan perbedaan antara dua model PFSS untuk jarak permukaan sumber masing-masing  $2.5 R_s$  dan  $2.9 R_s$ . Untuk menciptakan efek seperti penampakan gerhana, digunakan warna hitam/putih dan abu-abu pada gambar dan permukaan Matahari yang menghadap Bumi ditutup sehingga tidak tampak garis gaya magnet di muka piringan Matahari. Secara umum, tidak tampak banyak perbedaan antara kedua model tersebut. Gambar 4-1(d) memperlihatkan *loop* medan tertutup yang lebih panjang di sebelah barat piringan Matahari dibandingkan Gambar 4-1(c). Sementara di sisi timur, terdapat lebih banyak *loop* besar pada gambar 4-1(d) dibandingkan 4-1(c). Hal ini disebabkan oleh jarak permukaan sumber untuk Gambar 4-1(d) lebih besar ( $R_{ss} = 2.9 R_s$ ) dibandingkan Gambar 4-1(c), sehingga mengakibatkan memungkinkan terbentuknya *loop* yang lebih jauh jangkauannya dari permukaan Matahari.

Gambar 4-1(e) memperlihatkan korona Matahari hasil pengamatan GMT yang telah disesuaikan orientasinya dari gambar aslinya sehingga sesuai dengan penampakannya dari muka Bumi. Bila hasil pengamatan (Gambar 4-1(e)) dibandingkan dengan model PFSS (Gambar 4-1(c) dan 4-1(d)), tampak terdapat kesesuaian bentuk korona secara umum dengan garis gaya magnet pada model. Model PFSS tampak dapat merekonstruksi struktur-struktur besar pada korona, tetapi tidak cukup jelas menghasilkan detail pada struktur-struktur yang relatif kecil. Hal ini dapat disebabkan oleh kemungkinan adanya daerah aktif kecil yang baru muncul dan tidak terdapat pada peta sinoptik yang dijadikan masukan bagi model. Selain itu, persoalan ini juga dapat disebabkan oleh penggunaan harmonik bola dengan orde yang tidak terlalu tinggi sehingga tidak dapat menghasilkan detail struktur medan magnet pada permukaan Matahari.

Bentuk korona pada peristiwa GMT 29 Maret 2006 baik secara pengamatan maupun model PFSS sesuai dengan pemahaman bahwa korona Matahari cenderung axisimetri pada saat fase minimum (Saito et al., 1977). Hal ini dikarenakan tidak ada atau sedikitnya daerah aktif di ekuator yang menyebabkan medan magnet global di Matahari membentuk medan dipole sederhana. Pada kondisi ini, *streamer* yang muncul akan terkonsentrasi di ekuator sehingga menghasilkan bentuk korona yang memanjang di daerah ekuator. Dalam proses dinamo di interior

Matahari, keadaan ini menandakan dominannya medan poloidal di Matahari dibandingkan medan toroidal (efek- $\alpha$ ).

