

Deteksi Otomatis Daerah Terang di Sisi Jauh Matahari untuk Prediksi Kemunculan Bintik (Automatic Far-Side Bright Region Detection for Predicting Spots Appearance)

Muhamad Zamzam Nurzaman, Johan Muhamad, Rasdewita Kesumaningrum, Santi Sulistiani,
Ayu Dyah Pangestu

Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 30-10-2020

Direvisi: 06-01-2021

Disetujui: 11-01-2021

Korespondensi:

Muhamad Zamzam Nurzaman
mzn5412@gmail.com

ABSTRAK

Daerah aktif yang bertanggung jawab sebagai penghasil *flare* seringkali muncul dari sisi timur Matahari sebagai daerah aktif yang telah matang. Oleh karena itu, kami membuat sebuah sistem deteksi otomatis daerah aktif atau daerah terang (jika dilihat oleh filter ultraviolet ekstrem) di sisi jauh dengan memanfaatkan data instrumen EUVI pada wahana ruang angkasa STEREO-A. Deteksi daerah terang dilakukan dengan mengembangkan prosedur pengunduhan data terbaru STEREO/EUVI, lalu dibandingkan dengan SDO/AIA dan digabungkan dalam suatu peta komposit dalam koordinat heliografik. Intensitas dan lamanya durasi daerah terang terdeteksi oleh sistem menentukan apakah daerah terang tersebut akan menjadi bintik atau tidak. Berdasarkan kriteria tersebut, program dapat mendeteksi 31 daerah terang di sisi jauh secara otomatis dan *near real-time*. Daerah terang yang menjadi bintik mempunyai rata-rata durasi terdeteksi 2 kali lebih lama dari daerah terang yang tidak menjadi bintik. Namun, perbedaan nilai rata-rata intensitasnya masih di bawah nilai simpangan baku daerah terang yang menjadi bintik sehingga masih sulit untuk menentukan ambang batas nilainya.

Kata kunci: *daerah aktif, flare, sisi jauh*

ABSTRACT

Active regions responsible for flare occurrences often appeared at the east limb as mature active regions. Therefore, we used the EUVI instrument onboard STEREO-A spacecraft to observe active regions or far-side bright region if seen by extreme ultraviolet (EUV) filter for the automatic detection system. The procedure running on the system is by combining the latest STEREO/EUVI and the SDO/AIA data into a single composite heliographic coordinate system map. Intensities and duration of far-side bright regions determined whether the sunspots will be developed or not. Based on this criteria, the program has successfully detected 31 far-side bright-regions in an automatically near real-time system. The far-side bright-regions that developed to sunspots have been detected 2 times longer than the far-side bright-regions that did not develop to sunspots. However, the difference in its mean intensity is still below the standard deviation of far-side bright-regions that develop to sunspots, which is insignificant to determine the threshold.

Keywords: *active region, flare, far-side*

1. Pendahuluan

Flare di Matahari merupakan peristiwa peningkatan intensitas radiasi pada berbagai panjang gelombang yang berlangsung sangat kuat dan cepat di atmosfer Matahari (Gold & Hoyle, 1960; Parker, 1963; Hudson,

2011). *Flare* dibagi menjadi kelas B, C, M, dan X berdasarkan fluks puncak pada panjang gelombang sinar-X 1-8 Å. Fluks minimum pada saat puncak *flare* untuk masing-masing kelas tersebut adalah 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , dan 10^{-4} Wm⁻². Salah satu dampak *flare* terhadap atmosfer Bumi adalah radiasi

yang dihasilkan dapat mengakibatkan atmosfer atas terionisasi dan mengembang sehingga mengganggu komunikasi radio yang memanfaatkan lapisan ionosfer. Oleh karena itu, prakiraan *flare* Matahari sangat penting untuk peringatan dini cuaca antariksa. Peristiwa *flare* melontarkan energi hingga 10^{23} erg (Emslie *et al.*, 2012) dalam bentuk energi magnet yang disimpan di dalam medan magnet daerah aktif. Dengan kata lain, daerah aktif Matahari adalah sumber utama peristiwa *flare* Matahari.

Peristiwa *flare* dapat terjadi di sembarang bujur di permukaan Matahari dengan intensitas yang beragam. Tak jarang *flare* yang terjadi di tepi Matahari adalah *flare* yang kuat dan sangat berpengaruh terhadap ionosfer. Contohnya *flare* X1,0 tanggal 3 Agustus 2002 (Gburek *et al.*, 2005), *flare* M9,0 tanggal 20 Oktober 2012 di tepi timur Matahari yang dipicu oleh erupsi filamen (Hernandez-Perez *et al.*, 2019), dan *flare* X8,2 tanggal 10 September 2017 di tepi barat Matahari (Doschek *et al.*, 2018; Karlicky *et al.*, 2020).

