

HUBUNGAN DAN PERIODISITAS LUAS LUBANG KORONA MATAHARI TERHADAP KECEPATAN ANGIN MATAHARI DAN AKTIVITAS GEOMAGNET (RELATIONSHIP AND PERIODICITY OF SOLAR CORONAL HOLE AREA WITH THE SOLAR WIND SPEED AND GEOMAGNETIC ACTIVITY)

Tiar Dani^{1*}, Rhorom Priyatikanto¹, Anton Winarko¹, Gerhana Puannandra Putri²

¹ Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

²Balai Pengamatan Atmosfer dan Antariksa Sumedang, LAPAN

*e-mail: tiar.dani@lapan.go.id

Diterima 16 April 2019; Direvisi 29 April 2019; Disetujui 18 September 2019

ABSTRACT

Space weather disturbances during solar minimum are more dominantly caused by the appearance of the coronal hole on the sun. In this paper, we developed a tool called DeLuNa to detect and calculate the geoeffective coronal hole area based on 19.3 nm images from the Atmospheric Imaging Assembly instrument on Solar Dynamics Observatory (SDO/AIA193). We used the results from DeLuNa during 2016-2018 to conduct cross-correlation (cc) and wavelet analysis with the solar wind speed and Dst index. We found that an increase in the coronal hole area will cause solar wind speed to increase 3.17 days later (cc = 0.65) and Dst index to decrease 3.58 days later (cc = -0.35), whereas the decrease in the Dst index will reach a minimum in 2 hours after the start of the solar wind speed enhancement (cc = -0.59). Wavelet analysis found short-term periodicities of 27, 13.5 and 7-9 days. The observed periodicities show that changes in solar wind speed and geomagnetic storm during the minimum of solar activity are more dominantly caused by the geoeffective coronal hole total area.

Keywords: *coronal hole area, solar wind speed, Dst index, cross-correlation, wavelet analysis*

ABSTRAK

Gangguan cuaca antariksa selama aktivitas Matahari minimum lebih dominan disebabkan oleh munculnya lubang korona di Matahari. Dalam makalah ini, kami mengembangkan perangkat lunak yang disebut DeLuNa untuk mendeteksi dan menghitung luas lubang korona yang bersifat geoeftif berdasarkan citra dari satelit *Solar Dynamics Observatory* (SDO) menggunakan instrumen *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) pada panjang gelombang 19,3 nm (SDO/AIA193). Hasil dari DeLuNa tahun 2016-2018 digunakan untuk analisis korelasi-silang (*cross-correlation*, cc) dan analisis *wavelet* terhadap kecepatan angin Matahari dan indeks Dst. Kami menemukan bahwa peningkatan luas lubang korona akan menyebabkan peningkatan kecepatan angin Matahari pada 3,17 hari kemudian (cc = 0,65) dan indeks Dst akan mencapai nilai minimumnya pada 3,58 hari kemudian (cc = -0,35). Sementara itu, indeks Dst akan mencapai nilai minimumnya dalam waktu 2 jam setelah dimulainya peningkatan kecepatan angin Matahari (cc = -0,59). Analisis *wavelet* menghasilkan periodisitas jangka pendek untuk luas lubang korona, kecepatan angin Matahari, dan indeks Dst, yaitu 27, 13,5, dan 7-9 hari. Periodisitas yang muncul menunjukkan bahwa perubahan dalam kecepatan angin Matahari dan badai geomagnet selama aktivitas Matahari minimum lebih dominan disebabkan oleh luas total lubang korona yang bersifat geoeftif.

Kata kunci: *luas lubang korona, kecepatan angin Matahari, indeks Dst, korelasi-silang, analisis wavelet*

1 PENDAHULUAN

Saat ini, siklus aktivitas Matahari ke-24 sedang menuju minimum ditandai dengan semakin sedikitnya bintik Matahari yang muncul di permukaan Matahari. Bahkan siklus Matahari ke-24 hingga saat ini memiliki jumlah 817 hari tanpa bintik Matahari (SILSO, 2019). Meskipun makin banyak hari tanpa bintik Matahari selama siklus Matahari berlangsung, bukan berarti ancaman gangguan cuaca antariksa terhadap lingkungan antariksa di sekitar Bumi akibat aktivitas Matahari makin rendah. Sumber gangguan lain dari aktivitas Matahari selain *flare* dan lontaran massa korona (CME) adalah kemunculan lubang korona.

Lubang korona merupakan daerah di korona Matahari yang terlihat lebih gelap karena memiliki temperatur dan densitas plasma lebih rendah dibandingkan dengan lingkungan di sekelilingnya. Lubang korona bersifat dinamis dan selalu mengalami perubahan (Freedman dan Kaufmann, 2008). Lubang korona juga berasosiasi dengan medan magnet yang terbuka (Huang *et al.*, 2017) sehingga adanya lubang korona di Matahari menyebabkan peningkatan kecepatan angin Matahari hingga dua kali lipat dari kecepatan normalnya. Angin Matahari ini dapat terlepas ke ruang antarplanet saat bergerak mengikuti garis-garis medan magnet yang terbuka dan melewati daerah lubang korona, diikuti dengan lepasnya partikel energi tinggi di kromosfer Matahari.

Bravo *et al.* (1998) menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara bilangan bintik Matahari yang merupakan indikator kuat lemahnya siklus Matahari, dengan luas lubang korona di setiap siklus. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa saat aktivitas Matahari minimum, ditandai dengan sedikitnya jumlah bintik Matahari, lubang korona akan menjadi sumber utama gangguan cuaca antariksa. Begitupun sebaliknya, saat aktivitas

Matahari maksimum yang ditandai dengan banyaknya jumlah bintik Matahari yang berpeluang menghasilkan *flare* dan CME, akan menjadikan bintik Matahari sebagai sumber utama gangguan cuaca antariksa. Lepasnya partikel energi tinggi disertai dengan meningkatnya kecepatan angin Matahari di ruang antarplanet akan memberikan dampak gangguan cuaca antariksa ke lingkungan di sekitar Bumi, salah satunya berupa gangguan di lapisan magnetosfer Bumi.

