

ANALISIS ARUS LISTRIK DAN MEDAN MAGNET PADA DAERAH AKTIF PENGHASIL FLARE NOAA 12017 (ANALYSIS OF ELECTRIC CURRENT AND MAGNETIC FIELD IN THE FLARING ACTIVE REGION NOAA 12017)

Johan Muhamad*, Muhamad Zamzam Nurzaman
Pusat Sains Antariksa
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Djundjungan no. 133 Bandung 40173
*e-mail: johan.muhamad@lapan.go.id

Diterima 26 Agustus 2019; Direvisi 24 September 2019; Disetujui 3 Oktober 2019

ABSTRACT

Solar flare is the result of magnetic energy release in an active region (AR). The free energy is generated as a consequence of the presence of electric current flowing in the coronal structure above the AR. In a flaring AR, electric current system and magnetic field exist in such a way that the magnetic energy is accumulated in a particular region prior to the flare. Therefore, it is essential to understand the characteristics of the electric current system and magnetic field of the flaring AR for flare prediction. By using Spaceweather HMI AR Patch (SHARP) photospheric magnetogram data, we analyzed NOAA 12017 that produced multiple flares, including M and X-class flares in March 2014. We demonstrated how to derive electric and magnetic parameters of the AR during the flaring period on March 27-29, 2014. We found that the vertical electric current of this AR became more unneutralized before the flares happened. We also found that the flares initially happened in the high energy accumulation region whose magnetic field was strongly sheared due to the presence of new emerging flux. This implies that the AR could be identified as a flaring AR prior to the flare occurrences based on the characteristics of its electric current system and magnetic field configuration.

Keywords: *solar flare, electric current, magnetic field*

ABSTRAK

Ledakan Matahari atau *flare* terjadi akibat adanya pelepasan energi magnetik di suatu daerah aktif. Energi bebas tersebut dihasilkan akibat adanya arus listrik yang mengalir di struktur korona daerah aktif. Pada daerah aktif penghasil ledakan Matahari, sistem arus listrik dan medan magnetnya terbentuk sedemikian rupa sehingga energi magnetiknya terakumulasi di daerah tertentu. Oleh karena itu, pemahaman akan karakteristik sistem kelistrikan dan kemagnetan daerah aktif penghasil ledakan Matahari sangat penting dikuasai agar prakiraan ledakan Matahari dapat dilakukan. Dengan menggunakan data medan magnet fotosfer dari *Spaceweather HMI AR Patch (SHARP)*, kami melakukan analisis terhadap NOAA 12017 yang menghasilkan banyak ledakan Matahari, termasuk kelas M dan X pada bulan Maret 2014. Kami menunjukkan bagaimana cara menurunkan parameter-parameter kelistrikan dan kemagnetan pada daerah aktif ini sepanjang periode ledakan Matahari tanggal 27-29 Maret 2014. Kami menemukan bahwa arus listrik vertikal pada daerah aktif ini menjadi semakin tidak netral menjelang terjadinya ledakan Matahari. Kami juga menemukan bahwa banyak ledakan Matahari terjadi pada awalnya di daerah dengan akumulasi energi yang tinggi, yakni di daerah dengan medan magnet yang tergeser dengan kuat akibat kemunculan fluks baru. Hasil ini menunjukkan bahwa NOAA 12017 dapat diidentifikasi sebagai penghasil ledakan Matahari, bahkan sebelum ledakan Matahari terjadi berdasarkan karakteristik sistem arus dan konfigurasi medan magnetnya.

Kata kunci: *flare Matahari, medan magnet, arus listrik*

1 PENDAHULUAN

Matahari merupakan bintang terdekat sekaligus berperan sebagai sumber energi bagi kehidupan di Bumi. Di sisi lain, Matahari juga dapat melepaskan energi yang sangat besar dalam bentuk ledakan radiasi elektromagnetik serta lontaran partikel sehingga mengancam kehidupan di Bumi. Ledakan besar di Matahari ini disebut sebagai flare Matahari. Pada suatu peristiwa ledakan Matahari, diperkirakan energi sebesar 10^{31} - 10^{33} erg atau setara dengan 10^{24} - 10^{26} Joule dilepaskan ke ruang antarplanet (Aulanier *et al.*, 2013). Besarnya energi yang dilepaskan ini dapat sampai ke Bumi dan lingkungan antariksa di sekitar Bumi sehingga mengganggu teknologi modern yang berbasis teknologi antariksa, seperti navigasi, komunikasi, dan operasional satelit secara umum. Oleh karena itu, pemahaman dan pemantauan kejadian ledakan Matahari perlu ditingkatkan agar gangguan yang timbul akibat terjadinya ledakan Matahari dapat diantisipasi.

Sebagai sebuah bintang, Matahari merupakan bola plasma raksasa yang bersifat seperti fluida konduktor. Adanya medan magnet yang diyakini dihasilkan di bawah fotosfer menyebabkan material plasma berinteraksi sedemikian rupa dengan medan magnet sehingga keduanya saling terikat satu sama lain (*frozen-in*) (Alfven, 1942). Akibatnya, pergerakan plasma di permukaan Matahari dapat mendistorsi medan magnet yang muncul di permukaan Matahari hingga ke korona. Adanya distorsi medan magnet dapat meningkatkan tekanan magnetik sehingga energi magnetik dapat bertambah. Jika energi magnetik ini sudah terlalu banyak terakumulasi, terkadang energi ini dilepaskan menjadi sebuah ledakan Matahari.

Di daerah aktif, medan magnet yang terkonsentrasi kuat di permukaan Matahari menyebabkan terjadinya

penurunan temperatur plasma di permukaan tersebut sehingga terlihat sebagai bintik Matahari pada pengamatan cahaya tampak. Pada sistem bintik Matahari, konfigurasi magnetik yang paling sederhana dapat diperoleh ketika kerapatan arus listrik pada sistem tersebut nihil ($\mathbf{J}=0$). Konfigurasi magnetik paling sederhana ini disebut sebagai medan magnet potensial. Medan magnet potensial akan memberikan energi magnetik minimum yang mungkin terbentuk pada sistem kemagnetan daerah aktif.

Di suatu daerah aktif, terdapat garis pemisah antara daerah dengan polaritas magnetik positif dan negatif, yakni garis kontur untuk kerapatan komponen vertikal medan magnet (B_z) bernilai nol. Garis ini disebut sebagai garis balik polaritas (*polarity inversion line/PIL*) atau garis netral. Medan magnet potensial pada suatu daerah aktif akan cenderung menghasilkan vektor magnetik yang tegak lurus dengan PIL pada komponen tangensialnya (Welsch, 2006; Fang *et al.*, 2012). Saat terjadi pergeseran atau gerak berputar di permukaan daerah aktif, vektor komponen tangensial akan semakin menyimpang dari medan potensial sehingga arahnya semakin sejajar dengan PIL. Akibatnya, medan magnet daerah aktif menjadi semakin tidak potensial (Fang *et al.*, 2012; Romano *et al.*, 2015). Perubahan kondisi medan magnet yang semakin tidak potensial akibat gerakan plasma di fotosfer akan menyebabkan munculnya arus listrik, sehingga kerapatan arus listrik terus meningkat. Hubungan kerapatan arus listrik dan medan magnet dinyatakan dalam hukum Ampere sebagai,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (1-1)$$

dengan \mathbf{B} adalah kerapatan fluks magnet.

Keberadaan arus listrik akan meningkatkan suplai energi dari fotosfer

ke atmosfer Matahari (kromosfer dan korona) yang dapat diukur melalui perhitungan fluks Poynting,

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (1-2)$$

dengan \mathbf{E} adalah vektor medan listrik (Kazachenko *et al.*, 2015). Selisih energi magnetik total pada medan magnet non potensial dan medan magnet potensial disebut sebagai energi bebas (*free energy*) atau energi berlebih (*excess energy*). Dalam suatu peristiwa ledakan Matahari, energi bebas ini dilepaskan sehingga energi magnetik cenderung akan semakin mendekati energi potensialnya. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa terdapat keterkaitan erat antara dinamika plasma di fotosfer dengan sistem kemagnetan dan kelistrikan, serta tingkatan energi di daerah aktif. Dengan kata lain, semakin medan magnet menjadi non potensial, kerapatan arus listrik dan energi magnetik juga akan cenderung meningkat. Peningkatan arus listrik dan energi magnetik di daerah aktif menandakan peningkatan kemungkinan terjadinya ledakan Matahari di daerah tersebut (Sakurai, 1989).

