



KATALOG DAERAH ERUPTIF SIKLUS MATAHARI KE-23 (Solar Cycle 23 Eruptive Regions Catalog)

RhoromPriyatikanto
Pusat Sains Antariksa,
LembagaPenerbangandanAntariksaNasional.
e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015
Direvisi: 16-10-2016
Disetujui: 19-10-2016
Diterbitkan: 24-10-2016

Kata kunci:

flare, daerah aktif, siklus ke-23

Flare merupakan salah satu bentuk aktivitas Matahari yang memiliki pengaruh signifikan terhadap lingkungan dan cuaca antariksa. Peristiwa flare cenderung terlokalisasi di daerah aktif-eruptif yang dapat dianggap sebagai *self-organized criticality system* (SOCS) dan flare menjadi mekanisme pelepasan energi setelah sistem mencapai kondisi kritis. Dari sudut pandang tersebut, flare dapat terjadi secara berulang dan total energi yang dilepaskan oleh satu daerah eruptif bergantung pada karakter daerah tersebut. Pola pelepasan energi dari satu daerah eruptif perlu dipahami dan penyusunan katalog visual daerah eruptif sepanjang siklus ke-23 (1996-2008) menjadi langkah awal untuk mencapai tujuan tersebut. Katalog tersebut berisikan catatan kejadian flare, energi total flare, serta luas dan kelas magnetik dari 338 daerah eruptif yang pernah menghasilkan flare kelas M atau lebih kuat. Berdasarkan katalog tersebut, dapat diketahui adanya 20 daerah aktif dengan kelas magnetik alpha yang dapat menghasilkan flare kelas M, dan 170 flare kelas M dihasilkan oleh daerah aktif dengan hanya kelas magnet beta. Kasus-kasus tersebut menarik untuk ditelaah lebih lanjut karena daerah dengan kompleksitas magnetik yang tinggi memiliki ekspektasi besar sebagai penghasil flare energi tinggi. Hasil awal kedua adalah keterkaitan antara luas daerah eruptif dan total energi yang dilepaskan selama kemunculannya di piringan Matahari.

ABSTRACT

Keywords:

flare, active region, cycle 23

Flare is one of Solar activity with significant effect to space environment and space weather. Flare tends to occur in localized active region that can be considered as self-organized criticality system (SOCS) in which flare becomes the energy release mechanism after the system reaches critical condition. From this point of view, flare may erupt repeatedly while the total energy released from one eruptive region depends on the properties of that region. The pattern of that energy release needs to be understood and the compilation of visual catalogue of eruptive regions during Solar cycle 23 (1996-2008) becomes an early step to achieve that objective. This catalogue consists of flare occurrence record, total released energy, together with the area and magnetic class of 338 eruptive regions that ever produced M-class flare. Based on this the catalogue, there are 20 active regions with alpha-class could produce M flare and 170 M-class flare produced by the active region only with the magnetic class beta. Those cases request further study

since active regions with higher complexity have more expectancy of high energy flares. The other result from this study is the relation between the areas of eruptive regions with the total energy released during their appearances.