Beberapa studi telah dilakukan untuk memahami dampak keberadaan lubang korona terhadap lingkungan di sekitar Bumi. Nolte *et al.* (1976) mempelajari 3 lubang korona yang muncul beberapa kali di piringan Matahari dan menyimpulkan bahwa luas lubang korona berkorelasi baik terhadap kecepatan angin Matahari (*cross-correlation*, $cc = 0,96$). Abramenko *et al.* (2009) menganalisis 44 lubang korona yang teramati tahun 2001-2006 dan mendapatkan kesimpulan yang selaras ($cc = 0,75$). Rotter *et al.* (2012) berfokus pada kemunculan lubang korona pada tahun 2005 (fase menurun aktivitas Matahari) dan mengaitkannya dengan beberapa parameter angin Matahari. Mereka mendapatkan korelasi (cc) tertinggi antara luas potongan lubang korona dan kecepatan angin Matahari pada radius orbit Bumi sebesar 0,76. Parameter lain seperti temperatur, kerapatan, dan medan magnet juga berkorelasi cukup baik. Kemudian, Verbanac *et al.* (2010) mempelajari hubungan antara luas potongan lubang korona yang teramati tahun 2005 dan parameter gangguan geomagnet (Ap dan Dst). Mereka mendapatkan bahwa area lubang korona lebih berkorelasi dengan Ap dibandingkan dengan indeks Dst.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara peningkatan luas lubang korona di Matahari dengan peningkatan kecepatan angin Matahari yang teramati di titik *Lagrangian* 1 (L1) dan adanya gangguan

terhadap geomagnet melalui analisis *cross-correlation* dan analisis *wavelet*. Penelitian ini difokuskan pada saat aktivitas Matahari minimum (2016-2018) selama era SDO. Dipilihnya periode minimum tersebut dapat meminimalkan pengaruh aktivitas Matahari dari *flare* dan CME sehingga pengaruh lubang korona dapat terlihat lebih jelas terhadap angin Matahari dan aktivitas geomagnet. Selain itu, analisis pada domain waktu dengan resolusi temporal yang cukup tinggi menjadi nilai lebih dibandingkan studi-studi sebelumnya.

2 METODOLOGI

2.1 Data

Data citra SDO (Pesnell *et al.*, 2012) pada instrumen AIA193 (Lemen *et al.*, 2012) tahun 2016–2018 diperoleh dari <https://sdo.gsfc.nasa.gov> dengan resolusi citra 512×512 piksel dan resolusi temporal 12 menit. Citra yang dianalisis memiliki resolusi lebih rendah dibandingkan dengan citra asli yang berukuran 4096×4096 piksel. Namun, citra dengan resolusi tersebut dinilai cukup untuk mendeteksi lubang korona yang tergolong sebagai struktur skala besar di atmosfer Matahari.

Data level 2 rata-rata jam-an kecepatan angin Matahari (vSW) di titik L1 diperoleh dari pengamatan satelit ACE (Stone *et al.*, 1998) menggunakan instrumen *Solar Wind Electron Proton and Alpha Monitor* (SWEPAM) (McComas *et al.*, 1999) selama tahun 2016–2018 (http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_SWEPAM.html). Data level 2 telah mengalami pemrosesan meliputi penerapan data kalibrasi dan peta respons detektor, pengorganisasian data menjadi energi dan waktu yang sesuai, dan transformasi data vektor ke dalam sistem koordinat yang sesuai. Data level 2 dikhususkan untuk studi yang bersifat saintifik.

Data provisional jam-an aktivitas geomagnet berupa indeks Dst geomagnet ekuatorial diperoleh dari World Data Center Kyoto selama tahun 2016–2018

(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>) dalam bentuk format IAGA2002 (Nose *et al.*, 2015).

2.2 Metode Penelitian

Data citra SDO/AIA193 diolah dengan menggunakan perangkat DeLuNa untuk memperoleh luas lubang korona yang bersifat geoeftif (GCH) di lintang heliografis $\pm 30^\circ$ dan bujur -15° hingga 70° . Luas lubang korona dinyatakan dalam satuan persen (%) terhadap luas total piringan Matahari (100%). Metode DeLuNa untuk mendeteksi lubang korona akan dijelaskan di bagian selanjutnya.

Analisis *cross-correlation* (cc) digunakan untuk melihat kesamaan sinyal dari dua sumber yang berbeda, relatif terhadap satu sama lain. Analisis cc dilakukan dengan memanfaatkan *tool time-series analysis* dari PAST (Paleontological Statistics) (Hammer *et al.*, 1999) untuk menghitung waktu tunda dan korelasi antara GCH terhadap vSW, GCH terhadap indeks Dst, dan vSW terhadap indeks Dst selama tahun 2016-2018. Persamaan cc dalam PAST menggunakan rujukan dari Davis (1986).

Analisis *wavelet* digunakan untuk menentukan periode dominan dari data *time-series* dan juga untuk mengetahui waktu kemunculan periode tersebut. *Wavelet* Morlet dilakukan menggunakan metode analisis *wavelet* dari Torrence dan Compo (1998) dalam Bahasa pemrograman Python untuk mengetahui periodisitas dari GCH, vSW dan indeks Dst selama tahun 2016-2018.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 DeLuNa versi 1.1

DeLuNa merupakan perangkat lunak yang mendeteksi keberadaan lubang korona berdasarkan citra dari SDO/AIA193. Versi 1.1 memiliki kemampuan untuk mendeteksi dan menghitung luas lubang korona yang bersifat geoeftif. Metode DeLuNa pada dasarnya menggunakan teknik *thresholding* dan segmentasi citra

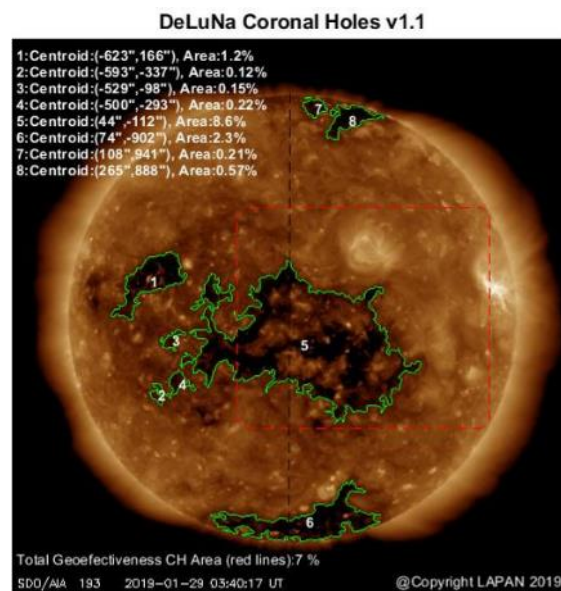
berdasarkan intensitas yang teramati. Pendekatan ini banyak digunakan dalam identifikasi dan karakterisasi lubang korona (Krista dan Gallagher, 2009; Verbanac *et al.*, 2010; Lemen *et al.*, 2012; Rotter *et al.*, 2012; dan Garton *et al.*, 2018).