Keterkaitan antara parameter-parameter di fotosfer dan kemungkinan terjadinya ledakan Matahari telah menarik minat para peneliti untuk meneliti hubungan yang ada. Schrijver (2007) menemukan bahwa medan magnet di sekitar PIL pada daerah aktif penghasil ledakan Matahari memiliki gradien yang tinggi karena sudut geser yang besar sehingga menjadi tempat akumulasi arus listrik dan energi magnetik. Kombinasi dari besarnya gradien medan magnet, panjang PIL, dan nilai fluks magnet yang terlibat dapat dikuantifikasi untuk diperoleh suatu nilai yang dapat digunakan untuk prediksi ledakan Matahari dan lontaran massa korona (Falconer *et al.*, 2008; Moore *et al.*, 2012). Leka dan Barnes (2007) menemukan bahwa fluks magnetik total dan arus vertikal total

merupakan dua parameter utama untuk memprediksi terjadinya ledakan Matahari.

Untuk menurunkan parameter-parameter terkait medan magnet dan listrik diperlukan data magnetogram di fotosfer (Gary *et al.*, 1987). Salah satu sumber data magnetogram yang umum digunakan saat ini adalah data *Spaceweather HMI Active Region Patch* (SHARP) dari instrumen *Helioseismic Magnetic Imager* (HMI) pada wahana *Solar Dynamic Observatory* (SDO) yang mempunyai resolusi temporal 12 menit. Beberapa penelitian telah menggunakan data SHARP beserta parameter-parameter turunannya untuk prediksi ledakan Matahari dengan metode *machine learning* (Bobra and Couvidat, 2015; Florios *et al.*, 2018, Nishizuka *et al.*, 2017). Namun, karena deteksi daerah aktif pada *pipeline* SHARP dilakukan secara otomatis, terkadang dalam satu daerah (*patch*) terdapat dua atau lebih sistem kemagnetan. Hal ini menyebabkan perlu dilakukannya prosedur lain untuk melakukan analisis detail mengenai suatu ledakan Matahari di daerah aktif.

Salah satu gabungan daerah aktif yang terdeteksi oleh SHARP sebagai satu nomor *patches* adalah NOAA 12017 dan NOAA 12018. Kedua daerah aktif ini tergabung dalam nomor *HMI Active Region Patches* (HARP) yang sama, yaitu 3894, meskipun kedua daerah aktif tersebut mempunyai karakteristik berbeda. NOAA 12017 menghasilkan beberapa ledakan Matahari, termasuk ledakan Matahari kelas M dan kelas X, sementara NOAA 12018 cenderung tenang. Adanya perbedaan karakter dua daerah aktif ini akan membingungkan dalam memahami perhitungan parameter-parameter yang diturunkan oleh SHARP jika perhitungannya digabung menjadi satu. Oleh karena itu, perlu adanya upaya untuk menurunkan parameter-parameter fisis daerah aktif tanpa harus bergantung pada hasil penurunan SHARP yang tercantum di

metadata. Penurunan parameter-parameter fisis secara mandiri hanya dari data medan magnet dapat membantu pemahaman yang lebih mendalam dan utuh terhadap kondisi daerah aktif.

Makalah ini memiliki dua tujuan utama: pertama, memberikan penjelasan fisis kepada pembaca mengenai beberapa parameter daerah aktif dan bagaimana cara menghitung parameter-parameter tersebut; kedua, menyelidiki bagaimana evolusi beberapa parameter fisis untuk NOAA 12017 selama periode tenang dan aktif pada 27-29 Maret 2014. Meskipun menghasilkan flare kelas M dan X, evolusi medan magnet dan arus listrik di permukaan daerah aktif ini belum mendapat perhatian dari peneliti lain. Beberapa penelitian lain mengenai daerah aktif ini telah dilakukan, tetapi menitikberatkan pada aspek penyebab terjadinya lontaran filamen dan emisi gelombang elektromagnet saat flare kelas X1.0 terjadi (Woods *et al.*, 2017; Woods *et al.* 2018; Judge *et al.*, 2015). Sementara itu, kajian kami lebih menekankan pada analisis perubahan medan magnet dan arus listrik jangka panjang selama beberapa hari sebelum dan setelah flare terjadi.

Daerah aktif ini penting dikaji karena selain menghasilkan flare kelas-M dan X, data SHARP yang ada tidak memisahkan daerah aktif ini secara khusus, sehingga perhitungan parameter yang diberikan dalam metadata SHARP tidak spesifik. Atas dasar itu, kami merasa perlu untuk menyelidikinya dan menunjukkan cara pengolahan data yang kami lakukan. Kami juga menunjukkan bagaimana perhitungan beberapa parameter yang terkait kemagnetan dan kelistrikan dapat mengoptimalkan penggunaan data SHARP untuk keperluan prakiraan ledakan Matahari. Dari penelitian ini, kami berharap dapat menambah khazanah metode prakiraan ledakan Matahari di daerah aktif, khususnya

yang berlandaskan pada pemahaman fisis ledakan Matahari, serta dapat mengaplikasikannya dalam kegiatan prakiraan cuaca antariksa serta pengaruhnya ke lingkungan Bumi terutama di atas wilayah Indonesia. Kami berharap, penelitian ini dapat mendukung pemberian informasi prediksi cuaca antariksa harian yang disampaikan oleh Pusat Sains Antariksa LAPAN dalam portal *Space Weather and Forecast Services* (SWIFtS) yang dapat diakses melalui <http://swifts.sains.lapan.go.id/>.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari data SHARP (Bobra *et al.*, 2014) yang merupakan turunan data pengamatan instrumen *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) pada wahana *Solar Dynamics Observatory* (SDO) (Pesnell *et al.*, 2012; Scherrer *et al.*, 2012). HMI melakukan pengamatan medan magnet di permukaan Matahari secara piringan penuh (*full disk*) pada panjang gelombang 6173 Angstrom dengan resolusi spasial sebesar 1 *arcsec* (Schou *et al.*, 2012). Dari data piringan penuh, dilakukan metode deteksi otomatis sehingga diperoleh potongan tertentu (*patch*) yang diidentifikasi sebagai daerah aktif. Setiap *patch* yang diidentifikasi akan diikuti jejaknya (*track*) selama muncul di piringan Matahari.

Data medan magnet untuk masing-masing *patch* disimpan dan ditampilkan dalam koordinat kartesian pada peta dengan proyeksi *cylindrical equal area* (CEA). Data untuk setiap *patch* mengandung informasi tiga komponen vektor medan magnet yang direpresentasikan sebagai B_{rad} , B_{phi} , dan B_{theta} . Selain itu, disediakan juga nilai parameter-parameter turunan dari medan magnet yang disimpan dalam metadata untuk setiap *patch*.

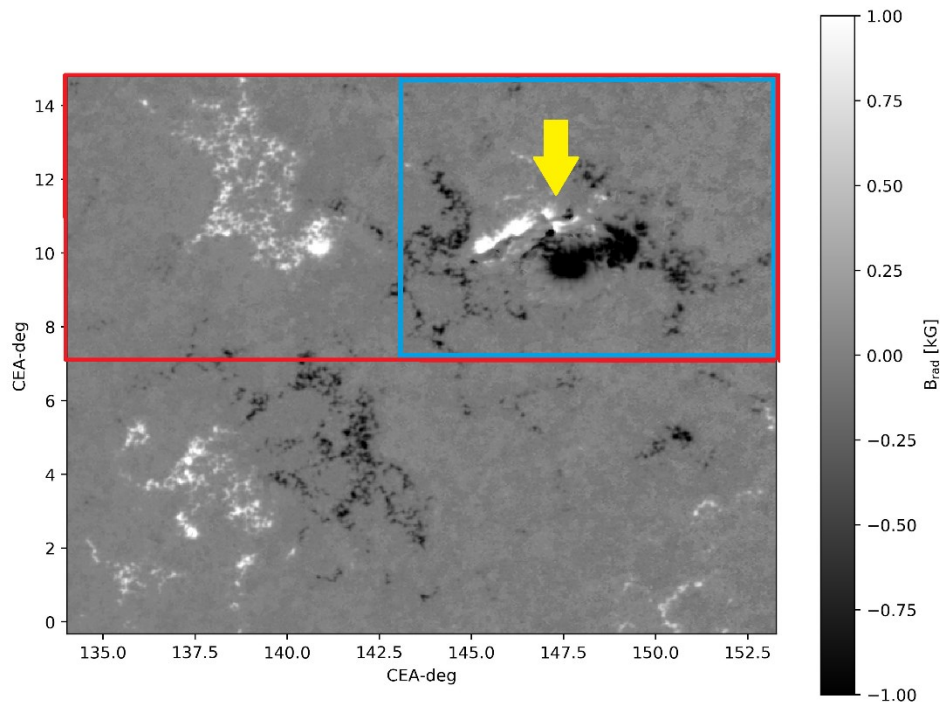
Data SHARP dengan resolusi waktu 12 menit dapat diunduh melalui alamat situs http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html?ds=hmi.sharp_cea_720s. Kami mengunduh data dengan menggunakan modul *drms* pada pemrograman Python (Glogowski dan Bobra, 2016).