Prakiraan *flare* di tepi timur sisi dekat dan sisi jauh Matahari masih sangat sulit untuk dilakukan karena membutuhkan pengamatan daerah aktif di sisi jauh Matahari. Oleh karena itu, sangat penting untuk mendeteksi daerah aktif di tepi timur terlebih dahulu. Lindsey (2000) telah mengembangkan teknik holografi akustik yang merekonstruksi medan akustik di interior Matahari menggunakan pengamatan helioseismik di permukaan Matahari. Dengan menggunakan teknik ini, daerah dengan medan magnet yang kuat di sisi jauh Matahari dapat dicitrakan dengan mengukur reduksi waktu tempuh gelombang akustik yang melewati Matahari dari sisi jauh yang dideteksi di sisi dekat (Lindsey, 2000; Braun & Lindsey, 2001). Dengan teknik ini, telah dihasilkan peta daerah aktif di sisi jauh Matahari menggunakan data Doppler dari *Michelson Doppler Imager* (MDI; Scherrer *et al.*, 1995) di *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), dari *National Solar Observatory Global Oscillation Network Group* (GONG; Harvey *et al.*, 1996) dan dari *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI; Schou *et al.*, 2011) di *Solar Dynamics Observatory* (SDO).

Pada Oktober 2006 telah diluncurkan wahana kembar *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO; Kaiser *et al.*, 2008) untuk memetakan daerah aktif di sisi jauh Matahari. Analisis Liewer *et al.* (2017)

terhadap 22 daerah aktif seismik menunjukkan bahwa 100% bersesuaian dengan *plage* yang diamati oleh teleskop *Extreme Ultraviolet Imager* pada instrumen SECCHI/STEREO (Howard *et al.*, 2008), sedangkan 95% di antaranya adalah daerah aktif bernomor NOAA ketika mencapai tepi timur atau sebelum melintas ke sisi jauh.

Hasil penelitian Liewer *et al.* (2017) menggunakan data tahun 2011-2012 atau saat puncak siklus. Selain itu, belum ada penelitian deteksi daerah aktif secara *near real-time* untuk mendukung aplikasi prediksi *flare* terkini. Oleh karena itu, penelitian kami mengenai deteksi otomatis daerah terang di sisi jauh dapat dimanfaatkan untuk keperluan praktis prediksi *flare* terkini, khususnya dalam sistem layanan informasi cuaca antariksa milik Pusat Sains Antariksa, LAPAN yaitu *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFTS¹). Selain itu, data yang kami gunakan adalah data awal siklus ke-25 sehingga dapat melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya. Tulisan ini dibuat dalam sistematika yang dimulai dari Bab Pendahuluan, kemudian dilanjutkan dengan Data dan Metodologi. Bab selanjutnya adalah Hasil dan Pembahasan, lalu ditutup dengan Kesimpulan.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data

Untuk mengidentifikasi daerah terang di sisi jauh Matahari diperlukan data pengamatan ultraviolet ekstrem (EUV) yang diamati oleh dua wahana kembar STEREO-A dan STEREO-B yang berada di dua lokasi yang berbeda. Namun sejak tahun 2015, STEREO-B mengalami kerusakan dan tidak menghasilkan data pengamatan hingga sekarang. Posisi STEREO-A saat ini hingga beberapa tahun ke depan dapat mengamati sisi jauh sebelah timur permukaan Matahari. Penelitian ini dilakukan dengan data pengamatan STEREO-A karena kami hanya memerlukan data sisi jauh sebelah timur Matahari.

Wahana STEREO-A menggunakan instrumen EUVI yang mempunyai empat kanal panjang gelombang untuk mengamati sisi jauh. Salah satunya adalah kanal panjang gelombang 195 angstrom yang digunakan dalam penelitian ini. Panjang gelombang 195 angstrom dipilih sebagai representasi keadaan korona Matahari

¹ <http://swifts.sains.lapan.go.id/>

karena plasma panas yang berkaitan dengan aktivitas *flare* dapat terdeteksi dengan jelas. Data STEREO/EUVI-195 diunduh melalui laman STEREO *Science Center*². Kami juga memakai data *quicklook* dari instrumen AIA 193 angstrom³ pada wahana SDO untuk data sisi dekat Matahari.

2.2. Metode

Tahapan proses deteksi otomatis daerah terang di sisi jauh Matahari untuk memperkirakan kemunculan bintik di tepi timur sisi dekat Matahari dapat dilihat pada Gambar 1.