Citra RGB dengan resolusi 512×512 piksel dari pengamatan SDO/AIA193 diubah menjadi *grayscale* (0-255) untuk kemudian dipilih area yang berwarna hitam dengan teknik *thresholding* (nilai *grayscale* < 35). Rotter *et al.* (2012) memperoleh nilai *threshold* sebesar 25 ± 5 untuk citra dari satelit *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) menggunakan instrumen *Extreme ultraviolet Imaging Telescope* pada panjang gelombang 19,5 nm (EIT195). Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan nilai *threshold* kami yang menggunakan satelit SDO karena adanya perbedaan resolusi temporal dan spasial. SDO/AIA193 memiliki resolusi tertinggi 4096×4096 piksel yang diambil setiap 12 detik sedangkan SOHO/EIT memiliki resolusi tertinggi 1024×1024 piksel dengan citra diambil setiap 12 menit.

Hasil seleksi area dengan *thresholding* yang berwarna hitam tersebut kemudian diubah menjadi gambar biner dengan area lubang korona berwarna putih. Langkah selanjutnya adalah melakukan seleksi dengan cara *cropping* area lubang korona yang bersifat geoeftif. Lubang korona dianggap geoeftif ketika berada di antara 30° lintang selatan dan 30° lintang utara serta 15° bujur timur dan 75° bujur barat dalam koordinat Stonyhurst (Thompson, 2006). Langkah selanjutnya adalah melakukan *overlay* terhadap citra asli untuk menunjukkan area lubang korona yang terdeteksi, dengan memberikan garis warna hijau disertai informasi titik *centroid* dan luas lubang korona dalam bentuk persentase terhadap luas lingkaran Matahari. Luas yang dimaksud adalah luas lubang korona yang terproyeksi di bidang langit.

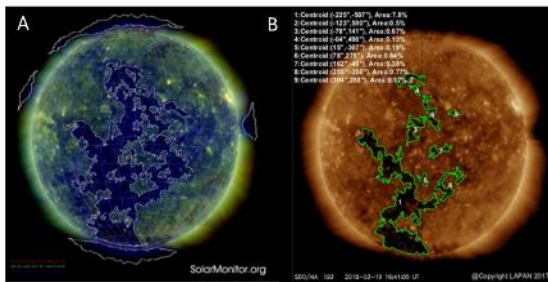
Proses de-proyeksi yang memperhitungkan posisi dari lubang korona tidak dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa faktor proyeksi mempertegas geoeftifitas dari lubang korona yang teramati di Bumi. Sebagai perbandingan, Verbanac *et al.* (2010) hanya menganalisis lubang korona yang berada 10° di sekitar garis meridian tengah Matahari, sedangkan Rotter *et al.* (2012) menggunakan batasan lebih sempit, yakni $\pm 7,5^\circ$ dari garis meridian tengah. Diketahui bahwa angin Matahari mengalir sepanjang spiral Parker (Parker, 1958) sehingga lokasi lubang korona dibelahan barat hemisfer Matahari akan lebih efektif memberikan dampak ke Bumi.

Hal yang penting adalah citra SDO/AIA193 yang dapat diolah menggunakan DeLuNa hanya terbatas pada citra yang memiliki resolusi 512×512 piksel dan harus berada di tengah *frame* sesuai *default* dari sumber data SDO.



Gambar 3-1: Fitur DeLuNa mampu menghitung luas lubang korona yang dapat memberikan dampak ke Bumi (geoeftif) ditandai dengan garis kotak putus-putus berwarna merah dan tertulis di bagian kiri bawah. (Citra dari NASA/SDO dan tim sains AIA).

Gambar 3-1 menunjukkan deteksi DeLuNa terhadap citra SDO/AIA193 pada tanggal 29 Januari 2019. Pada citra tersebut, DeLuNa mendeteksi 8 lokasi *centroid* lubang korona beserta luasnya dalam persen. Luas lubang korona yang bersifat geoeftif berada pada kotak merah bergaris putus-putus dan memiliki luas total lubang korona sebesar 7% dari luas total piringan Matahari.



Gambar 3-2: Perbandingan deteksi lubang korona dari CHIMERA (A) dan DeLuNa (B).

Gambar 3-2 menunjukkan perbandingan hasil deteksi dari CHIMERA (Garton *et al.*, 2018) dan DeLuNa untuk pengamatan Matahari pada tanggal 19 Maret 2018. CHIMERA menggunakan algoritma segmentasi berdasarkan deteksi emisi multitermal dari citra hasil pengamatan SDO menggunakan instrumen AIA171, AIA193, dan AIA211. Terlihat bahwa terdapat perbedaan luas lubang korona yang terdeteksi karena penggunaan sumber citra yang berbeda.

3.2 Luas GCH

Perolehan data citra SDO/AIA193 dalam 1 bulan rata-rata terdapat maksimal 2973 citra, dengan total citra dalam setahun sebanyak 33.880 (jika data lengkap). Perhitungan luas GCH tidak dapat dilakukan ketika (1) citra tidak berada tepat di tengah gambar, (2) satelit SDO tidak merekam citra karena mengalami *sun outage* pada saat ekuinoks (Maret dan September), (3) arah utara-selatan citra yang tidak tepat, atau (4) terjadi transit objek lain (Bulan, Venus, Merkurius). Untuk mengolah

citra yang banyak tersebut, diperlukan otomatisasi pengolahan citra dan penyimpanan hasil perhitungan dalam bentuk fail. Oleh karena itu, DeLuNa dimodifikasi agar mampu melakukan perhitungan seluruh citra secara langsung dan menyimpan hasilnya ke dalam fail. Proses pengolahan data 1 bulan citra SDO/AIA193 memerlukan waktu sekitar 30 menit tergantung pada kekuatan komputasi dari komputer yang digunakan. Contoh hasil keluaran dari DeLuNa berupa data tahun, bulan, tanggal, jam, menit, detik, dan luas GCH ditampilkan pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1. CONTOH HASIL KELUARAN DeLuNa.