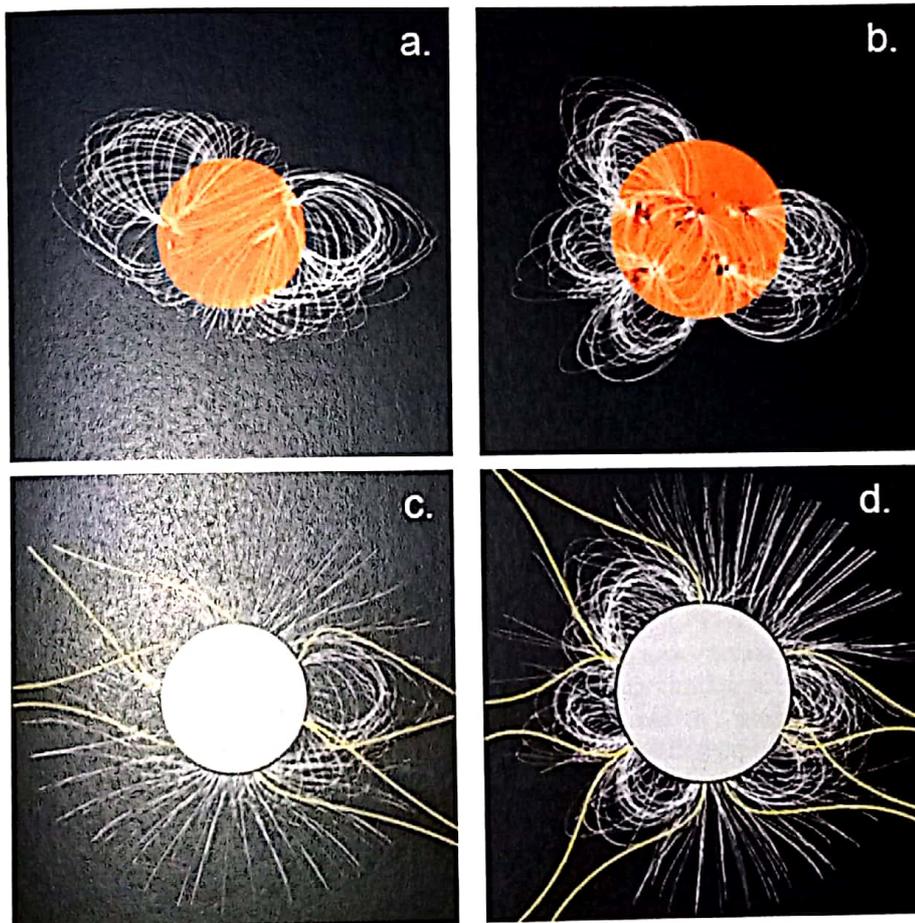
Dalam Gambar 4-2 ditunjukkan peta sinoptik dan hasil pemodelan metode PFSS untuk kejadian GMT 13 November 2012. Tampak pada peta sinoptik di Gambar 4-2(a) bahwa banyak terdapat daerah aktif di seluruh permukaan Matahari, terutama di sekitar sisi Matahari yang menghadap Bumi. Ini menandakan bahwa Matahari dalam keadaan yang cukup aktif. Kami menduga bahwa pada sisi jauh Matahari terdapat lebih banyak daerah aktif baru yang muncul, tetapi tidak terdeteksi pada peta sinoptik. Sayangnya, daerah aktif tersebut belum tampak pada saat rotasi Matahari membawa sisi tersebut ke arah menghadap Bumi. Hal ini penting karena adanya lebih banyak daerah aktif dapat menyebabkan pengaruh yang signifikan terhadap bentuk korona secara keseluruhan.

Gambar 4-2(b) memperlihatkan hasil model PFSS untuk  $R_{ss} = 2.5 R_s$ . Dari hasil model PFSS tersebut tampak bahwa korona Matahari cenderung lebih banyak didominasi oleh medan magnet tertutup. Hal ini disebabkan oleh banyaknya daerah aktif di Matahari sehingga pembentukan *loop* tertutup baik antara kutub magnet dan daerah aktif maupun sesama daerah aktif menjadi semakin mudah. Medan magnet tertutup terdapat hampir di semua sisi Matahari, kecuali di arah barat laut yang cenderung terbuka. Ketiadaan daerah aktif di sisi barat Matahari yang tidak membelakangi Bumi diperkirakan menjadi sebab tidak terbentuknya medan tertutup pada daerah tersebut.

Seperti pada kasus GMT sebelumnya, untuk memunculkan efek gerhana, warna model pada Gambar 4-2(c) dan 4-2(d) dibuat hitam/putih dan abu-abu serta bagian piringan yang menghadap Bumi ditutup. Gambar 4-2(c) dan 4-2(d) menunjukkan hasil model PFSS dengan jarak permukaan sumber masing-masing sebesar  $2.5 R_s$  dan  $2 R_s$ . Tidak ada perbedaan yang signifikan antara kedua model tersebut, kecuali bentuk *loop* tertutup yang lebih lancip pada model di Gambar 4-2(d). Hal ini disebabkan karena semakin pendeknya jarak permukaan sumber, berarti semakin cepat medan magnet menjadi sepenuhnya radial. Perbandingan korona pada kedua model ini menunjukkan bahwa model kanonikal dengan  $R_{ss} = 2.5 R_s$  lebih sesuai dengan hasil pengamatan di korona dibandingkan dengan model dengan jarak permukaan sumber lebih pendek.