Dalam penelitian ini, kami hanya menggunakan data SHARP untuk memperoleh tiga komponen vektor medan magnet yang kami nyatakan sebagai $B_x=B_\phi$, $B_y=-B_\theta$, dan $B_z=B_{rad}$. Kami menggunakan data SHARP untuk nomor katalog HARP 3894 yang meliputi NOAA 12017 dan NOAA 12018 (Gambar 2-1). Data yang digunakan adalah data dengan resolusi waktu satu jam mulai pukul 00:00 UT 27 Maret 2014 hingga 23:00 UT 29 Maret 2014 agar evolusi jangka panjang

medan magnet kelompok bintik tersebut dapat teramati dengan baik.

2.2 NOAA 12017

Daerah aktif yang kami teliti adalah NOAA 12017 yang berada di sebelah utara NOAA 12018 dalam medan pandang SHARP (kotak merah Gambar 2-1), dinamakan sebagai WIL1. NOAA 12017 berada pada posisi heliografik N09 W05 pada 20:30 UT 27 Maret 2014, dan berada di N10 W32 pada 20:30 UT 29 Maret 2014. Artinya, daerah aktif ini pada saat itu cenderung berada di dekat pusat piringan Matahari sehingga nilai vektor medan magnet yang kami gunakan dalam penelitian ini valid. Penggunaan data vektor medan magnet untuk lokasi daerah aktif di dekat tepi piringan Matahari (bujur > 70 derajat) memiliki tingkat kepercayaan yang rendah (Bobra *et al.*, 2014).



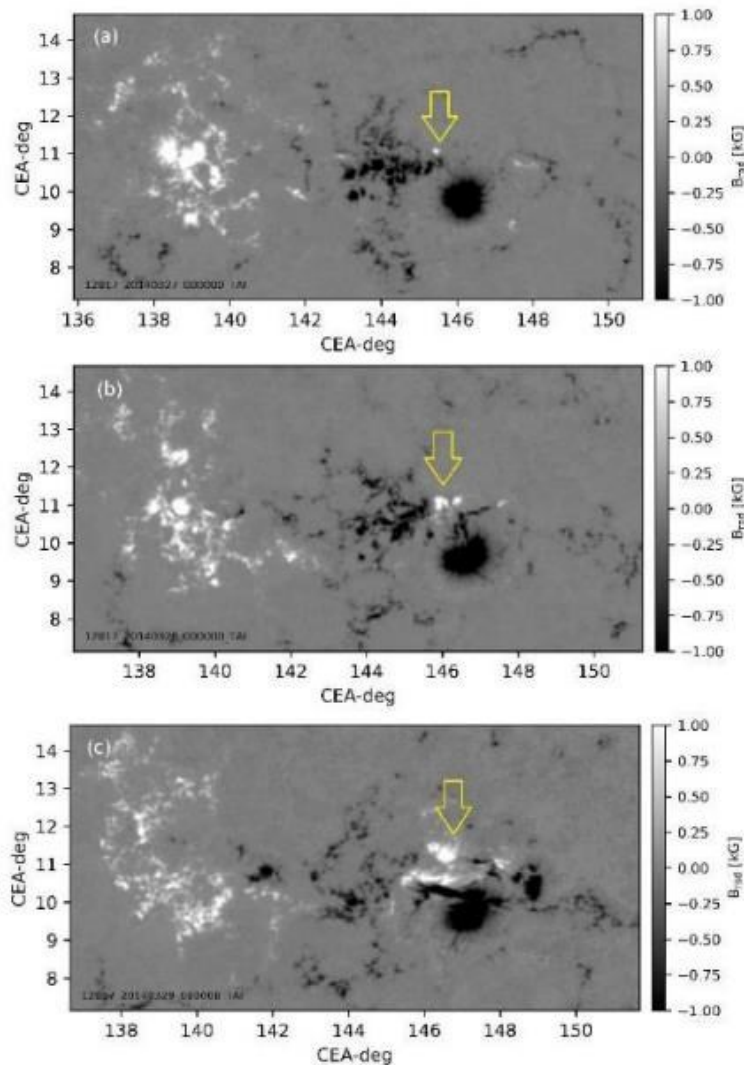
Gambar 2-1: Komponen radial medan magnet (B_z) dari data SHARP untuk nomor HARP 3894 pada tanggal 29 Maret 2014 pukul 19:00 UT. Kotak merah dan biru menunjukkan wilayah 1 (WIL1) dan wilayah 2 (WIL2), secara berurutan. WIL1 melingkupi NOAA 12017. WIL2 melingkupi wilayah yang memiliki dinamika magnetik tinggi, yang menjadi fokus bahasan pada penelitian ini. Tanda panah kuning menunjukkan daerah inti yang menjadi lokasi awal terjadinya flare.

NOAA 12017 muncul sebagai sebuah *bipole* sederhana dengan konsentrasi polaritas positif di timur dan negatif di barat. Seiring berjalannya waktu, di tengah daerah polaritas negatif muncul fluks magnetik (*emerging flux*) dengan polaritas positif yang mendesak fluks sebelumnya dan bertambah lebar (lihat Gambar 2-2). Perluasan fluks baru ini disertai gerakan plasma yang bergeser membentuk medan magnetik yang lebih kompleks di sebelah barat. Daerah di

sebelah barat ini, dinamakan sebagai WIL2, kami tandai dengan kotak biru pada Gambar 2-1 dan menjadi fokus pembahasan kami pada penelitian ini.

Tabel 2-1: LEDAKAN MATAHARI DENGAN KELAS > C YANG DIHASILKAN NOAA 12017

Kelas	Tanggal (Maret 2014)	Waktu puncak ledakan (UT)
M2.0	28	19:04
M2.6	28	23:44
X1.0	29	17:35



Gambar 2-2: Perubahan medan magnet di NOAA 12017 pada 27 Maret 2014 00:00 UT (a), 28 Maret 2014 00:00 UT (b), dan 29 Maret 2014 00:00 UT (c). Tanda panah kuning menunjukkan fluks magnetik baru dengan polaritas positif yang muncul dan berkembang di daerah dengan polaritas negatif. Daerah tersebut menjadi lokasi terjadinya ledakan Matahari.

Beberapa ledakan Matahari kelas C dan tingkat energi yang lebih tinggi (tabel 2-1) terjadi di lokasi yang ditunjukkan oleh tanda panah kuning pada gambar 2-1. Pada saat NOAA 12017 menghasilkan banyak ledakan Matahari kelas C, fluks dengan polaritas positif di sebelah barat telah tumbuh besar dan terus meluas.

2.3 Metode

Pada penelitian ini dihitung beberapa parameter fisis terkait kemagnetan dan kelistrikan NOAA 12017. Parameter-parameter tersebut dipaparkan masing-masing pada sub bagian berikut.

2.3.1 Medan Potensial

Medan potensial dihasilkan dari asumsi tidak adanya arus listrik yang mengalir ($\mathbf{J}=0$) pada suatu daerah aktif dari data komponen vertikal medan magnet (B_z) yang diberikan oleh pengamatan. Berdasarkan hukum Ampere pada persamaan (1-1), maka kondisi medan potensial dinyatakan sebagai,

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{0} \tag{2-1}$$

Dari kondisi solenoidal medan magnet,

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2-2}$$

dapat diturunkan potensial skalar medan magnet (Φ) yang memenuhi persamaan Laplace,

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{2-3}$$

Solusi untuk mencari potensial skalar dapat diperoleh dengan melakukan transformasi Fourier dari B_z (Alissandrakis, 1981). Selanjutnya, nilai komponen tangensial untuk vektor medan magnet potensial dapat diperoleh sebagai:

$$B_{xp} = -\frac{ik_x}{k_z} \widetilde{B}_z \tag{2-4}$$

$$B_{yp} = -\frac{ik_y}{k_z} \widetilde{B}_z \tag{2-5}$$

Dengan i adalah satuan bilangan imajiner, k_x , k_y , dan k_z masing-masing adalah bilangan gelombang untuk arah sumbu x , y , dan z . Serta, \widetilde{B}_z adalah transformasi Fourier dari B_z .

Medan potensial untuk NOAA 12017 dihitung dari data B_z untuk setiap waktu pengamatan (per jam). Dari nilai B_{xp} dan B_{yp} , dapat diketahui arah vektor potensial dalam bidang permukaan dua dimensi di daerah aktif.