Tanggal	GCH area
20170601_001029	0.55
20170601_002541	0.55
20170601_004053	0.57
20170601_005605	0.56
20170601_011141	0.56
20170601_012517	0.54
20170601_014041	0.53
20170601_015543	0.54
20170601_021041	0.53
20170601_022605	0.52

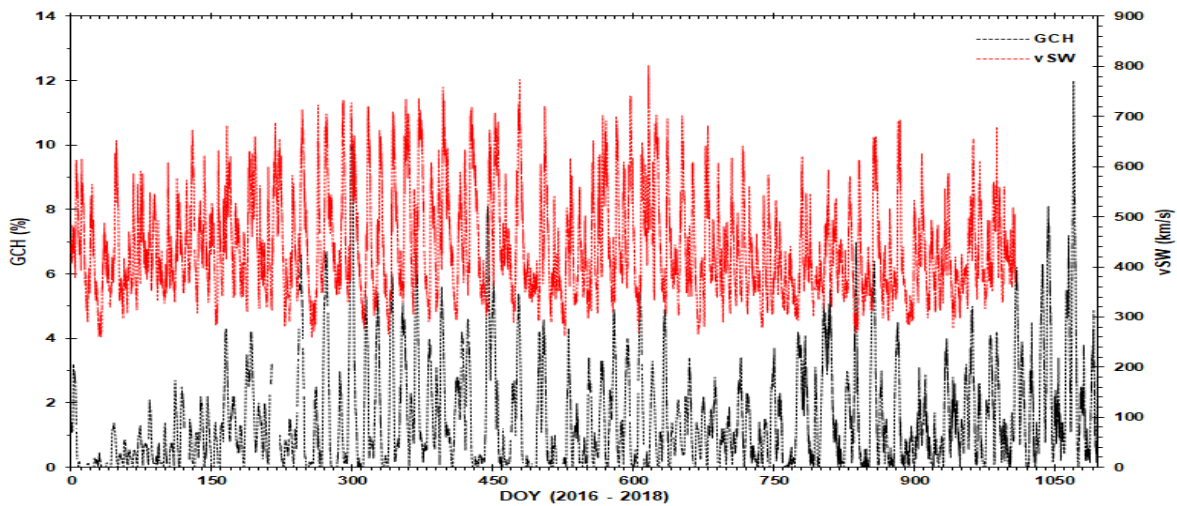
Gambar 3-3 menunjukkan plot luas lubang korona yang bersifat geoeftif (GCH) dan kecepatan angin Matahari (vSW) selama tahun 2016-2018. Terlihat bahwa perubahan luas GCH memiliki pola *sinusoidal* dengan luas terbesar dapat mencapai sekitar 12% dari total luas keseluruhan piringan Matahari seperti yang terlihat pada data di akhir tahun 2018. Pola *sinusoidal* ini sesuai dengan Heinemann *et al.* (2018) yang menyebutkan adanya 3 fase perubahan lubang korona, yaitu fase tumbuh, fase maksimum, dan fase meluruh. Terlihat pula adanya penurunan luas/kemunculan lubang korona pada awal tahun 2016. Hal ini terjadi karena kemunculan lubang korona akan semakin sedikit saat mendekati dengan puncak siklus aktivitas Matahari. NOAA menyatakan

bahwa puncak siklus aktivitas Matahari ke-24 telah mencapai maksimumnya pada April 2014 dengan nilai bilangan bintik Matahari sebesar 82 sehingga dapat dinyatakan bahwa awal tahun 2016 masih dekat dengan puncak siklus aktivitas Matahari dan kemunculan lubang korona masih sedikit.

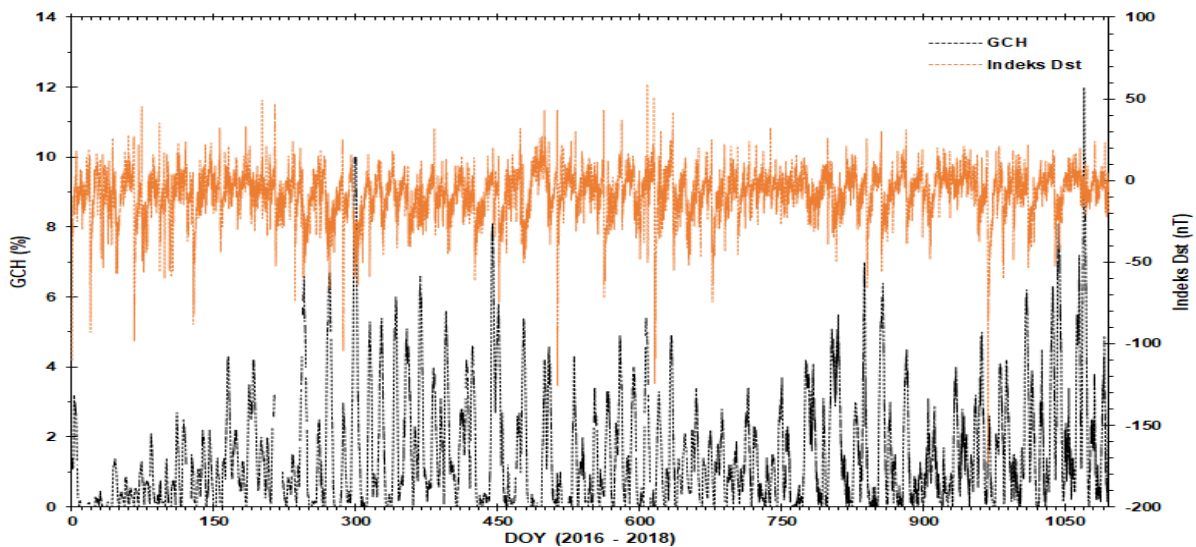
Pola *sinusoidal* yang terlihat di kedua data tersebut dengan puncak-puncak yang agak bergeser menandakan adanya waktu tunda (*lag*) yang terjadi. Waktu tunda terlihat saat GCH mencapai puncak, diikuti dengan vSW mencapai puncak beberapa waktu kemudian. Untuk lebih menjelaskan seberapa besar waktu tunda yang terjadi, dilakukan

analisis korelasi silang yang dibahas pada bagian selanjutnya.