1. Pendahuluan

Flare merupakan sebuah peristiwa energi tinggi di atmosfer Matahari yang dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap cuaca dan lingkungan antariksa (Hapgood dan Thomson, 2010). Flare teramati pertama kali secara kebetulan oleh R. C. Carrington dan R. Hodgson secara terpisah pada tanggal 1 September 1859 di Inggris (Carrington, 1859; Hodgson, 1859). Beberapa saat setelah flare teramati, terjadi badai geomagnet yang cukup besar hingga mengacaukan sistem komunikasi dan telegram serta memunculkan aurora yang terlihat dari daerah Kuba yang berada di lintang rendah (Bell dan Phillips, 2008). Pada abad berikutnya, pengamatan flare pada berbagai rentang panjang gelombang mulai digalakkan. Pemantauan Matahari pada jendela H mulai dilakukan secara terstruktur sejak tahun 1934 hingga mampu mendeteksi sejumlah besar flare (Cliver, 1995). Deteksi flare pada panjang gelombang radio dilakukan pertama kali pada tahun 1942 menggunakan radar militer. Pengamatan tersebut menunjukkan keberadaan radiasi non-termal dari elektron yang berada di korona. Pada rentang energi tinggi, pengamatan flare sinar-X baru dapat dilakukan pada tahun 1950-an ketika teknologi pengamatan berbasis balon dan roket telah ada. Deteksi flare sinar-X (> 10 keV) pada tahun 1958 menunjukkan adanya radiasi Bremsstrahlung dengan distribusi energi mendekati fungsi pangkat (*power law distribution*). Peluncuran satelit *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) pada pertengahan 1970-an membuka babak baru pengamatan flare pada jendela sinar-X dengan energi 10 keV.

Kejadian flare cenderung terlokalisasi pada ruang tertentu, yakni di daerah aktif eruptif. Karena itu, probabilitas kemunculan flare sering kali dikaitkan dengan karakteristik daerah aktif seperti kelas McIntosh (Bloomfield et al., 2012), kelas Hale, atau luasnya (Lee et al., 2012). Sebuah daerah aktif eruptif dapat menghasilkan beberapa flare, terutama pada fase awal kemunculannya (Hudson, 2011). Sebuah flare terjadi akibat rekoneksi garis medan magnet di daerah aktif dengan dua kutub (atau lebih). Beberapa flare yang

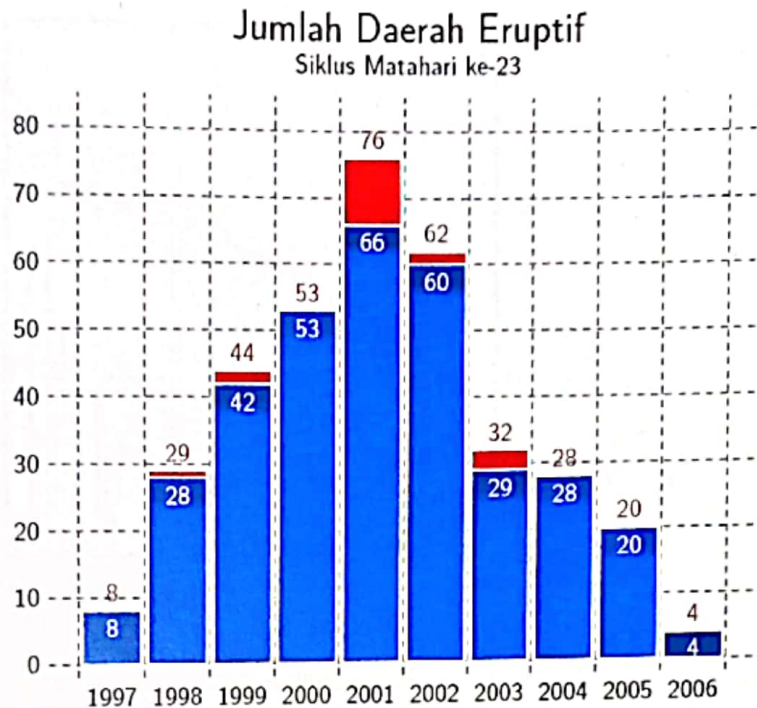
beruntutan terjadi seperti longoran salju (*avalanche*) karena daerah aktif dapat dianggap sebagai *Self-Organized Criticality System* (SOCS) yang dapat mengalami erupsi ketika mencapai batas kritis atau batas instabilitas tertentu (Lu dan Hamilton, 1991). Instabilitas dapat dicapai karena ada fluks medan magnet sebagai penggerak yang mencegah sistem tetap statis atau berada pada keadaan sub-kritis (Aschwanden et al., 2014).