Langkah pertama adalah membuat peta penuh Matahari. Peta penuh tersebut dibuat dengan menggabungkan citra STEREO-A/EUVI 195 angstrom dan SDO/AIA 193 angstrom. Kedua citra diproyeksikan dalam koordinat heliografik dari medan pandang masing-masing instrumen lalu dipetakan dalam koordinat heliografik *Stonyhurst* (Thompson, 2006). Proses integrasi mengikuti prosedur *reprojection* AIA-EUVI mosaik pada modul *Sunpy* (Mumford et al., 2015). Langkah selanjutnya adalah proses *masking*. Proses ini bertujuan untuk mendeteksi daerah terang di sisi jauh yaitu daerah yang mempunyai intensitas di atas intensitas latar atau Matahari tenang. Namun hanya daerah terang yang mempunyai intensitas dan posisi tertentu yang akan ditandai. Proses seleksi ini disebut *filtering*. Kami menggunakan metode *gaussian filter* dengan parameter *sigma* tertentu untuk menentukan kriteria intensitasnya. Metode tersebut terdapat dalam fungsi *ndimage* pada modul *Scipy* (Virtanen et al., 2020). Kriteria posisinya adalah medan pandang STEREO-A pada sisi jauh Matahari, sehingga daerah terang di luar medan pandang tersebut tidak akan ditandai.

Program akan secara otomatis menandai daerah terang di sisi jauh yang sesuai kriteria lalu menghitung rata-rata intensitasnya, posisinya serta perkiraan waktu tiba di tepi timur sisi dekat permukaan Matahari. Penghitungan rata-rata intensitas daerah terang adalah berdasarkan piksel aktif di dalam kontur nilai batas (*threshold*) intensitas. Kontur nilai batas merupakan hasil dari proses *masking* dan *filtering*. Rata-rata intensitas mempunyai satuan

Digital Number (DN)/s yang sebanding dengan jumlah foton (*photon count*) yang diterima oleh instrumen EUVI setelah dinormalisasi nilai tertentu. Posisi yang dinyatakan oleh lintang dan bujur dihitung dari peta penuh yang sudah dalam koordinat heliografik *Stonyhurst*. Perhitungan perkiraan waktu tiba memanfaatkan fungsi *solar differential rotation* pada modul *Sunpy*. Fungsi tersebut menggunakan persamaan dari Howard dan Harvey (1970):

$$\Omega(\varphi) = 13,76 - 1,74\sin^2\varphi - 2,19\sin^4\varphi \quad (1)$$

dengan φ adalah lintang dan Ω dalam derajat/hari.

Langkah terakhir adalah memonitor daerah terang yang terdeteksi hingga mencapai tepi timur. Data posisi, rata-rata intensitas, serta perkiraan waktu tiba di tepi timur daerah terang akan otomatis tersimpan dalam suatu fail. Data dalam fail tersebut akan otomatis bertambah jika ada daerah terang lainnya yang terdeteksi.

Akan ada dua kemungkinan. Pertama, daerah terang tidak akan sampai ke sisi dekat tepi timur karena intensitasnya semakin melemah sehingga tidak sesuai kriteria lagi dan proses *monitoring* dinyatakan selesai. Kemungkinan kedua, daerah terang bertahan sampai sisi dekat tepi timur dan kemudian posisinya dibandingkan dengan data harian daerah aktif dari SWPC⁴ untuk menentukan daerah terang tersebut menjadi bintik atau *plage*.

3. Hasil dan Pembahasan

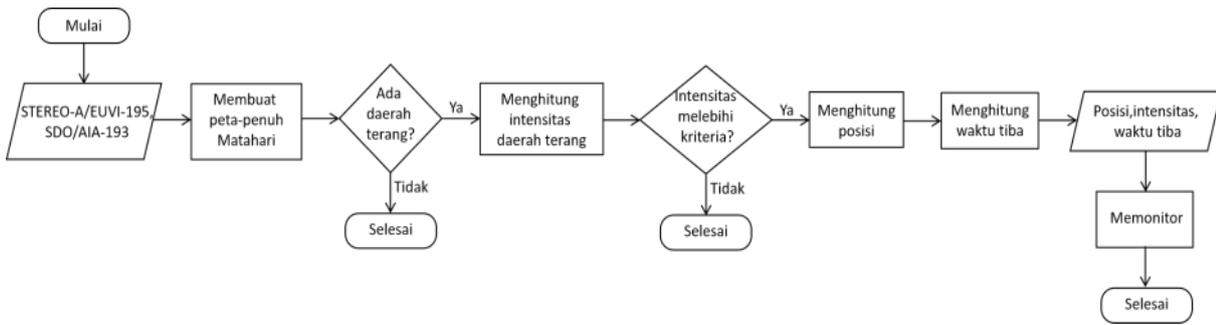
Hasil dari langkah pertama proses deteksi daerah terang di sisi jauh yaitu membuat peta penuh Matahari, dapat dilihat pada Gambar 2 atas. Bagian sisi dekat yang merupakan gabungan dari sebagian citra STEREO-A/EUVI 195 dan SDO/AIA 193 A berada di posisi bujur -90° (sisi timur) hingga 90° (sisi barat). Sedangkan sisi jauh bagian timur yang merupakan sebagian citra STEREO-A/EUVI 195 berada di posisi bujur -175° hingga -90° . Karena tidak adanya data STEREO-B, area bujur 90° hingga 175° tidak dapat dibuat petanya. Kecerlangan peta penuh juga telah disesuaikan agar dapat ditampilkan dengan kontras yang lebih alami (Gambar 2 atas). Selain itu, dihasilkan juga citra mandiri dari EUVI 195 dan AIA 193