Gambar 3-4 menunjukkan plot GCH (warna hitam) dan indeks Dst (warna oranye) selama tahun 2016-2018. Terlihat keduanya memiliki pola *sinusoidal* dan terdapat pergeseran/waktu tunda antara puncak-puncak dari GCH dan indeks Dst. Untuk lebih memastikan seberapa besar waktu tunda, perlu dilakukan analisis *cross-correlation* terhadap dua data tersebut. Dari plot indeks Dst pada Gambar 3-3 terdapat 3 kali kejadian badai geomagnet yang memiliki nilai < -100 nT, sedangkan nilai indeks Dst selama tahun 2016-2018 rata-rata minimum pada -50 nT.



Gambar 3-3: Plot GCH (hitam) dari hasil DeLuNa dan vSW dari satelit ACE (merah) selama tahun 2016-2018.

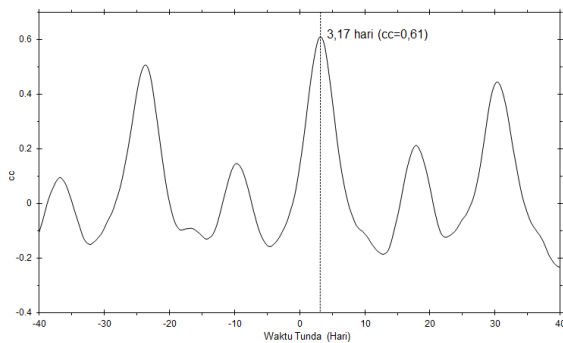


Gambar 3-4: Plot GCH (hitam) dari hasil DeLuNa dan indeks Dst dari WDC Kyoto (oranye) selama tahun 2016-2018.

3.3 Analisis Korelasi Silang

3.3.1 GCH terhadap vSW

Gambar 3-5 menunjukkan waktu tunda dari luas GCH terhadap vSW. Korelasi positif tertinggi ($cc = 0,61$) berada pada waktu tunda 3,17 hari. Korelasi positif menunjukkan bahwa peningkatan luas GCH akan diiringi dengan peningkatan vSW dalam waktu sekitar 3,17 hari atau 78,08 jam kemudian. Hasil ini hampir sama dengan yang diperoleh Rotter *et al.* (2012) dengan nilai waktu tunda 3,5 hari menggunakan data DOY 25-70 tahun 2005. Rotter *et al.* (2014) yang menggunakan rentang data lebih panjang (2011-2013) juga memperoleh nilai waktu tunda $4,02 \pm 0,5$ hari.



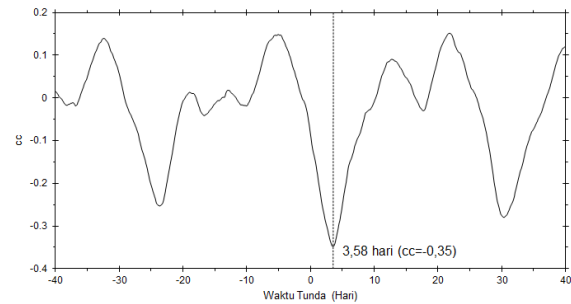
Gambar 3-5: Korelasi silang GCH terhadap vSW diperoleh waktu tunda 3,17 hari dengan $cc = 0,65$.

Gambar 3-5 juga memperlihatkan adanya beberapa puncak lokal di sekitar ± 14 hari dan ± 27 hari. Puncak tersebut muncul karena beberapa lubang korona dapat bertahan hingga beberapa kali rotasi Matahari.

3.3.2 GCH terhadap Indeks Dst

Gambar 3-6 menunjukkan waktu tunda luas GCH terhadap indeks Dst. Korelasi negatif tertinggi ($cc = -0,35$) berada pada waktu tunda 3,58 hari. Vršnak *et al.* (2007) menemukan pula bahwa kejadian badai geomagnet ditandai dengan penurunan indeks Dst yang akan mencapai minimumnya dalam waktu 3,8 hari sejak lubang korona melewati meridian Matahari. Korelasi

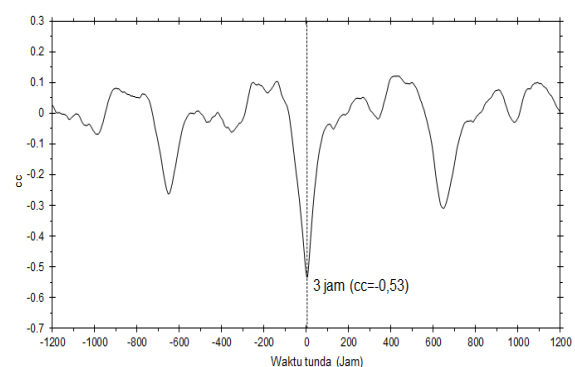
negatif menunjukkan peningkatan luas GCH akan diiringi dengan penurunan indeks Dst dalam waktu sekitar 3,58 hari atau 85,92 jam kemudian.



Gambar 3-6: Korelasi silang GCH terhadap indeks Dst diperoleh waktu tunda 3,58 hari dengan $cc = -0,35$.

3.3.3 vSW terhadap Indeks Dst

Gambar 3-7 menunjukkan waktu tunda vSW terhadap indeks Dst. Korelasi negatif tertinggi ($cc = -0,53$) memiliki nilai waktu tunda 3 jam. Hal ini berarti peningkatan kecepatan angin Matahari akan diiringi dengan penurunan indeks Dst dalam waktu sekitar 3 jam kemudian, sementara Verbanac *et al.* (2010) mendapatkan waktu tunda 0,00 hari. Mereka juga menggunakan kombinasi parameter kecepatan angin Matahari (V) dengan medan magnet (B) dan mendapatkan nilai waktu tunda sebesar 0,25 dan 0,50 hari. Perlu diketahui bahwa resolusi temporal dari data yang digunakan adalah 0,25 hari.