Perspektif flare sebagai produk SOCS dapat diuji berdasarkan fungsi distribusi energi flare sinar-X yang teramati (Lu and Hamilton, 1991). Untuk keperluan ini, beberapa katalog flare *hard x-ray* (10-100 keV) dan *soft x-ray* (1-10 keV) telah disusun berdasarkan data pengamatan flare menggunakan sejumlah instrumen. Beberapa di antaranya adalah *Orbiting Solar Observatory-7* (OSO-7); (Datlowe et al., 1974), *Hard X-Ray Burst Spectrometer/X-ray Multi-mirror Mission* (HXRBS/XMM); (Dennis, 1985; Crosby et al., 1993), *Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI); (Christe et al., 2008), dan ULYSSES (Tranquille et al., 2009) untuk *hard x-ray* serta *Yohkoh/Soft X-ray Telescope* (Shimojo dan Shibata, 1999) dan GOES (Aschwanden dan Freeland, 2012). Di dalam katalog tersebut, terdapat rekaman kejadian flare sinar-X energi tinggi disertai fluks maksimum (E_{max}), energi total/fluence (E_{total}), serta durasi flare (Δt). Berdasarkan katalog tersebut, diketahui bahwa fungsi distribusi energi flare mengikuti *power-law* dengan koefisien $a = 1,8$.

Katalog tersebut lebih banyak membahas statistik global seluruh kejadian flare dalam beberapa siklus Matahari. Padahal, statistik kejadian flare setiap daerah aktif juga perlu dibangun, mengingat flare cenderung terlokalisasi. Untuk itu, studi ini bertujuan untuk membangun katalog daerah eruptif sepanjang siklus Matahari ke-23. Parameter yang menjadi fokus dalam katalog tersebut adalah energi flare dan karakteristik daerah aktif yang menghasilkannya.

2. Data dan Metode

Katalog dibuat berdasarkan data pada siklus Matahari ke-23, yakni sejak Januari 1997 hingga Desember 2006. Sebagai catatan



Gambar 2-1. Distribusi jumlah daerah eruptif sepanjang tahun 1997-2006 yang berpuncak pada tahun 2001. Histogram warna merah untuk seluruh daerah eruptif (356 buah), sementara histogram warna biru untuk daerah eruptif dengan data lengkap dan dianalisis dalam studi ini (338 buah).

bahwa pada tahun 1996 dan 2007-2008 tidak ada flare kelas M yang terjadi.

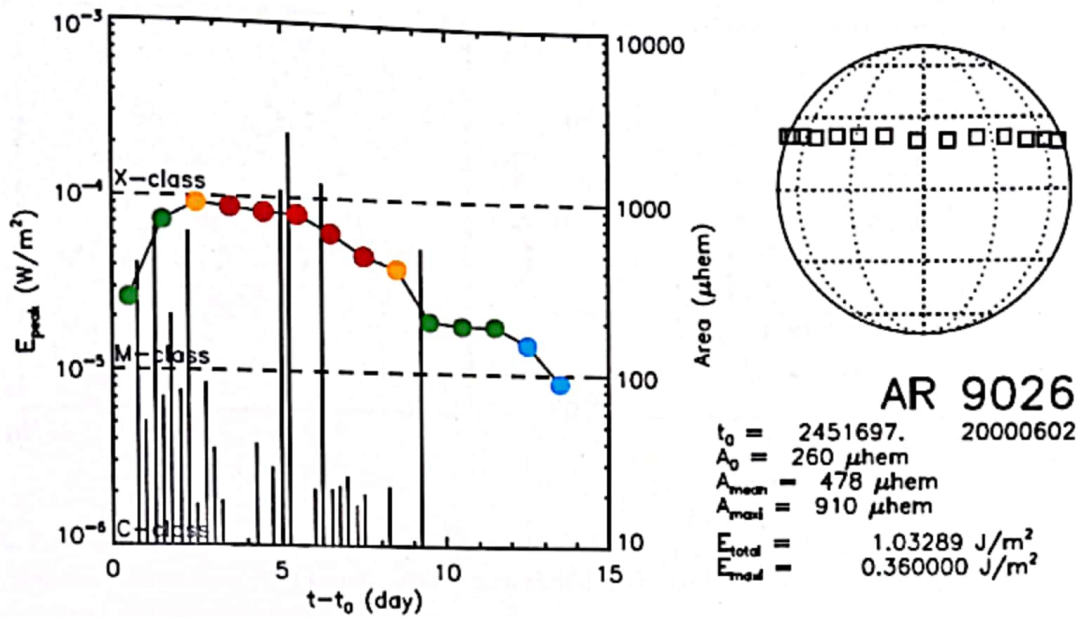
Terdapat dua jenis data yang digunakan dalam studi ini, yakni rekaman harian daerah aktif Matahari serta catatan kejadian flare. Rekaman daerah aktif berasal dari *Solar Region Summary* (SRS) yang dirilis oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration/Space Weather Prediction Center* (NOAA/SWPC). File ASCII yang diunduh dari [ftp.swpc.noaa.gov/pub/\[tahun\]/SRS](ftp.swpc.noaa.gov/pub/[tahun]/SRS) berisikan karakteristik daerah aktif yang teramati pada hari tertentu. Parameter yang direkam meliputi koordinat heliosentris daerah aktif, luas area (dalam sepersepjuta kali luas piringan Matahari, μhem), kelas McIntosh, kelas Hale, serta jumlah bintik yang teramati.