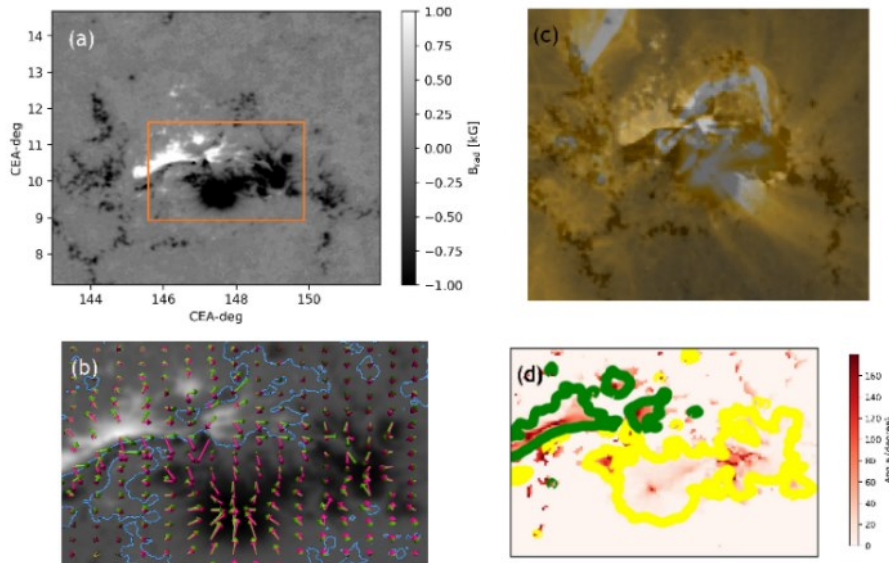
2.3.2 Sudut Geser (Shear Angle)

Vektor medan magnet dari data pengamatan dan vektor medan potensial dapat memiliki besar dan arah yang berbeda. Biasanya, vektor medan magnet dari pengamatan akan cenderung sejajar dengan vektor medan potensial pada saat awal pertumbuhan daerah aktif. Saat daerah aktif menjadi semakin kompleks, arah vektor medan magnet yang teramati akan semakin menyimpang dari vektor medan potensial. Penyimpangan terbesar akan terjadi di sepanjang PIL pada daerah yang mengalami pergeseran atau rotasi plasma yang kuat. Daerah seperti ini menjadi penanda terakumulasinya energi magnetik pada medan magnet yang non potensial.

Perbedaan arah vektor medan magnet teramati dan vektor medan potensial dapat dihitung dengan mengukur sudut di antara kedua vektor. Sudut antara kedua vektor ini disebut sebagai sudut geser (*shear angle*). Pada suatu titik di daerah aktif, nilai sudut geser dapat dihitung sebagai,

$$\theta_s = \arccos \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \tag{2-6}$$

dengan \mathbf{a} adalah vektor medan teramati di suatu titik, dan \mathbf{b} adalah vektor medan potensial di titik tersebut (Romano et al, 2019) (lihat Gambar 2-3(a,b)). Gambar 2-3(d) menunjukkan persebaran sudut geser di daerah inti dari NOAA 12017.



Gambar 2-3: (a) Komponen vertikal medan magnet untuk daerah WIL2 dari data SHARP pada pukul 17:00 UT, 29 Maret 2019. (b) Vektor medan magnet horizontal di fotosfer untuk medan potensial (ungu) dan medan magnet teramati (hijau) pada daerah yang berada di dalam kotak jingga pada Gambar 2-3(a). Kontur biru muda menunjukkan garis balik polaritas (PIL). (c) Plasma korona tampak pada pengamatan AIA untuk panjang gelombang 171 Angstrom di sekitar daerah yang bersesuaian dengan Gambar 2-3(a) yang disuperposisi di atas gambar magnetogram. (d) Peta persebaran sudut geser untuk daerah yang sama seperti pada Gambar 2-3(b). Garis hijau dan kuning menunjukkan kontur untuk medan magnet vertikal sebesar 500 dan -500 Gauss.

2.3.3 Energi Magnetik

Besarnya proksi energi bebas dapat dihitung dari data medan magnet di fotosfer melalui persamaan (Zhang, 2016),

$$E_f = \int \frac{B_s^2}{8\pi} dA \quad (2-7)$$

dengan

$$\mathbf{B}_s = \mathbf{B}_{ob} - \mathbf{B}_{pot} \quad (2-9)$$

\mathbf{B}_{ob} adalah vektor medan magnet teramati dan \mathbf{B}_{pot} adalah vektor medan magnet potensial. Akumulasi energi magnetik untuk seluruh atau sebagian wilayah di daerah aktif dapat dihitung dengan mengintegrasikan nilai energi magnetik di setiap grid. Distribusi energi bebas secara spasial dapat menunjukkan wilayah mana di daerah aktif yang paling berpotensi menjadi

tempat pelepasan energi pertama pada awal peristiwa flare. Karena dalam penelitian kali ini kami hanya menggunakan data dua dimensi hasil pengamatan, maka nilai energi magnetik tidak dapat dihitung secara utuh dalam tiga dimensi. Oleh karena itu, nilai energi magnetik yang dihitung hanyalah nilai pendekatan (proksi) dari energi magnetik sebenarnya.

Sebagai konfigurasi magnetik paling sederhana, medan potensial akan memiliki tingkatan energi terendah yang mungkin terbentuk di suatu daerah aktif. Oleh sebab itu, medan magnet non potensial dari hasil pengamatan akan memiliki energi yang lebih tinggi dari energi potensialnya. Kelebihan energi (*excess energy*) dari medan magnet hasil pengamatan ini akan menjadi energi bebas yang akan dilepaskan pada saat terjadi ledakan Matahari.

2.3.4 Arus Vertikal

Arus listrik di daerah aktif dapat muncul sebagai akibat dari perubahan medan magnet, seperti yang dinyatakan dalam Persamaan (1-1). Persamaan (1-1) menyiratkan bahwa, dari data di fotosfer, arus listrik hanya dapat dihitung untuk komponen vertikal. Hal ini disebabkan karena turunan fungsi medan magnet ke arah vertikal (dz) tidak diketahui, sehingga operasi vektor di suku sebelah kiri pada Persamaan (1-1) hanya dapat dihitung dari perubahannya di arah horizontal (dx dan dy). Dengan menggunakan persamaan (1-1), arus vertikal dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$J_z = \frac{(\mathbf{V} \times \mathbf{B})_z}{\mu_0} \quad (2-9)$$

dengan J_z adalah komponen vertikal arus listrik di fotosfer (Vemareddy *et al.*, 2015; Bobra and Couvidat, 2015; Vemareddy *et al.*, 2019).

Distribusi spasial dari arus vertikal dapat menandakan distribusi sistem kelistrikan di daerah aktif. Daerah dengan konsentrasi kerapatan arus listrik yang tinggi dapat menandakan struktur pemisah konektivitas garis gaya magnet di fotosfer pada proses terjadinya rekoneksi magnetik saat ledakan Matahari terjadi (Janvier *et al.*, 2014). Besarnya kerapatan arus vertikal di permukaan Matahari dapat menentukan kemungkinan terjadinya ledakan Matahari di suatu wilayah tertentu.

Dalam penelitian ini, arus listrik vertikal dihitung dari data medan magnet (magnetogram) hasil pengamatan untuk setiap waktu (per jam) pada setiap grid. Penurunan turunan (dB_x/dy dan dB_y/dx) dilakukan dengan menggunakan metode beda hingga tengah (*central finite difference*) mempertimbangkan lima stensil. Untuk menghindari banyaknya muncul *noise* pada perhitungan arus yang berasal dari daerah dengan kerapatan fluks magnet rendah, kami mengabaikan nilai arus

listrik dari daerah dengan kerapatan fluks magnet di bawah 100 G. Dari hasil perhitungan arus listrik di setiap grid, dihitung juga arus vertikal total untuk wilayah NOAA 12017 dengan mengintegrasikannya untuk seluruh wilayah yang terkait.

2.3.5 Netralitas Arus

Arus listrik yang dihitung untuk setiap polaritas dapat didominasi oleh arus yang searah dengan polaritas magnetik atau berkebalikan. Jika dalam suatu polaritas magnetik, arah arus listrik yang searah dengan medan magnet lebih dominan, maka daerah tersebut didominasi oleh helisitas arus positif. Sebaliknya, helisitas arus negatif akan lebih dominan jika arus listrik yang berkebalikan dengan arah medan magnet lebih dominan.

Perbandingan besar arus listrik yang searah (*direct current/DC*) dan yang berkebalikan (*reverse current/RC*) dengan medan magnet menentukan seberapa netral arus listrik di daerah tersebut. Daerah aktif yang stabil cenderung memiliki arus listrik yang netral ($|DC|/|RC| \approx 1$) (Parker, 1996). Sebaliknya, daerah aktif yang didominasi oleh salah satu arus akan cenderung tidak stabil, artinya ledakan Matahari dapat semakin mungkin terjadi (Georgoulis *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2017).