Gambar 3-7: Cross-correlation vSW terhadap indeks Dst diperoleh waktu tunda 3 jam dengan $cc = -0,53$.

3.4 Analisis Wavelet

Gambar 3-8 menunjukkan hasil analisis *wavelet* dalam bentuk *Wavelet Power Spectrum* (WPS) dan *Global Wavelet Spectrum* (GWS) untuk GCH selama tahun 2016-2018. Terlihat bahwa GCH memiliki periodisitas 9, 13,5, dan 27 hari. Periodisitas 9 hari (DOY 1000) terlihat sangat lemah. Hal ini juga ditemukan oleh Temmer *et al.* (2007) yang menyebutkan adanya frekuensi harmonik dari rotasi Matahari yang lebih tinggi akibat adanya distribusi longitudinal lubang korona secara berkala dan berulang dalam beberapa kali rotasi Matahari. Untuk periodisitas 13,5 hari yang muncul pada sekitar DOY 300 dan DOY 580, masih menurut Temmer *et al.*, (2007), hanya terjadi saat fase Matahari minimum yang disebabkan oleh makin meningkatnya luas dan jumlah CH di piringan Matahari. Citra SDO/AIA193 pada DOY 300 dan DOY 580 memperlihatkan lubang korona yang cukup besar dan memanjang secara latitudinal. Perlu diingat bahwa lubang korona merupakan kontributor utama munculnya *High-Speed Stream* (HSS) akibat meningkatnya kecepatan angin Matahari. Periodisitas 27 harian terlihat sangat kuat, terutama pada DOY 410-460, dan terkait erat dengan rotasi harian Matahari. Pada DOY 410-460, terlihat lokasi lubang korona pada citra SDO/AIA193 memiliki panjang longitudinal yang sangat lebar.

Gambar 3-9 menunjukkan hasil analisis *wavelet* dalam bentuk WPS dan GWS untuk data vSW selama tahun 2016-2018. Terlihat bahwa vSW memiliki periodisitas 9, 13,5, dan 27 hari. Periodisitas 9 hari terlihat sangat lemah, muncul di sekitar DOY 600 yang merupakan $\frac{1}{4}$ rotasi Matahari pada vSW. Menurut Verma (2001), periodisitas 9 hari tersebut diduga merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mengumpulkan energi bagi lubang korona untuk dapat menghasilkan HSS. Periodisitas 13,5 dan 27 hari terlihat sangat kuat. Periodisitas 13,5 hari pada vSW yang muncul sangat

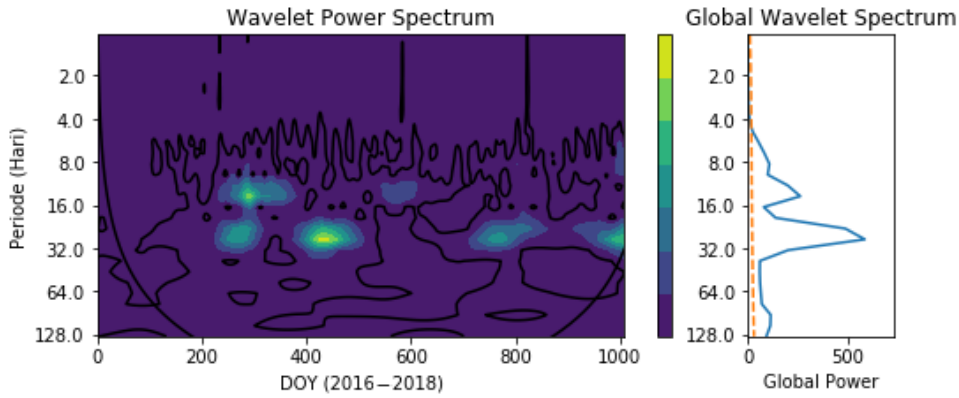
kuat pada DOY 300-360, terlihat lebih kuat dibandingkan dengan yang terlihat pada GCH. Jika meninjau dari pengamatan SDO/AIA193, terdapat lubang korona yang cukup besar memanjang secara latitudinal. Menurut Mursula dan Zieger (2004), periodisitas 13,5 hari di kecepatan angin Matahari yang teramati L1 disebabkan oleh adanya dua HSS dalam satu kali rotasi Matahari. Periodisitas 27 harian di sekitar DOY 400 yang diamati pada L1 masih terkait erat dengan pengaruh rotasi harian Matahari. Katsavrias *et al.*, (2012) menyebutkan bahwa periodisitas jangka pendek vSW memiliki nilai 9-14 (13,9), 15-25 dan 22-30 hari.

Gambar 3-10 menunjukkan hasil analisis *wavelet* dalam bentuk WPS dan GWS untuk indeks Dst selama tahun 2016-2018. Terlihat bahwa indeks Dst juga memiliki periodisitas 9, 13,5, dan 27 hari. Periodisitas 9 hari yang sangat lemah, muncul terutama di sekitar DOY 580 dan di beberapa DOY lain. Periodisitas 13,5 hari yang muncul cukup kuat di sekitar DOY 390 dan DOY 940 disebabkan adanya dua HSS dalam satu kali rotasi Matahari (Mursula dan Zieger, 2004). Periodisitas 27 harian pada indeks Dst yang sangat kuat muncul di sekitar DOY 480 dan diduga masih terkait dengan aktivitas dari lubang korona dan aktivitas angin Matahari. Muncul juga periode 64 hari pada DOY 900 yang tidak ada di GCH dan vSW. Katsavrias *et al.*, (2012) juga memperoleh bahwa periodisitas jangka pendek indeks Dst memiliki nilai 9-22 (13,9), 22-30 (27,8), dan 64-128 hari.