Set data kedua adalah rekaman kejadian geofisika di Matahari, atau *Solar Geophysical Event Report* (SGER) yang juga dirilis setiap hari oleh NOAA/SWPC dan dapat diakses publik melalui <ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events>. Dalam setiap file yang diunduh, terdapat catatan

kejadian seperti flare sinar-X yang terdeteksi oleh GOES/XRS (*X-ray Sensor*). Beberapa parameter turut direkam, di antaranya waktu kejadian flare (awal, puncak, akhir), kelas flare atau fluks maksimum pada kanal B dari GOES/XRS (0,1 – 0,8 nm), energi total flare, dan daerah aktif penghasil flare.

Untuk mendapatkan katalog yang dikehendaki, kedua jenis data tersebut mengalami proses sebagai berikut:

- Pemilihan daerah eruptif, yakni daerah aktif yang pernah mengalami flare kelas M atau fluks maksimum lebih dari 10^{-5} W/m^2 . Sepanjang tahun 1997-2006, terdapat 356 daerah aktif yang memenuhi kriteria tersebut. Gambar 2-1 menunjukkan distribusi jumlah daerah eruptif pada rentang waktu yang dianalisis.
- Integrasi data daerah eruptif dilakukan untuk menyatukan parameter daerah aktif yang terekam dalam sejumlah file berbeda. Sebagai contoh, daerah eruptif AR 9026 muncul sejak tanggal 2 Juni 2000 dan tampak di piringan Matahari selama 14 hari. Parameter penting yang terekam



Gambar 3-1. Contoh visualisasi data terkait daerah eruptif AR 9026 yang mulai tampak tanggal 2 Juni 2000. Garis tegak pada panel sebelah kiri menunjukkan fluks maksimum flare (E_{peak}) sementara titik bulat menunjukkan luas daerah eruptif dalam μhem . Warna bulatan menandai kelas magnetik: alpha (biru), beta (hijau), beta-gamma (kuning), dan beta-gamma-delta (merah).

dalam 14 file SRS dan 14 file SGER perlu diekstrak dan diintegrasikan menjadi satu rekaman terkait AR 9026. Tidak semua daerah eruptif memiliki rekaman yang lengkap. Hanya 338 daerah eruptif yang dapat melewati proses ini (Gambar 2-1).