² <https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/pub/beacon/ahead/secchi/img>

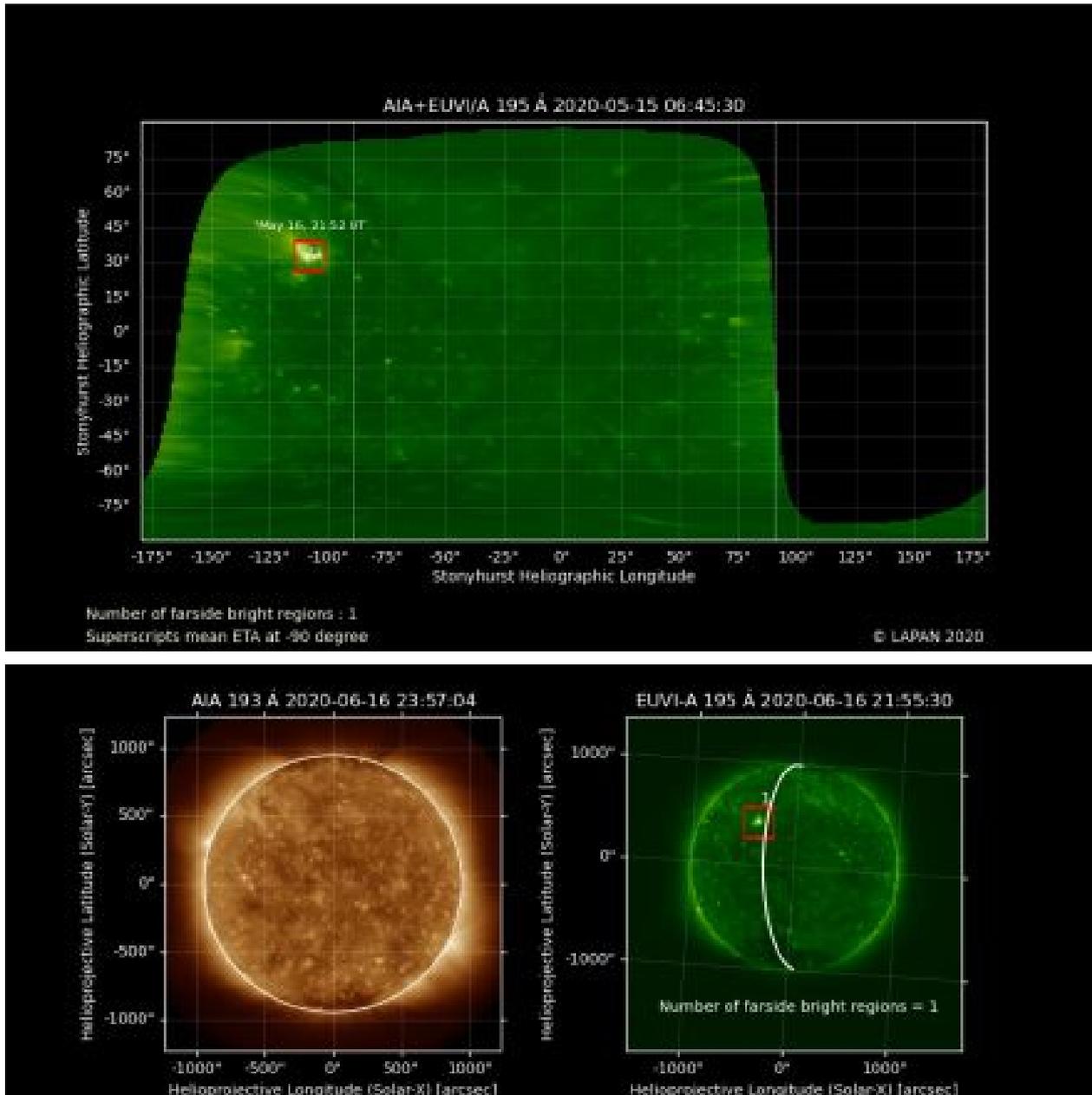
³ <http://sdo.oma.be/latest/data/0193>

⁴

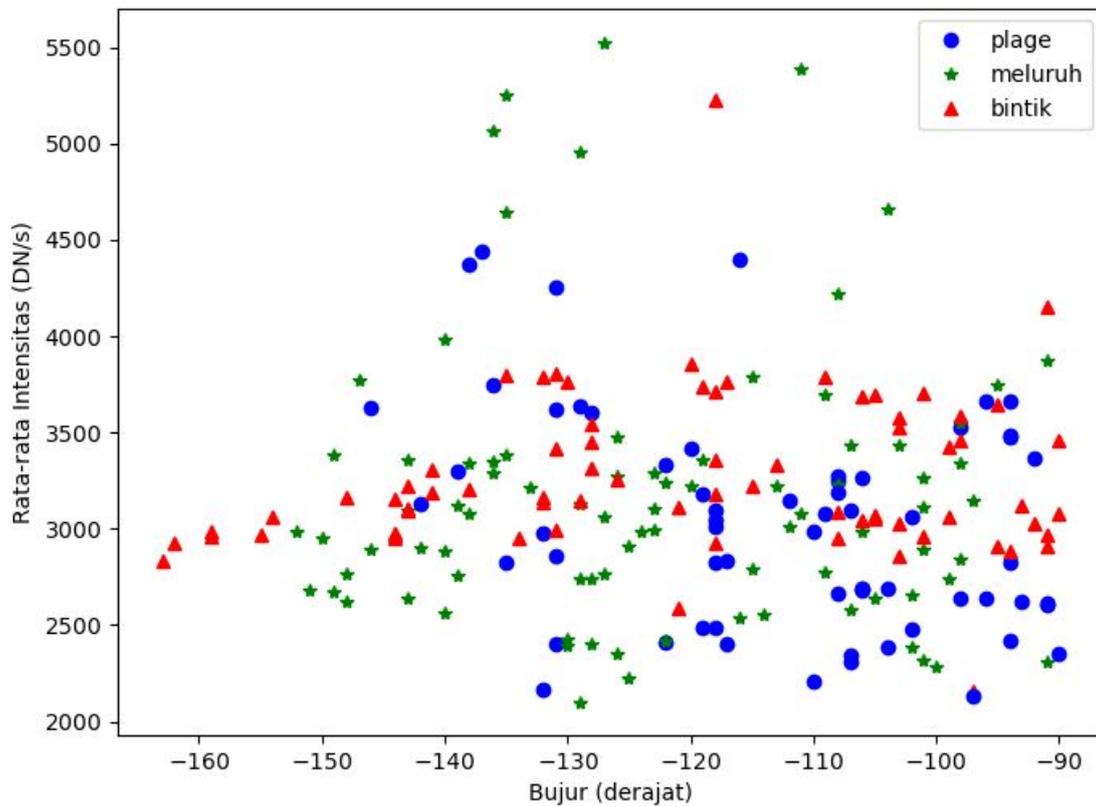
<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-region-summary>



Gambar 1. Diagram alur proses deteksi daerah terang sisi jauh hingga dihasilkan informasi posisi, intensitas dan waktu tiba di tepi timur.



Gambar 2. Peta gabungan dari citra EUVI dan AIA yang ditampilkan dalam koordinat heliografik (atas). Citra AIA (kiri bawah) dan EUVI (kanan bawah) dalam koordinat *helioprojective*. Garis putih pada citra EUVI menunjukkan tepi timur Matahari dilihat dari Bumi berdasarkan citra AIA.



Gambar 3. Sebaran data rata-rata intensitas 31 daerah terang yang terdeteksi di sisi jauh selama Mei-Oktober 2020.

193. Pada citra EUVI, terdapat garis batas tepi citra AIA agar lebih mudah dipahami (Gambar 2 kanan bawah).

Penentuan kriteria nilai ambang batas intensitas daerah terang serta parameter σ (proses *masking* dan *filtering*) dilakukan secara *trial and error*. Setelah melakukan beberapa kali percobaan, kami menemukan bahwa nilai ambang batas dan nilai parameter σ yang sesuai adalah 5000 DN/s dan 4. Dengan nilai-nilai tersebut dapat dipastikan yang terdeteksi adalah daerah terang dan bukan derau.