Pada penelitian ini, kesesuaian arah komponen vertikal arus listrik terhadap komponen radial medan magnet diselidiki dengan menghitung nilai

$$H = J_z \cdot B_z \quad (2-10)$$

dengan nilai H sebanding dengan besarnya helisitas arus (h_c) (Pipin, *et al.*, 2019). Helisitas arus merupakan pengembangan konsep helisitas magnetik yang bermakna seberapa besar suatu garis gaya magnet berpuntir atas garis gaya magnet lainnya (Berger and Field, 1984). Helisitas arus secara

matematis (Pevtsov *et al.*, 2008) didefinisikan sebagai

$$h_c = \int \mathbf{B} \cdot \nabla \times \mathbf{B} dV \quad (2-11)$$

Untuk keperluan yang lebih praktis, nilai helisitas arus dapat didekati dengan persamaan (2-10) (Bobra and Ilonidis, 2016; Bobra and Couvidat, 2015).

Netralitas arus ($|DC|/|RC|$) dihitung dengan membandingkan nilai ($|H_{DC}|/|H_{RC}|$) dengan menggunakan persamaan (2-10) untuk seluruh daerah yang mencakup WIL1 dan WIL2. Nilai ini dihitung untuk setiap waktu pengamatan yang digunakan (per jam).

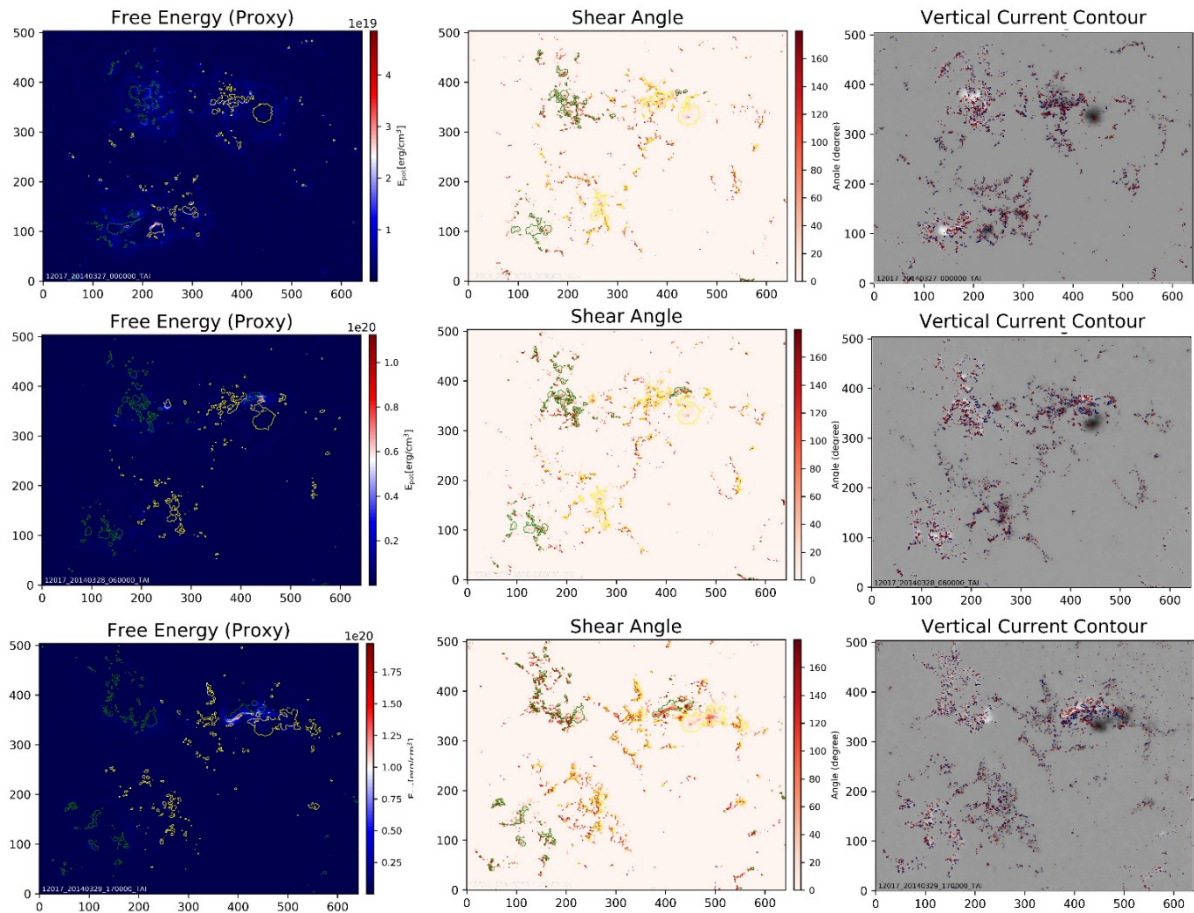
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menghitung parameter-parameter yang terkait dengan energi bebas dan sudut geser, langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung medan potensial. Dengan menggunakan B_z hasil pengamatan pada setiap waktu, komponen horizontal medan potensial (B_{xp} dan B_{yp}) dapat dihitung. Dari hasil perhitungan, vektor medan magnet potensial pada arah horizontal diplot pada bidang permukaan Matahari. Panah-panah ungu dalam Gambar 2-3(b) menunjukkan vektor medan potensial pada daerah di dalam kotak jingga pada Gambar 2-3(a) sesaat sebelum ledakan Matahari X1.0 terjadi (17:00 UT, 29 Maret 2014). Tampak arah vektor potensial cenderung tegak lurus terhadap garis PIL yang berwarna biru.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa vektor medan magnet teramati (panah hijau pada Gambar 2-3(b)) memiliki arah yang berbeda dengan vektor medan potensial, terutama di dekat PIL. Kemunculan fluks magnetik baru berperan besar dalam meningkatkan perbedaan arah vektor medan magnet potensial dan medan teramati. Perbedaan sudut antara vektor

medan potensial dan medan teramati yang dihitung dengan Persamaan (2-6) diplot pada Gambar 2-3(d). Tampak pada Gambar 2-3(d), daerah yang berbatasan dengan PIL di sekitar kemunculan fluks baru memiliki beda sudut lebih dari 70 derajat. Hasil ini mengindikasikan bahwa di daerah sekitar PIL ini medan magnet mengalami puntiran kuat karena gerak plasma di permukaan daerah aktif. Hal ini dapat terlihat dari medan magnet korona yang tampak pada emisi plasma pada panjang gelombang 171 Angstrom (sekitar 6×10^5 K pada daerah di korona) yang diamati oleh *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) (Lemen *et al.*, 2012) pada wahana SDO (lihat Gambar 2-3(c)). Pada panjang gelombang ini, *loop* medan magnet di atas daerah aktif dapat teramati secara jelas. Tampak di atas PIL, medan magnet korona terpuntir membentuk *sigmoid* seperti huruf S. Keberadaan *sigmoid* di daerah aktif dapat menjadi penanda ketidakpotensialan medan magnet di daerah aktif tersebut (Canfield *et al.*, 1999).

Gambar 3-1 menunjukkan evolusi parameter magnetik dan arus listrik untuk medan pandang yang tercakup dalam data SHARP yang digunakan (sama seperti Gambar 2-1). Gambar di kolom paling kiri menunjukkan bagaimana evolusi energi magnetik bebas berkembang. Pada tanggal 27 Maret, energi bebas masih bernilai sangat rendah hampir di seluruh daerah aktif. Sehari setelahnya, energi bebas meningkat khususnya di sekitar daerah inti WIL2. Di hari terakhir, kerapatan energi magnetik di sekitar PIL dekat kemunculan fluks magnetik menjadi semakin tinggi. Hal ini jauh berbeda dengan daerah lainnya yang cenderung tidak mengalami peningkatan kerapatan energi selama tiga hari.



Gambar 3-1: Proksi energi bebas (kolom kiri), sudut geser (kolom tengah), dan kontur arus listrik vertikal (kolom kanan) pada 00:00 UT 27 Maret (baris atas), 06:00 UT 28 Maret (baris tengah), dan 17:00 UT 29 Maret 2014 (baris bawah). Seluruh gambar ditampilkan dalam medan pandang SHARP yang sama dengan Gambar 2-1, dengan sumbu gambar dalam satuan piksel. Harap diperhatikan bahwa skala warna pada tingkatan energi bebas (erg/cm) tidak sama untuk setiap waktu. Kontur merah (biru) pada kolom arus vertikal menunjukkan arus listrik sebesar 20 (-20) mA/m².