- Perhitungan beberapa parameter penting seperti luas daerah eruptif pada awal kemunculannya (A_0), luas rata-rata (A_{mean}), luas maksimal (A_{maxi}), energi total flare (E_{total}), serta energi maksimum yang dilepaskan dalam satu kejadian flare (E_{maxi}). Energi flare masih dinyatakan dalam satuan J/m^2 .
- Visualisasi data yang meliputi waktu dan fluks maksimum flare, evolusi luas dan kelas magnetik daerah eruptif, posisi heliografis, serta parameter penting yang telah dihitung sebelumnya. Visualisasi ini amat bermanfaat untuk menemukan pola atau kecenderungan tertentu.

Keluaran dari proses tersebut adalah file berisikan parameter penting dari seluruh daerah eruptif serta gambar/visualisasi dari parameter tersebut.

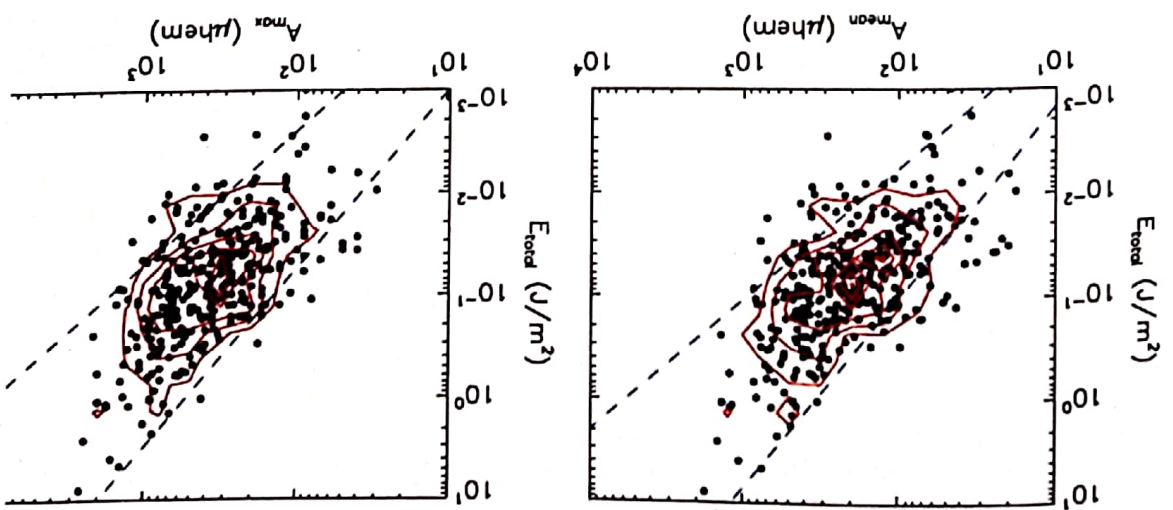
3. Hasil dan Pembahasan

Sebagaimana yang telah disebutkan sebelumnya, keluaran dari studi ini adalah katalog daerah eruptif sepanjang siklus Matahari ke-23 serta visualisasi data terkait daerah tersebut. Gambar 3-1 menunjukkan contoh visualisasi daerah eruptif AR 9026 yang muncul sejak tanggal 2 Juni 2000 atau *Julian Date* 2.451.697. AR 9026 merupakan salah satu daerah paling eruptif karena sempat menghasilkan beberapa flare kelas M dan tiga buah flare kelas X sepanjang kemunculannya di piringan Matahari. Akumulasi fluks sinar-X yang dihasilkan AR 9026 melalui flare adalah $E_{total} = 1,033 J/m^2$. Dengan demikian energi total yang dilepaskan adalah:

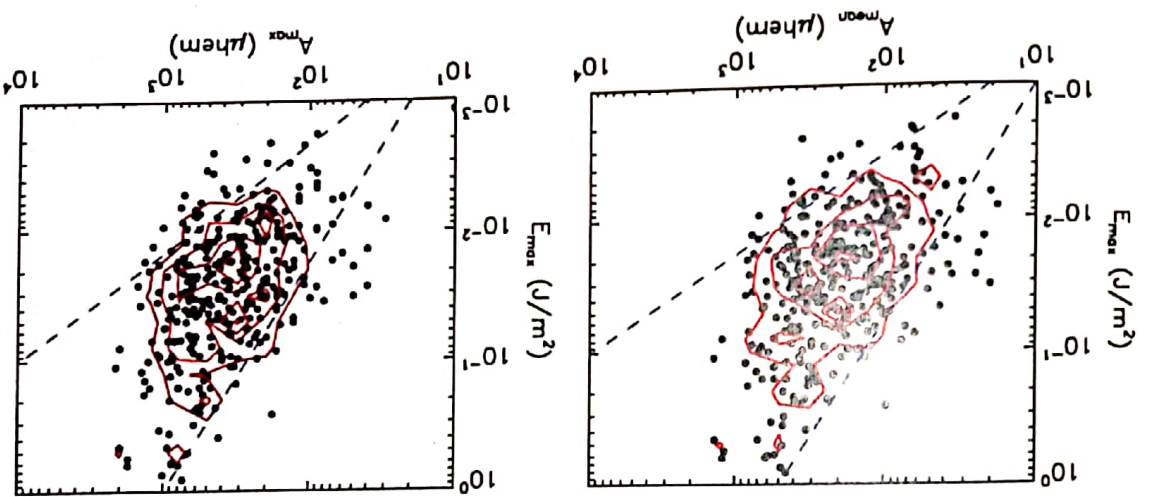
$$\begin{aligned}
 ET &= 4\pi d^2 E \\
 &= 2,813 \times 10^{23} \times E \dots\dots\dots(3-1) \\
 &= 2,905 \times 10^{23} \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

dengan $d = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$ menyatakan jarak Bumi-Matahari (Luzum et al. 2011).

Sepanjang siklus Matahari ke-23, daerah yang melepaskan energi paling besar adalah



Gambar 3-2. Plot hubungan antara luas daerah aktif rata-rata (kiri) dan luas maksimal (kanan) terhadap energi total yang dilepaskan sepanjang kemunculan daerah aktif di piringan Matahari. Garis kontur menandai kerapatan lokal dari titik-titik data.



Gambar 3-3. Sama seperti Gambar 3-2, tetapi dengan ordinat energi maksimum (E_{max}).

atau *Self-Organized Criticality System*. Meski demikian, model tersebut belum mampu digunakan untuk prediksi (Strugarek dan Charbonneau, 2014).

Flare cenderung lebih banyak terjadi pada saat kemunculan daerah aktif dan probabilitas kejadian flare sering dengan kompleksitas daerah aktif tersebut. Sebagian besar flare energi tinggi dihasilkan oleh daerah aktif dengan kelas magnetik β - γ - δ Meski demikian, dari 338 daerah erupitif yang ditelaah dalam studi ini, terdapat 20 daerah aktif yang menghasilkan flare kelas M meski dengan konfigurasi magnetiknya cukup sederhana, yakni dengan kelas magnetik α . Terdapat 170

AR 486, penghasil *Halloween flare* (Mandrini et al., 2006). Daerah erupitif tersebut melepaskan energi sebesar $2,216 \times 10^{24}$ Joule dan sempat melepaskan energi sebesar $6,470 \times 10^{23}$ Joule dalam satu kejadian flare X17 tanggal 4 November 2003. Pada saat itu, fluks sinar-X yang dipancarkan oleh AR 486 adalah 1700 kali lebih kuat dari biasanya.

Berdasarkan katalog visual yang telah disusun, pola kejadian flare dari sebuah daerah aktif juga dapat dipelajari. Sebuah daerah aktif dapat mengalami beberapa babak aktivitas yang ditandai oleh frekuensi kejadian flare dan kelasnya. Pola pelepasan energi semacam ini dapat dimodelkan dengan model *avalanche* Seminar Nasional Sains Antariksa 2015 LAPAN Bandung, 22 November 2015

daerah aktif yang menghasilkan flare kelas M hanya dengan kelas magnetik β . Daerah eruptif tersebut menarik untuk ditelaah lebih lanjut.