Kotak merah pada Gambar 2 atas dan Gambar 2 kanan bawah merepresentasikan daerah terang yang sama di sisi jauh, bersumber dari data yang sama tetapi berbeda sudut pandang. Kotak tersebut dibuat secara otomatis oleh program sebagai hasil dari proses *masking* dan *filtering* untuk daerah terang di posisi bujur -160° hingga -75° . Ukuran kotak merah selalu konstan dan sama untuk semua daerah terang yang terdeteksi serta tidak berubah terhadap waktu. Kotak ini ditampilkan untuk sekedar memandu dalam menemukan daerah terang yang berpotensi menjadi daerah aktif saat tiba di sisi dekat.

Proses *monitoring* masih sulit dilakukan saat daerah terang berada di -90° karena faktor kelengkungan permukaan Matahari. Oleh karena itu, kami melakukan *monitoring* daerah terang hingga bujur -75° . Meskipun begitu, data yang kami olah dalam penelitian ini hanya sampai maksimal -90° .

Penentuan daerah terang menjadi bintik atau tidak, dilakukan dengan membandingkan posisi lintang daerah terang dengan lintang bintik dari data harian daerah aktif dari SWPC dengan toleransi kesalahan 2 derajat. Hasilnya, selama Mei-Oktober 2020 program otomatis kami mendeteksi 31 daerah terang di sisi jauh. Sebanyak tujuh belas daerah terang telah meluruh sebelum sampai di bujur -90° , tujuh menjadi *plage* dan tujuh muncul sebagai bintik saat sudah berada di sisi dekat. Sebaran data rata-rata intensitas daerah terang yang terdeteksi ditunjukkan oleh Gambar 3. Hasil ini berbeda dengan Liewer *et al.* (2017). Program mereka mendeteksi 22 daerah terang di sisi jauh dan 95%-nya menjadi bintik saat tiba di sisi dekat. Mereka menggunakan data tahun 2011-2012 atau saat fase siklus matahari maksimum, sedangkan penelitian ini menggunakan data tahun 2020 (saat fase

siklus matahari minimum). Hal ini mengindikasikan bahwa daerah terang yang muncul saat fase minimum akan mudah meluruh sebelum muncul di tepi timur piringan Matahari dibandingkan saat fase maksimum.

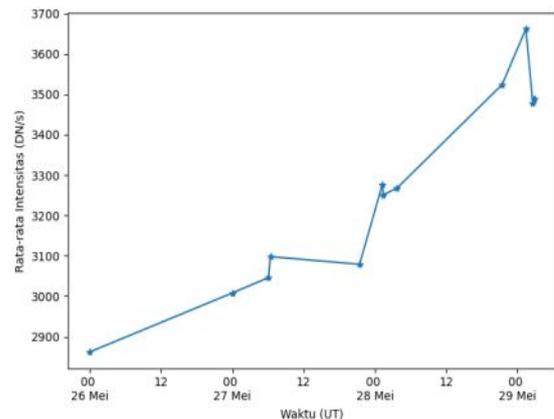
Pada Gambar 3 terlihat bahwa daerah terang yang meluruh sebelum sampai di -90° mempunyai data rata-rata intensitas dengan rentang nilai terlebar. Hal ini dipertegas dengan simpangan bakunya yang bernilai paling besar (Tabel 1). Daerah terang yang menjadi bintik mempunyai nilai simpangan baku paling kecil yaitu 418,6 DN/s. Nilai rata-rata keseluruhan intensitas daerah terang yang menjadi *plage*, bintik, atau meluruh dapat dilihat pada Tabel 3.1. Meskipun daerah terang yang menjadi bintik mempunyai rata-rata yang paling tinggi, namun hanya lebih tinggi sekitar 200 DN/s dan 100 DN/s dari rata-rata daerah terang yang menjadi *plage* dan meluruh. Perbedaan ini masih di dalam rentang simpangan baku daerah terang yang menjadi bintik. Padahal kami berharap ada perbedaan yang cukup signifikan (minimal sama dengan nilai simpangan baku daerah terang yang menjadi bintik) sehingga nilai rata-rata intensitas dapat kami gunakan untuk memprediksi kemunculan bintik dari daerah terang.

Terdapat kejadian menarik pada awal siklus matahari ke-25 ini, yaitu *flare* kelas C9,3 dan M1,1 yang terjadi di sisi dekat tepi timur. Sumbernya adalah *plage* tanggal 29 Mei 2020 pada posisi bujur -92° dan lintang 34° . *Plage* ini memiliki rata-rata intensitas daerah terang sebesar 3253,25 DN/s dan cenderung mengalami peningkatan intensitas seiring dengan semakin dekat dengan tepi timur (Gambar 4). Nilai tersebut juga berada di atas rata-rata intensitas daerah terang yang menjadi *plage*. Pada tanggal 27 Mei 2020, perhitungan estimasi kemunculan *plage* ini di bujur -90° adalah tanggal 29 Mei 2020 pukul 12:26 UT. Hasil ini hampir sesuai dengan waktu kenyataan daerah tersebut muncul di tepi timur yaitu tanggal 29 Mei 2020 pukul 13:00 UT.