Hasil pengamatan GMT 13 November 2012 ditampilkan pada Gambar 4-2(e). Dari gambar ini dapat dilihat bahwa bentuk korona cenderung tertutup pada hampir semua sisi Matahari. Perbandingan hasil pengamatan dan model PFSS menunjukkan bahwa model PFSS mampu merekonstruksi beberapa *loop* tertutup di sisi timur dan barat daya Matahari, tetapi gagal merekonstruksi dua *loop* besar di sisi barat laut. Hal ini diduga disebabkan oleh tidak terdeteksinya beberapa daerah aktif di sisi

Matahari yang membelakangi Bumi sehingga di sekitar area tersebut medan magnet menjadi terbuka. Secara umum, pemodelan korona Matahari pada saat fase aktif Matahari memang lebih sulit dilakukan karena detail daerah aktif yang banyak bermunculan di Matahari tidak dapat diuraikan secara jelas dengan orde harmonik bola yang rendah.



Gambar 4-3. (a) Model PFSS GMT 29 Maret 2006 untuk  $R_{ss} = 2.9R_s$  dengan hanya medan tertutup yang ditampilkan. (b) Model PFSS GMT 13 November 2012 untuk  $R_{ss} = 2.5R_s$  dengan hanya medan tertutup yang ditampilkan. (c) Interpretasi kemungkinan pembentukan helmet streamer yang dihasilkan oleh model PFSS untuk GMT 29 Maret 2006 dan (d) 13 November 2012.

Secara umum, bentuk korona Matahari pada saat fase maksimum menunjukkan bentuk yang simetri pada semua sisi (*spherically symmetric*) (Saito et al., 1977). Bentuk ini dapat dilihat pada pengamatan kasus GMT 13 November 2012. Meskipun tidak dapat merekonstruksi bentuk ini secara sempurna, model PFSS cukup dapat membantu melihat kecenderungan umum korona dengan mereproduksi beberapa *loop* tertutup di

Matahari. Dalam kaitannya dengan proses dinamo, fase maksimum Matahari terkait dengan semakin dominannya efek- $\omega$  yang menandakan bahwa medan toroidal telah cukup terbentuk di Matahari. Hal ini menyebabkan bentuk korona cenderung menyimpang dari sekedar bentuk dipole sederhana.

Untuk membandingkan hasil pemodelan pada fase minimum dan maksimum,

ditampilkan perbandingan dua model pada Gambar 4-3. Dari perbandingan medan magnet tertutup untuk kedua hasil model, dapat dilihat dengan jelas bahwa korona pada fase minimum menghasilkan bentuk korona yang simetri terhadap sumbu kutub-kutub Matahari. Sementara korona pada fase maksimum cenderung simetri pada semua sisi.

Sebagai konsekuensi dari adanya loop tertutup dengan ukuran raksasa, maka

## 5. Kesimpulan

Hasil pemodelan korona pada dua peristiwa GMT yang terjadi pada dua fase aktivitas Matahari yang berbeda menunjukkan bahwa model PFSS dapat merekonstruksi fitur-fitur umum pada korona Matahari. Model PFSS dapat menghasilkan *loop-loop* magnet besar yang berasosiasi dengan *helmet streamer* yang tampak pada pengamatan korona saat GMT. Perbandingan model PFSS saat fase matahari minimum dan maksimum menunjukkan bahwa model PFSS bekerja lebih baik untuk memodelkan korona saat fase minimum. Hal ini disebabkan karena korona Matahari pada saat fase minimum lebih sederhana dibandingkan dengan saat maksimum. Selain itu, pada saat Matahari mencapai fase maksimum, terdapat banyak detail daerah aktif yang seringkali tidak dapat sepenuhnya tampil pada magnetogram yang digunakan sebagai masukan model. Hal ini dapat terjadi karena faktor rendahnya orde harmonik bola maupun faktor tidak terekamnya informasi kemunculan daerah aktif baru saat membuat peta sinoptik.

Berdasarkan pengujian model PFSS dengan hasil pengamatan GMT, diketahui bahwa model PFSS cukup sensitif terhadap parameter jarak permukaan sumber. Untuk pemodelan Matahari saat fase minimum, penggunaan jarak permukaan sumber yang lebih besar dari jarak kanonikal 2.5 Rs dapat menambah akurasi pemodelan. Pada kasus GMT 29 Maret 2006, dengan jarak  $R_{ss} = 2.9 R_s$ , hasil model PFSS cukup baik dan mendekati korona hasil pengamatan. Adapun untuk fase Matahari maksimum, jarak kanonikal 2.5 Rs telah cukup bagus untuk merekonstruksi korona Matahari.