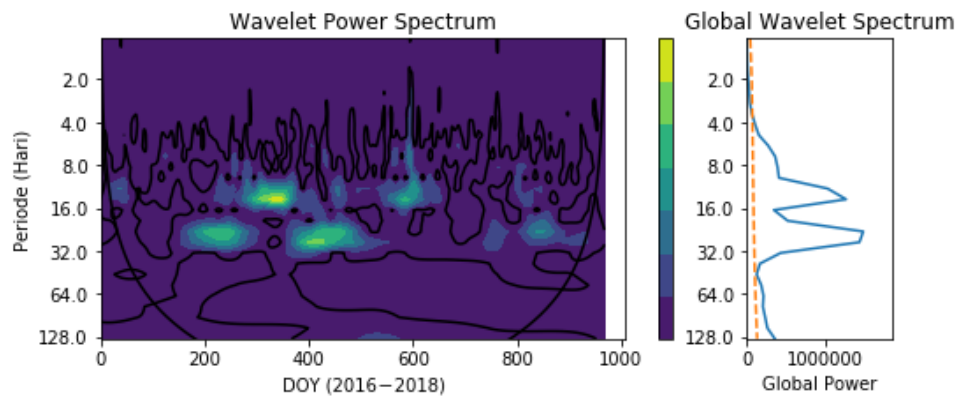
Dari ketiga analisis *wavelet* tersebut, kemunculan periodisitas terjadi pada DOY yang hampir bersamaan. Periodisitas 9 hari meskipun lemah, tetapi cukup tampak pada data GCH. Periodisitas 13,5 hari cukup kuat muncul pada parameter kecepatan angin Matahari meskipun melemah di indeks Dst. Hal ini menunjukkan, bahwa perubahan di korona Matahari, dalam hal ini munculnya lubang korona, tidak

memberikan hubungan yang langsung dengan indeks Dst. Selain itu, indeks Dst juga tidak hanya dipengaruhi oleh aliran angin Matahari dari lubang korona. Pengaruh lebih besar berasal dari arah orientasi medan magnet antarplanet terhadap medan magnet Bumi, yang

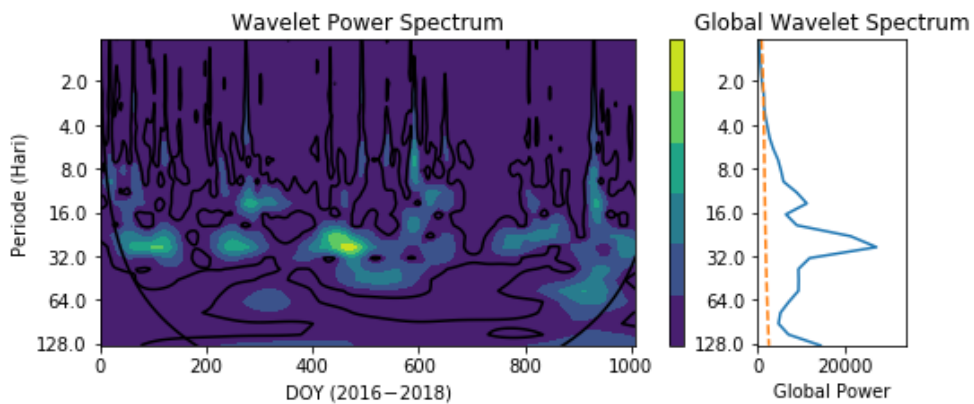
merupakan syarat masuknya partikel-partikel energi tinggi ke permukaan Bumi melalui kutub-kutub. Sementara itu, periodisitas 27 hari dari lubang korona muncul secara kuat di kecepatan angin Matahari dan indeks Dst.



Gambar 3-8: Plot WPS (kiri) dan GWS (kanan) dari luas area lubang korona yang bersifat geoeftif selama tahun 2016-2018.



Gambar 3-9: Plot WPS (kiri) dan GWS (kanan) dari kecepatan angin Matahari selama tahun 2016-2018.



Gambar 3-10: Plot WPS (kiri) dan GWS (kanan) dari indeks Dst selama tahun 2016-2018.

4. KESIMPULAN

DeLuNa telah digunakan untuk mendeteksi dan menghitung luas lubang korona yang bersifat geoeftif berdasarkan citra dari satelit *Solar Dynamics Observatory* (SDO) menggunakan instrumen *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) pada panjang gelombang 19,3 nm (SDO/AIA193).

Luas lubang korona hasil deteksi DeLuNa tahun 2016-2018 digunakan untuk melakukan analisis korelasi-silang (cc) dan analisis *wavelet* terhadap kecepatan angin Matahari dan indeks Dst.

Berdasarkan analisis *cross-correlation* diperoleh waktu tunda luas lubang korona terhadap kecepatan angin Matahari adalah 3,17 hari (cc = 0,65), dan terhadap indeks Dst adalah 3,58 hari (cc = -0,35). Sementara itu, waktu tunda kecepatan angin Matahari terhadap indeks Dst adalah 2 jam (cc = -0,59).

Berdasarkan analisis *wavelet* diperoleh periodisitas jangka pendek untuk luas lubang korona, kecepatan angin Matahari, dan indeks Dst, yaitu 27, 13,5, dan 7-9 hari dengan waktu kemunculan yang hampir sama. Periodisitas yang muncul menunjukkan bahwa perubahan dalam kecepatan angin Matahari dan indeks Dst selama aktivitas Matahari minimum lebih dominan disebabkan oleh luas total lubang koronal yang bersifat geoeftif. Selain itu, terdapat faktor orientasi arah medan magnet antarplanet terhadap medan magnet Bumi yang memengaruhi indeks Dst.

Nilai waktu tunda dan periodisitas dari GCH, vSW, dan indeks Dst dapat digunakan sebagai dasar untuk membuat model prediksi cuaca antariksa menggunakan *time-series machine learning*, terutama prediksi kecepatan angin Matahari dan indeks Dst berdasarkan perubahan kondisi lubang korona di Matahari. Nilai waktu tunda dapat dijadikan pijakan untuk waktu prediksi, sedangkan nilai periodisitas

sebagai pijakan banyaknya data dalam skala waktu untuk masukan dalam proses *machine learning*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NASA/SDO dan tim sains AIA yang menyediakan data citra pengamatan Matahari, tim ACE SWEPAM dan ACE Science Center yang menyediakan data kecepatan angin Matahari, tim WDC-Geomagnetisme-Kyoto untuk data indeks Dst, kode program *wavelet* berbasis Python disediakan oleh Evgeniya Predybaylo berdasarkan program dari Torrence dan Compo, (1998) yang tersedia di <http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>, perangkat PAST dari Hammer dan Harper yang tersedia di <https://folk.uio.no/ohammer/past/index.html>, dan Tim Redaksi Jurnal Sains Dirgantara dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