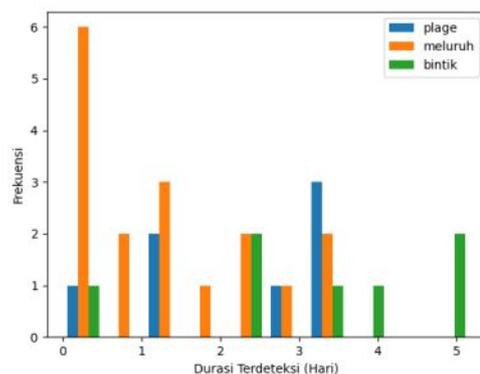
Perbedaan nilai rata-rata intensitas memang tidak terlalu signifikan antara yang meluruh, menjadi *plage* atau menjadi bintik. Akan tetapi lebih dari 80% daerah terang di sisi jauh yang menjadi bintik dipastikan sudah terdeteksi 2 hari dan bertahan paling lama hingga 5 hari sebelum sampai di bujur -90° (Gambar 5). Sedangkan daerah terang yang menjadi *plage* atau meluruh sebelum

Tabel 1. Rata-rata dan simpangan baku rata-rata intensitas daerah terang.

Kategori Daerah Terang	Rata-rata (DN/s)	Simpangan Baku (DN/s)
<i>Plage</i>	3022,5	563,7
Meluruh	3169,7	722,7
Bintik	3271,6	418,6



Gambar 4. Evolusi intensitas daerah terang yang terdeteksi pada akhir Mei 2020 dan menghasilkan *flare* kelas M. Daerah terang ini pada awalnya terdeteksi sebagai *plage* di tepi timur dan beberapa hari kemudian menjadi daerah aktif NOAA 12764.



Gambar 5. Histogram durasi terdeteksinya daerah terang yang menjadi *plage*, meluruh dan menjadi bintik.

sampai sisi dekat tepi timur terdeteksi paling lama 3 hari dan sebagian besar terdeteksi kurang dari itu.

Jika data pada Gambar 5 dirata-ratakan, daerah terang yang menjadi bintik mempunyai rata-rata durasi terdeteksi 3,1 hari. Sedangkan daerah terang yang tidak

menjadi bintik mempunyai rata-rata durasi terdeteksi 1,6 hari.

4. Kesimpulan

Selama kurun waktu enam bulan pada awal siklus ke-25, program deteksi otomatis kami telah mendeteksi 31 daerah terang di sisi jauh. Namun kurang dari 25% daerah terang tersebut dapat menjadi bintik saat sampai di tepi timur. Sisanya lebih banyak menjadi *plage* atau telah meluruh sebelum menjadi bintik. Hal ini kemungkinan karena Matahari sedang ada di awal siklus yang tidak terlalu kuat aktivitas magnetiknya sehingga daerah terang yang muncul mudah meluruh kembali atau hanya menjadi *plage*.

Daerah terang yang menjadi bintik mempunyai rata-rata durasi terdeteksi 2 kali lebih lama dari daerah terang yang tidak menjadi bintik. Hal ini mempertegas bahwa bintik mempunyai konsentrasi medan magnet yang kuat sehingga dapat mempertahankan daerah terang lebih lama. Namun kekuatan medan magnet tidak berkorelasi positif dengan besarnya intensitas daerah terang. Hal ini terbukti dari rata-rata intensitas daerah terang yang menjadi bintik hanya sekitar 100 DN/s lebih tinggi dibandingkan dengan yang meluruh kembali dan 18 DN/s lebih rendah dari intensitas rata-rata *plage* yang menghasilkan *flare* M.

Kemunculan daerah aktif di sisi timur masih sulit diidentifikasi hanya dengan nilai rata-rata intensitas daerah terang di sisi jauh. Hal ini dikarenakan perbedaan rata-rata intensitas daerah terang yang menjadi bintik dan tidak menjadi bintik masih di bawah nilai simpangan baku daerah terang yang menjadi bintik. Hal ini membuat penentuan nilai ambang batas (*threshold*) yang jelas antara daerah terang yang akan menjadi bintik dan tidak menjadi bintik menjadi sulit. Diperlukan adanya informasi tambahan mengenai kuat medan magnet yang sampai saat ini masih belum dapat diamati secara langsung kecuali dengan menggunakan metode seismik. Meskipun demikian, secara umum daerah terang yang menjadi bintik memiliki nilai intensitas rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan daerah terang yang tidak menjadi bintik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim SDO/AIA dan STEREO/EUVI yang telah menyediakan datanya secara

terbuka untuk penelitian ini. Penelitian ini dilakukan menggunakan 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.