Penggunaan data magnetogram sebelum waktu peristiwa GMT terjadi untuk memodelkan korona pada peristiwa GMT, seperti yang kami lakukan dalam penelitian ini, menjadi bukti bahwa prakiraan penampakan korona untuk GMT di masa

kemunculan *helmet streamers* menjadi memungkinkan. Untuk memperlihatkan kemungkinan lokasi *helmet streamers*, kami melakukan interpretasi atas lokasi *helmet streamers* di atas *loop-loop* tertutup pada dua peristiwa tersebut (Gambar 4-3(c) dan 4-3(d)). Keberadaan *helmet streamers* pada korona dapat menjadi indikasi kemunculan berkas cahaya memanjang pada pengamatan *white-light* korona saat terjadi gerhana Matahari. Mendatang dapat dilakukan dengan model PFSS. Namun, perlu diperhatikan beberapa catatan dalam penggunaan PFSS untuk memodelkan korona pada saat fase Matahari maksimum. Diantaranya ialah penggunaan data magnetogram yang tidak terlalu jauh perbedaan waktunya dengan peristiwa GMT. Penggunaan data magnetogram dalam rentang jam hingga satu hari sebelum peristiwa GMT masih cukup dapat diterima karena kemungkinan tidak terjadinya perubahan yang signifikan dalam data magnetogram. Selain itu, perlu diperhatikan daerah aktif baru yang mungkin muncul di sisi jauh Matahari. Oleh karena itu, penggunaan data pengamatan Matahari secara stereoskop (seperti data STEREO) dalam proses asimilasi data magnetogram diyakini dapat membantu meningkatkan akurasi pemodelan.

Khusus untuk GMT pada 9 Maret 2016 yang akan segera terjadi untuk memodelkan koronanya disarankan menggunakan jarak permukaan sumber sebesar 2.5 Rs. Penggunaan jarak permukaan sumber kanonikal tersebut diperkirakan sudah cukup untuk dapat menghasilkan model yang sesuai dengan hasil pengamatan, karena Matahari masih berada dekat dengan fase maksimum.

## Rujukan

- Altschuler, M. D. dan Newkirk, G. (1969). Magnetic Fields and the Structure of the Solar Corona, *Solar Physics*, 9, 131-149
- Ambrož, P., Druckmüller, M., Galal, A. A., dan Hamid, R. H. (2009). 3D Coronal Structures and Magnetic Field During the Total Solar Eclipse of 29 March 2006, *Solar Physics*, 258, 243-265, doi: 10.1007/s11207-009-9413-y
- Arden, W. M., Norton, A. A., dan Sun, X. (2014). A "Breathing" Source Surface for Solar Cycles 23 and 24, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 1476-1485, doi:10.1002/2013JA019464

- Gary, G. A. (2001). Plasma Beta Above a Solar Active Region: Rethinking the Paradigm, *Solar Physics*, 203, 71-86
- Loucif, M. L. dan Koutchmy, S. (1989). Solar Cycle Variations of Coronal Structures, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 77, 45-66
- Mackay, D. H. dan Yeates, A. R. (2012). The Sun's Global Photospheric and Coronal Magnetic Fields: Observations and Models, *Living Rev. Solar Phys.*, 9, 6, doi: 10.12942/lrsp-2012-6
- Pasachoff, J. M., Rusin, V., Saniga, M., Babcock, B. A., Lu, M., Davis, A. B., Dantowitz, R., Gaintatzis, P., Seiradakis, J. H., Voulgaris, A., Seaton, D. B., Shiota, K. (2015). Structure and Dynamics of the 2012 13/14 November Eclipse White-Light Corona, *Astrophysical Journal*, 800, 90, doi: 10.1088/0004-637X/800/2/90
- Saito, K., Poland, A. I., dan Munro, R. H. (1977). A Study of the Solar Corona Near Solar Minimum, *Solar Physics*, 55, 121-134
- Schatten, K. H., Wilcox, J. M. dan Ness, N. (1969). A Model of Interplanetary and Coronal Magnetic Fields, *Solar Physics*, 6, 442-455
- Schrijver, C. J. dan De Rosa, M. L. (2003). Photospheric and Heliospheric Magnetic Fields, *Solar Physics*, 212, 165-200, doi: 10.1023/A:1022908504100
- Wang, Y.-M. dan Sheeley, N. (1992). On Potential Field Models of the Solar Corona, *Astrophysical Journal*, 392, 310-31