- Abramenko, V., V. Yurchyshyn, dan H. Watanabe, 2009. *Parameters of the Magnetic Flux Inside Coronal Holes*. *Sol Phys* 260:43–57. doi: 10.1007/s11207-009-9433-7.
- Bravo, S, J.A.L Cruz-Abeyro, dan D. Rojas, 1998. *The Spatial Relationship Between Active Regions and Coronal Holes and the Occurrence of Intense Geomagnetic Storms Throughout the Solar Activity Cycle*. *Ann Geophys* 16:49–54. doi: 10.1007/s00585-997-0049-7.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics & Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc, New York, pp 238–239.
- Freedman, R.A., dan W.J. Kaufmann, 2008. *III. Our Star, the Sun*. In: *8th Edition*. W. H. Freeman, New York, pp 419–420.
- Garton, T.M., P.T. Gallagher, dan S.A. Murray, 2018. *Automated Coronal Hole Identification via Multi-Thermal Intensity Segmentation*. *Sp Weather Sp Clim* 8:1–19. doi: 10.1051/swsc/2017039.
- Hammer, Ø, D.A.T. Harper, dan P.D. Ryan, 1999. *PAST: Paleontological Statistics*

- Software Package*. *Palaeontol Electron* 4:9. doi: 10.1016/j.bcp.2008.05.025.
- Heinemann S.G., M. Temmer, S.J. Hofmeister, A.M. Veronig, dan S. Vennerstrom, 2018. *Three-phase Evolution of a Coronal Hole. I. 360° Remote Sensing and In Situ Observations*. *Astrophys J* 861:151. doi: 10.3847/1538-4357/aac897.
- Huang, G.H., C.H. Lin, dan L.C. Lee, 2017. *Solar Open Flux Migration from Pole to Pole: Magnetic Field Reversal*. *Sci Rep* 7:1-7. doi: 10.1038/s41598-017-09862-2.
- Katsavrias, C., P. Preka-Papadema, dan X. Moussas, 2012. *Wavelet Analysis on Solar Wind Parameters and Geomagnetic Indices*. *Sol Phys* 280:623-640. doi: 10.1007/s11207-012-0078-6.
- Krista, L.D., dan P.T. Gallagher, 2009. *Automated Coronal Hole Detection Using Local Intensity Thresholding Techniques*. *Sol Phys* 256:87-100. doi: 10.1007/s11207-009-9357-2.
- Lemen, J.R., A.M. Title, D.J. Akin, et al., 2012. *The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Sol Dyn Obs* 9781461436:17-40. doi: 10.1007/978-1-4614-3673-7_3.
- McComas, D.J., S.J. Bame, P.L. Barker, D.M. Delapp, W.C. Feldman, J.T. Gosling, E. Santiago, R.M. Skoug, R.L. Tokar, P. Riley, J.L. Phillips, dan J.W. Griffe, 1998. *An Unusual Coronal Mass Ejection: First Solar Wind Electron, Proton, Alpha Monitor (SWEPAM) Results From The Advanced Composition Explorer*. *Geophys Res Lett* 25:4289-4292. doi: 10.1029/1998GL900174.
- Mursula, K., dan B. Zieger, 2004. *The 13.5-Day Periodicity in The Sun, Solar Wind, and Geomagnetic Activity: The Last Three Solar Cycles*. *J Geophys Res Sp Phys* 101:27077-27090. doi: 10.1029/96ja02470.
- Nolte, J.T., A.S. Krieger, A.F. Timothy, R.E. Gold, E.C. Roelof, G.Vaiana, A.J. Lazarus, J.D. Sullivan, dan P.S. McIntosh, 1976. *Coronal Holes as Sources of Solar Wind*. *Sol Phys* 46:303-322. doi: 10.1007/BF00149859.
- Nose, M., T. Iyemori, M. Sugiura, dan T. Kamei, 2015. *Geomagnetic Dst index. World Data Cent Geomagn Kyoto*. doi: doi:10.17593/14515-74000.
- Parker, E.N., 1958. *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields*. *Astrophys J* 128:664-676.
- Pesnell, W.D., B.J. Thompson, dan P.C. Chamberlin, 2012. *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*. *Sol Phys* 275:3-15. doi: 10.1007/s11207-011-9841-3.
- Rotter, T., A. Veronig, M. Temmer, dan B. Vrsnak, 2014. *Real-Time Solar Wind Forecasting Based on Coronal Hole Data*. 16:2014. doi: 10.1007/s11207-015-0680-5.
- Rotter, T., A.M. Veronig, M. Temmer, dan B. Vršnak, 2012. *Relation Between Coronal Hole Areas on the Sun and the Solar Wind Parameters at 1 AU*. *Sol Phys* 281:793-813. doi: 10.1007/s11207-012-0101-y.
- SILSO WDC, 2019. Spotless Days.
- Stone, E.C., A.M. Frandsen, R.A. Mewaldt, dan G. Space, 1998. *The Advanced Composition Explorer*. *Space Sci Rev* 86:1-22. doi: 10.1023/A:1005082526237.
- Temmer, M., B. Vršnak, dan A.M. Veronig, 2007. *Periodic Appearance of Coronal Holes and the Related Variation of Solar Wind Parameters*. *Sol Phys* 241:371-383. doi: 10.1007/s11207-007-0336-1.
- Thompson, W.T., 2006. *Coordinate Systems for Solar Image Data*. *Astron Astrophys* 449:791-803. doi: 10.1051/0004-6361:20054262.
- Torrence, C., dan G.P. Compo, 1998. *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bull Am Meteorol Soc* 79:61-78. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
- Verbanac, G., B. Vršnak, A. Veronig, dan M. Temmer, 2010. *Equatorial Coronal Holes, Solar Wind High-Speed Streams, and Their Geoeffectiveness*. *Astron Astrophys* 526:A20. doi: 10.1051/0004-6361/201014617.
- Verma, V.K., 2001. *On The Periodicity of High Speed Solar Wind Streams*. *Space Sci*

Rev 97:205–210. doi: 10.1023/
A:1011831707212.

Vršnak, B., M. Temmer, dan A.M. Veronig, 2007.
Coronal Holes and Solar Wind High-

*Speed Streams: II. Forecasting the
Geomagnetic Effects.* Sol Phys 240:331–
346. doi: 10.1007/s11207-007-0311-x.