Poin menarik berikutnya yang diperoleh dari katalog adalah kemungkinan adanya hubungan antara luas daerah eruptif dan energi total yang dilepaskan melalui flare sepanjang kemunculannya. Gambar 3-2 menunjukkan plot hubungan antara luas rata-rata (A_{mean}) dan luas maksimal (A_{maxi}) dengan energi total (E_{total}) dari 338 daerah eruptif. Gambar 3-3 menggunakan ordinat E_{maxi} ketimbang E_{total} .

Dari keempat plot yang telah dibuat, tampak adanya kecenderungan bahwa energi yang dilepaskan, baik total maupun maksimal, meningkat seiring dengan peningkatan luas daerah eruptif. Luas daerah aktif merepresentasikan besarnya fluks medan magnet di daerah tersebut (Jin et al., 2006). Dapat dipahami bahwa semakin besar medan magnet di daerah eruptif, semakin besar pula energi potensial yang tersimpan.

Sekilas, korelasi antara $A_{\text{mean}}-E_{\text{maxi}}$ atau $A_{\text{maxi}}-E_{\text{maxi}}$ lebih lemah dibandingkan korelasi dengan $A_{\text{mean}}-E_{\text{total}}$ dan $A_{\text{maxi}}-E_{\text{total}}$. Hal ini agak bersifat *counter-intuitive* karena statistik E_{total} lebih sensitif terhadap *selection bias*. Deteksi dan pengukuran energi flare hanya dapat dilakukan terhadap daerah aktif yang tampak di piringan Matahari (*front side*). Daerah aktif dengan area yang besar diharapkan melepaskan energi yang lebih besar karena aktivitasnya tidak hanya terbatas pada 14 hari kemunculannya di piringan Matahari. Statistik yang melibatkan E_{maxi} diharapkan lebih bebas dari bias seleksi akan menghasilkan korelasi yang lebih tinggi, tapi malah menunjukkan korelasi yang lebih rendah. Berdasarkan analisis ini, dapat dideduksi bahwa secara fisis, E_{total} memiliki keterkaitan yang lebih kuat dibandingkan E_{maxi} .

Hasil awal yang bersifat kualitatif tersebut menuntun pada pertanyaan selanjutnya tentang hubungan kuantitatif antara E_{total} dan luas daerah eruptif. Untuk menjawab pertanyaan ini, proses penambahan sampel dan seleksi data perlu dilakukan. Perlu dipilih daerah eruptif yang muncul dan tenggelam di piringan Matahari, bukan di sisi jauh Matahari. Dengan kriteria ini, energi total yang terukur benar-benar merepresentasikan energi yang dilepaskan oleh sebuah daerah eruptif.

Seminar Nasional Sains Antariksa 2015 LAPAN
Bandung, 22 November 2015

Telaah ini akan dilakukan pada studi selanjutnya.

4. Kesimpulan

Studi ini menelaah daerah eruptif Matahari sepanjang siklus ke-23. Katalog berisikan parameter dan catatan flare dari 338 daerah eruptif telah dikompilasi. Berdasarkan katalog tersebut, terdapat beberapa hasil awal yang diperoleh. Di antaranya adalah: (1) terdapat 20 daerah eruptif dengan kelas α yang menghasilkan flare kelas M dan 170 daerah eruptif yang dapat menghasilkan flare kelas M meski hanya dengan kelas magnetik β dan (2) terdapat hubungan antara luas daerah eruptif dengan energi total yang dilepaskan sepanjang kemunculannya di piringan Matahari. Hubungan ini menuntut telaah kuantitatif lebih lanjut.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan saran perbaikan terhadap makalah ini.