Selain mengalami peningkatan energi bebas, peningkatan sudut geser dan arus vertikal juga terjadi di daerah yang sama. Hasil ini ditunjukkan oleh evolusi distribusi sudut geser dan arus vertikal seperti tampak pada kolom tengah dan kanan di Gambar 3-1. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet berevolusi begitu dinamis pada daerah WIL2 akibat adanya kemunculan fluks magnetik positif yang mendesak fluks magnetik negatif yang sudah ada sebelumnya. Kemunculan fluks baru tersebut membawa energi magnetik baru dan juga meningkatkan energi bebas karena gerak geser dengan plasma yang telah ada. Pergeseran ini

menyebabkan kerapatan arus listrik di daerah ini meningkat.

Hasil perhitungan lebih lanjut terhadap arah arus listrik menunjukkan bahwa daerah ini didominasi oleh helisitas arus positif. Artinya, kebanyakan arus vertikal di daerah ini searah dengan arah komponen vertikal medan magnet. Konfigurasi seperti ini diperkuat dengan keberadaan *sigmoid* yang memiliki bentuk seperti huruf S sebagai ciri helisitas positif. Sedangkan helisitas negatif akan cenderung membentuk *sigmoid* berbentuk huruf S terbalik.

Untuk dapat mengetahui kecenderungan evolusi setiap parameter yang diteliti, dilakukan perhitungan

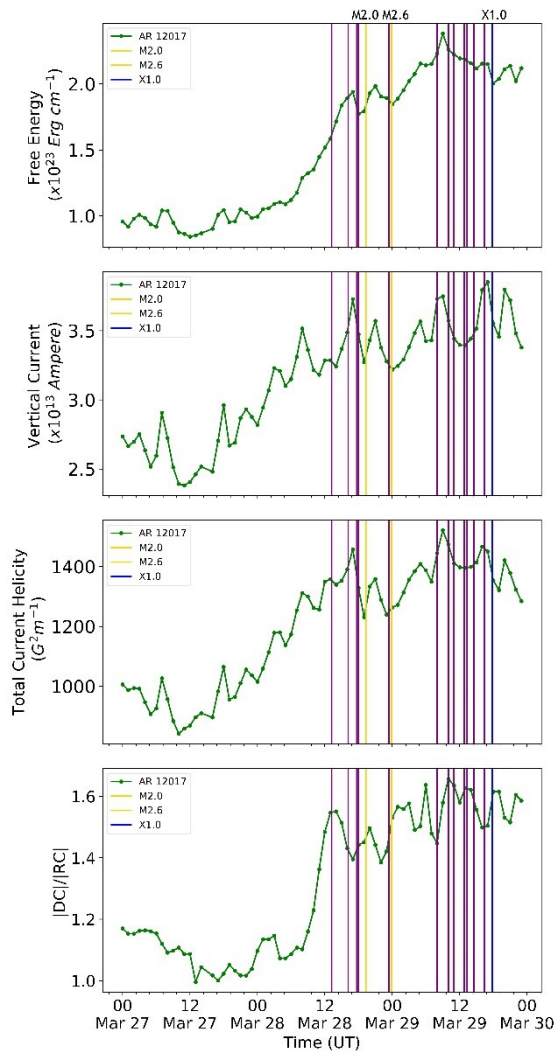
akumulasi atau total dari setiap parameter pada tiap waktu (per jam). Nilai total dihitung dengan cara mengintegrasikan hasil perhitungan di setiap grid untuk keseluruhan wilayah yang terkait. Kami membedakan perhitungan nilai total untuk dua wilayah, yaitu WIL1 dan WIL2. Cara ini digunakan agar dapat diketahui seberapa sensitif perubahan perhitungan parameter untuk luas wilayah yang berbeda.

Gambar 3-2 menunjukkan evolusi energi bebas total, arus vertikal total, helisitas arus total, dan rasio netralitas arus dari daerah di WIL1. Tampak dari gambar ini bahwa pada awalnya keseluruhan parameter di NOAA 12017 bernilai relatif rendah. Peningkatan nilai seluruh parameter hampir terjadi dalam waktu yang bersamaan, yaitu saat fluks magnetik positif muncul di daerah dengan polaritas negatif. Sekitar 12 jam setelah kenaikan ini, terjadi ledakan Matahari kelas C untuk pertama kalinya dari NOAA 12017.

Dalam kurun 9 jam setelah ledakan Matahari kelas C pertama terjadi, tren dari nilai setiap parameter cenderung stabil sampai terjadi empat ledakan Matahari kelas C sesaat sebelum pukul 18:00 UT pada tanggal 28 Maret. Setelah itu, nilai parameter-parameter ini menurun (gambar 3-2). Kenaikan energi bebas, helisitas arus, dan rasio netralitas arus cenderung jelas teramati setelah fluks baru muncul. Sementara itu, kenaikan arus vertikal total lebih sulit diamati karena fluktuasi nilainya cukup besar (gambar 3-2). Hal ini dapat disebabkan karena perhitungan dilakukan untuk seluruh wilayah di daerah aktif sehingga ada kemungkinan masih banyak derau (*noise*) yang ikut terhitung, khususnya dari daerah dengan kerapatan fluks magnet yang relatif rendah (<200G).

Setelah terjadi ledakan Matahari kelas M (garis kuning pada gambar 3-2), nilai setiap parameter kembali meningkat. Peningkatan untuk energi magnetik total mencapai puncaknya pada sekitar pukul 09:00 UT tanggal 29 Maret. Bersamaan dengan ini, parameter-parameter lainnya juga mencapai nilai puncak. Tujuh ledakan Matahari kelas C dan akhirnya ledakan Matahari kelas X1.0 ((garis biru pada gambar 3-2) menyebabkan nilai energi total turun signifikan. Proksi energi bebas turun sebesar 2×10^{22} erg/cm setelah terjadi ledakan Matahari kelas X1.0. Penurunan seperti ini tidak terlihat untuk ledakan Matahari kelas M2.6 yang terjadi pada 23:44 UT tanggal 28 Maret. Nilai parameter lainnya juga mengalami tren penurunan setelah ledakan Matahari kelas X terjadi.

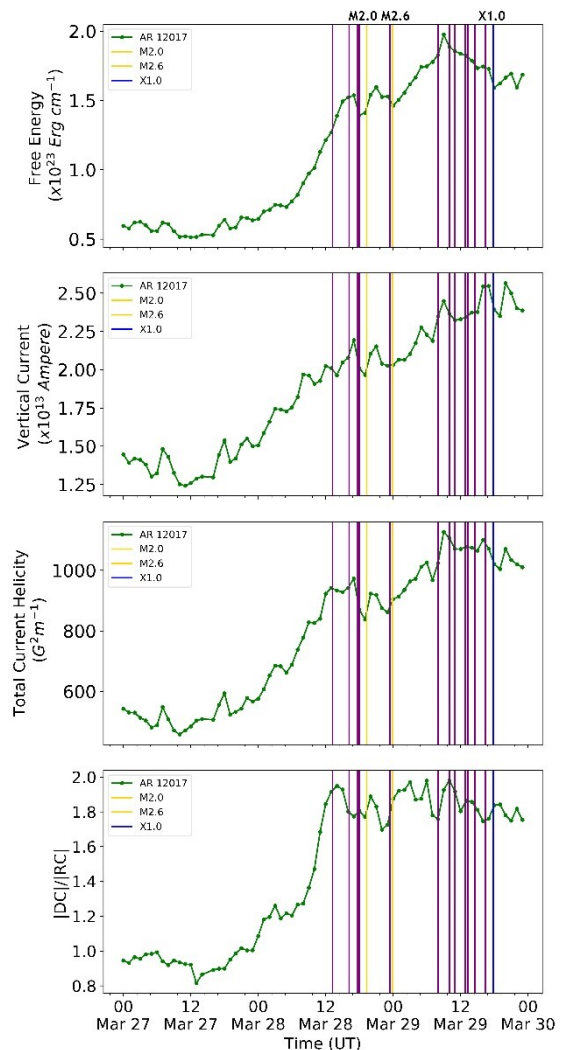
Gambar 3-3 menunjukkan evolusi nilai total dari parameter-parameter seperti pada Gambar 3-2, hanya saja untuk daerah WIL2. Secara umum, tren kenaikan dan penurunan setiap parameter mirip seperti pada Gambar 3-2. Namun, besarnya nilai dari parameter-parameter di daerah lokal ini lebih kecil dari nilai perhitungan untuk keseluruhan daerah aktif. Hal ini menunjukkan bahwa sebenarnya nilai total dari setiap parameter lebih banyak dipengaruhi oleh daerah inti, yaitu daerah dengan konsentrasi dan dinamika medan magnet yang kuat. Meskipun begitu, fluktuasi nilai arus vertikal total di daerah WIL2 tampak lebih kecil daripada untuk keseluruhan daerah aktif (WIL1). Hasil ini mengindikasikan bahwa perhitungan arus vertikal cukup sensitif terhadap luas area integrasinya. Semakin luas area integrasi, semakin besar nilai ketidakpastian perhitungan arus vertikal yang diperoleh, jika tidak disertai dengan pemilihan fluks magnetik yang relevan.