Makalah ini telah melalui proses *blind review* yang dimoderasi oleh Fitra Nuraeni, M. Si. selaku editor.

Pernyataan Kontribusi

MZN dan JM merupakan kontributor utama. MZN merancang penelitian, melakukan pengolahan data dan analisis, serta menulis sebagian besar makalah. JM melakukan analisis dan perbaikan makalah. SS, RK dan ADP membantu di penulisan dan perbaikan makalah.

Daftar Rujukan

- Braun, D. C., Lindsey, C. (2001). Seismic Imaging of the Far Hemisphere of the Sun. *The Astrophysical Journal Letters*, 560, L189.
- Doschek, G. A., Warren, H. P., Harra, L. K., Culhane, J. L., Watanabe, T., Hara, H. (2018). Photospheric and Coronal Abundances in an X8.3 Class Limb Flare. *The Astrophysical Journal*, 853, 178.
- Emslie, A. G., Dennis, B. R., Shih, A. Y., Chamberlin, P. C., Mewaldt, R. A., Moore, C. S., Share, G. H., Vourlidas, A., Welsch, B. T. (2012). Global energetics of thirty-eight large solar eruptive events. *The Astrophysical Journal*, 759, 71.
- Gburek, S., Sylwester, J., Sylwester, B., Dennis, B. R., Phillips, K. J. H. (2005). Multi-wavelength study of a strong impulsive solar limb flare on 2002 August 3. *Advances in Space Research*, 35, 1728.
- Gold, T., Hoyle, F. (1960). On the Origin of Solar Flares. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 120, 89-105.
- Harvey, J. W., Hill, F., Hubbard, R. P., Kennedy, J. R., Leibacher, J. W., et al. (1996). The Global Oscillation Network Group (GONG) Project. *Science*, 272 272-1284.
- Hernandez-Perez, A., Su, Y., Veronig, A. M., Thalmann, J., Gömöry, P., Joshi, B. (2019). Pre-eruption Processes: Heating, Particle Acceleration, and the

- Formation of a Hot Channel before the 2012 October 20 M9.0 Limb Flare. *The Astrophysical Journal*, 874, 122.
- Howard, R.A., Moses, J. D., Vourlidas, A., Newmark, J. S., Socker, D. G., *et al.* (2008). Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI). *Space Science Reviews*, 136, 67.
- Howard, R., Harvey, J. (1970). Spectroscopic Determinations of Solar Rotation. *Solar Physics*, 12, 23-51.
- Hudson, H. S. (2011). Global Properties of Solar Flares. *Space Science Reviews*, 158, 5-41.
- Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., St. Cyr, O. C., Guhathakurta, M., Christian, E. (2008). The STEREO Mission: An Introduction. *Space Science Reviews*, 136, 5-16.
- Karlicky, M., Chen, B., Gary, D. E., Kasparova, J., Rybak, J. (2020). Drifting Pulsation Structure at the Very Beginning of the 2017 September 10 Limb Flare. *The Astrophysical Journal*, 889, 72.
- Liewer, P. C., Qiu, J., Lindsey, C. (2017). Comparison of Helioseismic Far-Side Active Region Detections with STEREO Far-Side EUV Observations of Solar Activity. *Solar Physics*, 292, 146.
- Lindsey, C., Braun, D. C. (2000). Seismic Images of the Far Side of the Sun. *Science*, 287, 1799.
- Mumford, S. J., Christe, S., Pérez-Suárez, D., Ireland, J., Shih, A. Y., *et al.* (2015). SunPy—Python for Solar Physics, *Computational Science & Discovery*, 8.
- Parker, E. N. (1963). The Solar-Flare Phenomenon and the Theory of Reconnection and Annihilation of Magnetic Fields. *The Astrophysical Journal Supplement*, 8, 177.
- Scherrer, P.H., Bogart, R. S., Bush, R. I., Hoeksema, J. T., Kosovichev, A. G., The MDI Engineering Team. (1995). The Solar Oscillations Investigation - Michelson Doppler Imager. *Solar Physics*, 162, 129-188.
- Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Wachter, R., Couvidat, S., *et al.* (2012). Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, 275, 229-259.
- Thompson, W. T. (2006). Coordinate System for Solar Image Data. *Astronomy & Astrophysics*, 449, 791-803.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., *et al.* (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261.