Rujukan

- Aschwanden, M. J., Crosby, N. B., Dimitropoulou, M., Georgoulis, M. K., Hergarten, S., McAteer, J., Milovanov, A. V., Mineshige, S., Nishizuka, N., Pruessner, G., Sanchez, R., Sharma, A. S., Strugarek, A. and Uritsky, V. (2014). 25 years of self-organized criticality: Solar and astrophysics. *Space Science Reviews*, 198:47
- Aschwanden, M. J. and Freeland, S. (2012). Automated solar flare statistics in soft x-ray over 37 years of GOES observation-the invariance of self-organized criticality during three solar cycles. *The Astrophysical Journal*, 754:112
- Bell, T. E. and Phillips, T. (2008). A super solar flare, http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/, diakses 10 November 2015
- Bloomfield, D., Higgins, P., McAteer, R., and Gallagher, P. (2012). Toward reliable benchmarking of solar flare forecasting

- methods. *The Astrophysical Journal*, 747:L41
- Carrington, R. C. (1859). Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20: 13
- Christe, S., Hannah, I., Krucker, S., McTierman, J., and Lin, R. (2008). RHESSI microflare statistics. I. Flare-finding and frequency distributions. *The Astrophysical Journal*, 677:1385
- Cliver, E.W. (1995). Solar flare nomenclature. *Solar Physics*, 157:285
- Crosby, N. B., Aschwanden, M. J., and Dennis, B. (1993). Frequency distribution and correlations of solar x-ray flare parameters. *Solar Physics*, 143:275
- Datlowe, D., Elcan, M., and Hudson, H. (1974). OSO-7 observation of solar x-ray in the energy range 10–100 keV. *Solar Physics*, 39:155
- Dennis, B. (1985). Solar hard x-ray bursts. *Solar Physics*, 100:465
- Haggood, M. and Thomson, A. (2010). *Space Weather: Its Impact on Earth and Implications for Business*. Lloyds 360 Risk Insight
- Hodgson, R. (1859). On a curious Appearance seen in the Sun. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 20: 15
- Hudson, H. (2011). Flares properties of solar flares. *Space Science Reviews*, 158:4
- Jin, C.K., Qu, Z.Q., Xu, C.L., Zhang, X.Y., and Sun, M.G. (2006). The relationships of sunspot magnetic field strength with sunspot area, umbral area and penumbra-umbra radius ratio. *Astrophysics and Space Science*. 306:23
- Lee, K., Moon, Y.-J., Lee, J.-Y., Lee, K.-S., and Na, H. (2012). Solar flare occurrence rate and probability in terms of the sunspot classification supplemented with sunspot area and its changes. *Solar Physics*, 281:639.
- Lu, E. and Hamilton, R. (1991). Avalanche and the distribution of solar flares. *The Astrophysical Journal*, 380:L89
- Luzum, B., Capitaine, N., Fienga, A., Folkner, W., Fukushima, T., Hilton, J., Hohenkerk, C., Krasinsky, G., Petit, G., Pitjeva, E., Soffel, M. and Wallace, P. (2011). The IAU 2009 system of astronomical constants: the report of the IAU working group on numerical standards for fundamental
- astronomy. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 110, 293-304
- Mandrini, C.H., Demoulin, P., Schmeider, B., Deluca, E.E., Pariat, E., and Uddin, E. (2006). Companion event and precursor of the X17 flare on 28 October 2003. *Solar Physics*. 283:293
- Shimojo, M. and Shibata, K. (1999). Occurrence rate of microflares in an x-ray bright point within an active region. *The Astrophysical Journal*, 516:934
- Strugarek, A. and Charbonneau, P. (2014). Predictive capabilities of avalanche models for solar flares. *Solar Physics*, 289:413
- Tranquille, C., Hurley, K., and Hudson, H. (2009). The ULYSSES catalog of solar hard x-ray flares. *Solar Physics*, 258:166