Gambar 3-2: Dari atas ke bawah: total energi bebas, total arus vertikal, total helisitas arus, dan rasio arus searah dan arus berbalik untuk wilayah WIL1 yang meliputi seluruh NOAA 12017. Sumbu X dimulai pada tanggal 27 Maret 2014. Garis vertikal ungu, kuning, dan biru pada setiap gambar secara berurutan menunjukkan waktu terjadinya ledakan Matahari untuk kelas C, M, dan X.

Kami juga menemukan bahwa rasio netralitas arus untuk perhitungan pada WIL2 memberikan hasil yang lebih konsisten dengan teori netralitas arus daripada WIL1. Pada Gambar 3-2 di panel paling bawah, rasio netralitas arus berada pada angka sedikit di bawah 1.2 untuk tanggal 27 Maret pukul 00:00 UT (waktu awal). Padahal, saat itu daerah

aktif masih sangat sederhana dan idealnya arus listriknya netral atau nilai rasio netralitas arus mendekati satu.



Gambar 3-3: Dari atas ke bawah: total energi bebas, total arus vertikal, total helisitas arus, dan rasio arus searah dan arus berbalik untuk wilayah WIL2 yang merupakan daerah inti dari NOAA 12017. Garis vertikal ungu, kuning, dan biru pada setiap gambar secara berurutan menunjukkan waktu terjadinya ledakan Matahari untuk kelas C, M, dan X.

Sementara itu, pada panel terbawah dari gambar 3-3, netralitas arus mendekati satu sejak awal, dan baru meningkat tajam saat timbulnya fluks baru magnetik hingga arus searah (DC) bernilai dua kali arus yang berlawanan arah. Hasil di Gambar 3-3

ini lebih sesuai dengan konsep netralitas arus yang diharapkan muncul dari konfigurasi medan magnet sederhana yang mendekati medan potensial. Ini bisa jadi disebabkan oleh area integrasi WIL2 hanya mencakup daerah dengan arus yang relevan. Sementara integrasi di seluruh daerah aktif (WIL1) akan mengikutsertakan banyak noise dan arus-arus yang mungkin mengarah ke daerah aktif NOAA 12018 yang lokasinya berdekatan.

4 KESIMPULAN

Pada makalah ini, kami menjelaskan bagaimana peran medan magnet di Matahari dalam menentukan tingkat produktivitas suatu daerah aktif. Meskipun hanya menggunakan data medan magnet di permukaan (fotosfer), karakteristik produktivitas daerah aktif dapat diperoleh melalui nilai-nilai proksi dari parameter-parameter fisis sebenarnya yang menempati ruang tiga dimensi. Kami menunjukkan bagaimana parameter energi bebas dan sudut geser dapat diturunkan melalui hasil pengamatan dan perhitungan medan potensial. Kami juga menjelaskan bagaimana arus listrik dan helisitas arus di permukaan Matahari dapat didekati nilainya secara sederhana asalkan diketahui vektor medan magnet di permukaan tersebut.

Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa dinamika NOAA 12017 sangat dipengaruhi oleh kemunculan fluks magnetik positif yang timbul di tengah daerah dengan polaritas negatif. Fluks baru ini meningkatkan energi magnetik sistem secara signifikan dalam kurun waktu 8 jam setelah kemunculannya sehingga meningkatkan potensi terjadinya beberapa ledakan Matahari. Hasil ini senada dengan hasil yang diperoleh untuk kasus flare besar dari daerah aktif NOAA 11158 (Vemareddy *et al.*, 2015) dan 12673 (Vemareddy *et al.*, 2019). Kehadiran fluks baru yang timbul

di bagian daerah aktif yang berbeda polaritas magnetiknya memang telah diketahui dapat menyebabkan terjadinya ledakan Matahari melalui mekanisme penihilan fluks (*flux cancellation*) atau sebagai pemicu (*trigger*) bagi terjadinya ledakan Matahari (Zhang *et al.*, 2001; Kusano *et al.*, 2012). Hasil penelitian kami menguatkan hasil penelitian sebelumnya mengenai hal ini.

Kami menemukan bahwa di sepanjang garis balik polaritas antara fluks yang baru muncul (*emerging flux*) dan fluks lama terjadi peningkatan sudut geser yang menandakan medan magnet yang semakin non potensial. Ketidakpotensialan juga diindikasikan dengan peningkatan kerapatan energi bebas dan arus vertikal di daerah tersebut. Pengamatan SDO/AIA pada panjang gelombang *soft X-ray* dan ultraviolet ekstrem menunjukkan bahwa ledakan Matahari bermula dari daerah dengan tingkat non potensial yang tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa analisis distribusi spasial energi magnetik dan arus listrik dapat membantu kita memahami peluang tempat kejadian ledakan Matahari di suatu daerah aktif.

Hasil analisis kami menunjukkan bahwa arus listrik cenderung bersifat netral pada awal perkembangan NOAA 12017. Perhitungan netralitas arus pada WIL2 saja lebih konsisten dengan teori netralitas arus dibandingkan perhitungan pada keseluruhan daerah aktif (WIL1). Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan area analisis untuk menghitung parameter fisis, terutama yang berkaitan dengan arus listrik akan lebih baik jika bersifat lokal di daerah dengan konsentrasi energi magnetik yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan kesalahan yang lebih besar pada perhitungan arus listrik untuk daerah dengan kerapatan fluks magnet yang rendah. Perhitungan pada daerah lokal dan penggunaan ambang batas minimum untuk menghitung arus

vertikal dapat meningkatkan tingkat kepercayaan perhitungan arus listrik.

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter fisis daerah aktif yaitu energi bebas, arus vertikal, helisitas arus, dan netralitas arus dapat digunakan untuk mengetahui potensi kejadian ledakan Matahari di NOAA 12017. Hasil ini sesuai dengan hasil yang diperoleh oleh peneliti-peneliti lainnya yang menganalisis parameter-parameter tersebut pada daerah aktif yang lain dengan data SHARP (Vemareddy *et al.*, 2015; Romano *et al.*, 2015). Namun demikian, besarnya nilai energi bebas total, arus vertikal total, dan helisitas arus total hanya bermakna sebagai penanda potensi terjadinya ledakan Matahari jika disertai tren kenaikan, karena besarnya nilai dapat berbeda-beda untuk setiap ledakan Matahari dan setiap daerah aktif. Kami menyarankan penggunaan rasio netralitas arus sebagai penanda terjadinya ledakan Matahari yang paling sesuai jika harus diaplikasikan pada daerah aktif yang lain. Hal ini disebabkan nilai rasio netralitas arus yang selalu berada di angka satu untuk keadaan netral dapat digunakan sebagai acuan universal untuk berbagai ledakan Matahari. Tentu saja kesimpulan ini masih perlu diperkuat dengan menambah jumlah sampel daerah aktif dan perhitungan arus listrik yang lebih baik lagi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim SDO, HMI, SHARP, dan AIA yang telah menyediakan datanya secara terbuka untuk penelitian ini. Penelitian ini dilakukan sebagai kegiatan penelitian mandiri dengan dana DIPA Pusat Sains Antariksa, LAPAN, tahun 2019. Penulis berterima kasih kepada para penelaah (mitra bestari) yang telah memberikan saran-saran bagi perbaikan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Alfven, H., 1942. *Existence of Electromagnetic – Hydrodynamic Waves*, Nature, 150:405-406.
- Alissandrakis, C.E., 1981. *On the computation of Constant α Force-Free Magnetic Field*, Astronomy and Astrophysics, 100:197-200.
- Aulanier, G., P. Demoulin, C.J. Schrijver, M. Janvier, E. Pariat, dan B. Schmieder, 2013. *The Standard Flare Model in Three Dimensions II. Upper Limit on Solar Flare Energy*, Astronomy and Astrophysics, 549(A66):7pp.
- Bobra, M.G., X. Sun, J.T. Hoeksema, M. Turmon, Y. Liu, K. Hayashi, G. Barnes, dan K.D. Leka, 2014. *The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: SHARPs – Space Weather HMI Active Region Patches*, Solar Physics, 289(9):3549-3578.
- Bobra, M.G. dan Couvidat S., 2015. *Solar Flare Prediction Using SDO/HMI Vector Magnetic Field Data With a Machine Learning Program*, Astrophysical Journal, 798(135):11pp.
- Canfield, R.C., H.S. Hudson, dan D.E. McKenzie, 1999. *Sigmoidal Morphology and Eruptive Solar Activity*, Geophysical Research Letters, 26, 627
- Falconer, D.A., R.L. Moore, dan G.A. Gary, 2008. *Magnetogram Measures of Total Nonpotentiality for Prediction of Solar CME From Active Regions of Any Degree of Magnetic Complexity*, Astrophysical Journal, 689:1433-1442.
- Fang, F., W. Manchester IV, W.P. Abbett, dan B. van der Holst, 2012. *Buildup of Magnetic Shear and Free Energy During Flux Emergence and Cancellation*, Astrophysical Journal, 754: 15(9pp).
- Florios, K., I. Kontogiannis, S-H. Park, J.A. Guerra, F. Benvenuto, D. Shaun Bloomfield, dan M.K. Georgoulis, 2018. *Forecasting Solar Flares Using Magnetogram-Based Predictors and Machine Learning*, Solar Physics, 293(2):28.
- Gary, G.A., R.L. Moore, M.J. Hagyard, dan B.M. Haisch, 1987. *Nonpotential features*

- observed in the magnetic field of an active region, *The Astrophysical Journal* 314:782
- Janvier, M., G. Aulanier, V. Bommier, B. Schmieder, P. Démoulin, dan E. Pariat, 2014. *Electric Currents in Flare Ribbons Observations and Three-Dimensional Standard Model*, *Astrophysical Journal*, 788(1):60-70.
- Judge, P.G., L. Kleint, A. Sainz-Dalda, 2015. *On Helium Line Polarization During The Impulsive Phase Of An X1 Flare*, *Astrophysical Journal*, 814,2.
- Kazachenko, M.D., G.H. Fisher, B.T. Welsch, Y. Liu, dan X. Sun, 2015. *Photospheric Electric Fields and Energy Fluxes in the Eruptive Active Region NOAA 1158*, *Astrophysical Journal*, 811, 1.
- Kontogiannis, I., M.K. Georgoulis, S.H. Park, dan J.A. Guerra, 2017. *Non-neutralized Electric Currents in Solar Active Regions and Flare Productivity*, *Solar Physics*, 292:159.
- Kusano, K., Y. Bamba, T.T. Yamamoto, Y. Lida, S. Toriumi, dan A. Asai, 2012. *Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections*, *Astrophysical Journal*, 760:31-39.
- Leka, K.D., dan G. Barnes, 2007. *Photospheric Magnetic Field Properties of Flaring versus Flare-Quiet Active Regions IV. A Statistically Significance Sample*, *Astrophysical Journal*, 656:1173-1186.
- Lemen, J. R., A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake, D.W. Duncan, C.G. Edwards, F.M. Friedlaender, G.F. Heyman, N.E. Hurlburt, N.L. Katz, G.D. Kushner, M. Levay, R.W. Lindgren, D.P. Mathur, E.L. McFeaters, S. Mitchell, R.A. Rehse, C.J. Schrijver, L.A. Springer, R.A. Stern, T.D. Tarbell, J-P. Wuelser, C.J. Wolfson, C. Yanari, J.A. Bookbinder, P. N. Cheimets, D. Caldwell, E.E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W.A. Podgorski, R.I. Bush, P.H. Scherrer, M. A. Gummin, P. Smith, G. Auken, P. Jerram, P. Pool, R. Soufli, D.L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, dan N. Waltham (2012). *The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*, *Solar Physics*, doi: 10.1007/s11207-011-9776-8.
- Liu, Y., X. Sun, T. Török, V.S. Titov, dan J.E. Leake, 2017. *Electric-Current neutralization, Magnetic Shear, and Eruptive Activity in Solar Active Regions*, *Astrophysical Journal Letters*, 846(L6):6pp.
- Moore, R.L., D.A. Falconer, dan A.C. Sterling, 2012. *The Limit of Magnetic-Shear Energy in Solar Flare Active Regions*, *Astrophysical Journal*, 750(24):10pp.
- Nishizuka, N., K. Sugiura, Y. Kubo, M. Den, S. Watari, dan M. Ishii, 2017. *Solar Flare with Three Machine Learning Algorithms Using Ultra-Violet Brightening and Vector Magnetogram*, *Astrophysical Journal*, 835(2):156.
- Parker, E.N., 1996. *Inferring Mean Electric Currents in Unresolved Fibril Magnetic Fields*, *Astrophysical Journal*, 471:485-488.
- Pesnell, W.D., B.J. Thompson, dan P.C. Chamberlin, 2012. *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Solar Physics*, 275(1-2), 3-15.
- Pevtsov, A. A., M.A. Berger, A. Nindos, A.A. Norton, dan L. Van Driel-Gesztelyi, 2014. *Magnetic Helicity, Tilt, and Twist*, *Space Science Reviews*, 186: 285
- Pipin, V.V., A.A. Pevtsov, Y. Liu, dan A.G. Kosovichev, 2019. *Evolution of Magnetic Helicity in Solar Cycle 24*, *Astrophysical Journal Letters*, 877,2.
- Romano, P., F. Zuccarello, S.L. Guglielmino, D. Del Moro, A. Elmhamdi, I. Ermolli, S. Fineschi, P. Francia, A.S. Kordi, E.L. Degl'Innocenti, M. Laurenza, F. Lepreti, M.F. Marcucci, G. Pallochia, E. Pietropaolo, M. Romoli, A. Vecchio, M. Vellante, dan U. Villante, 2015. *Recurrent Flares in Active Region NOAA 11283*, *Astronomy and Astrophysics*, 582, A55.
- Romano, P., A. Elmhamdi, dan A. Kordi, 2019. *Strong White-Light Solar Flares in AR NOAA 12673 as Potential Clues for Solar Superflares*, *Solar Physics*, 294:4

- Sakurai, T., 1989. *Magnetic Equilibria and Instabilities*, Solar Physics, 121:347-360.
- Scherrer, P.H., J. Schou, R.I. Bush, A.G. Kosovichev, R.S. Bogart, J.T. Hoeksema, Y. Liu, T.L. Duvall Jr., J. Zhao, A.M. Title, C.J. Schrijver, T.D. Tarbell, dan S. Tomczyk, 2012. *The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO)*, Solar Physics, 275:207-227.
- Schou, J., P.H. Scherrer, R.I. Bush, R. Wachter, S. Couvidat, M.C. Rabello-Soares, R.S. Bogart, J.T. Hoeksema, Y. Liu, T.L. Duvall Jr., D.J. Akin, B.A. Allard, J.W. Miles, R. Rairden, R.A. Shine, T.D. Tarbell, A.M. Title, C.J. Wolfson, D.F. Elmore, A.A. Norton, dan S. Tomczyk, 2012. *Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*, Solar Physics, 275, 229-259.
- Schrijver, C.J., 2007. *A Characteristic Magnetic Field Pattern Associated With All Major Solar Flares And Its Use in Flare Forecasting*, Astrophysical Journal, 635:L117-L120.
- Vemareddy, P., P. Venkatakrishnan, dan S. Karthikreddy, 2015, *Flux Emergence in the Solar Active Region NOAA 11158: The Evolution of Net Current*, Research in Astronomy and Astrophysics, 15,9: 1547-1558.
- Vemareddy, P., 2019. *Very Fast Helicity Injection Leading to Critically Stable State and Large Eruptive Activity in Solar Active Region NOAA 12673*, Astrophysical Journal, 872, 2.
- Welsch, B. T., 2006. *Magnetic Flux Cancellation and Coronal Magnetic Energy*, Astrophysical Journal, 638, (2): 1101-1109.
- Woods, M.M., L.K. Harra, S.A. Matthews, D.H. Mackay, S. Dacie, dan D.M. Long, 2017. *Observations and Modelling of the Pre-flare Period of the 29 March 2014 X1 Flare*, Solar Physics, 292:38
- Woods, M.M., S. Inoue, L.K. Harra, S.A. Matthews, K. Kusano, dan N.M.E. Kalmoni, 2018. *The Triggering of the 2014 March 29 Filament Eruption*, Astrophysical Journal, 860:163(10pp).
- Zhang, H., 2016. *Photospheric Magnetic Free Energy Density of Solar Active Regions*, Solar Physics, 291(12):3501-3517.
- Zhang, J., J. Wang, Y. Deng, dan D. Wu, 2001. *Magnetic Flux Cancellation Associated with the Major Solar Event on 2000 July 14*, Astrophysical Journal Letters, 548(1):L99-L102.
- Glogowski, K., dan M.G Bobra, 2016. *A New Python Module for Accessing HMI and AIA Data*, <http://hmi.stanford.edu/hminuggets/?p=1757>, diakses 21 Agustus 2019.

