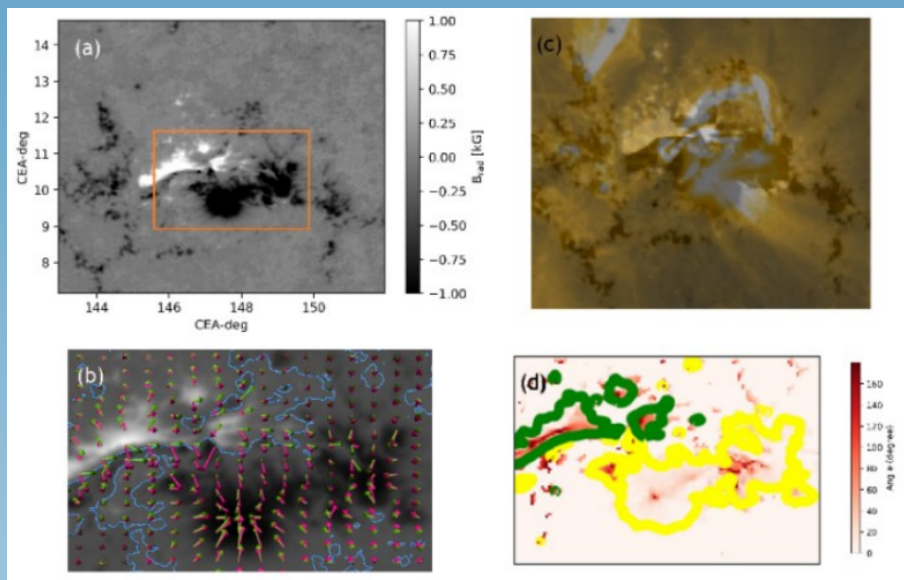


# JURNAL SAINS DIRGANTARA Journal of Aerospace Sciences

Vol. 17 No. 1 Desember 2019

P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015



Diterbitkan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jakarta – Indonesia

J. Si. Dirgant.

Vol. 17

No. 1

Hal. 0-60

Bandung, Desember 2019

ISSN 2597-7873

# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

**Vol. 17 No. 1 Desember 2019**

**P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873**

**Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015**

Jurnal Sains Dirgantara (JSD) berisi hasil penelitian, pengembangan, dan/atau pemikiran di bidang sains atmosfer dan antariksa. Jurnal ini terbit sejak tahun 2004 dan dipublikasikan dua kali dalam setahun (Juni dan Desember)

## **SUSUNAN DEWAN PENYUNTING JURNAL SAINS DIRGANTARA**

### **Ketua Editor**

Dr. Laras Tursilowati, M.Si.

### **Editor**

Dr. Trismidianto (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)  
Dr. Rhorom Priyatikanto (Astronomi dan Astrofisika)

### **Korektor Naskah**

Dr. Wiwiek Setyawati  
Tiin Sinatra, M.Si.  
Santi Sulistiani, M.Si.  
Siti Maryam, S.T.  
Ferdhiansyah Noor, S.Kom.

## **SUSUNAN SEKRETARIAT REDAKSI JURNAL SAINS DIRGANTARA**

### **Pemimpin Umum**

Drs. Afif Budiyo, M.T.

### **Pemimpin Redaksi Pelaksanaan**

Dra. Clara Yono Yatini, M.Sc.  
Ir. Halimurrahman, M.T.

### **Redaksi Pelaksana**

Amalia Nurlatifah, M.T.  
Devi Rafsanjani, S.Kom.

### **Penata Letak**

Anton Winarko, S.Si.  
Gammameridianti, S.Si.  
Amalia Nurlatifah, S.Si.

Berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor 818/E/2015 Jurnal Sains Dirgantara ditetapkan sebagai Majalah Berkala Ilmiah Terakreditasi.

Berdasarkan Keputusan Direktur Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kemenristekdikti RI Jurnal Sains Dirgantara ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah Terakreditasi Peringkat 2.

Gambar sampul: Analisis medan magnet daerah aktif NOAA 12017 tanggal 29 Maret 2019 pukul 17.00 UT (lihat Muhamad & Nurzaman, halaman 9).

### **Alamat Penerbit**

LAPAN Jl. Dr. Djundjuran No. 133 Bandung

Telepon: (022) 6012602

E-mail: [jsd@lapan.go.id](mailto:jsd@lapan.go.id)

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

[http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal\\_sains](http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_sains)

# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 17 No. 1 Desember 2019

P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

## **DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>PROBABILITAS CME BERDASARKAN PARAMETER MEDAN MAGNET UNIVARIAT</b> <i>(PROBABILITY OF CORONAL MASS EJECTION FROM UNIVARIATE MAGNETIC FIELD PARAMETERS)</i> Priyatikanto, R., Mumpuni, E. S., Dani, T., Mumtahana, F., Suryana, N.	1 - 8
<b>ANALISIS ARUS LISTRIK DAN MEDAN MAGNET PADA DAERAH AKTIF PENGHASIL FLARE NOAA 12017</b> <i>(ANALYSIS OF ELECTRIC CURRENT AND MAGNETIC FIELD IN THE FLARING ACTIVE REGION NOAA 12017)</i> Muhamad, J., Nurzaman, Z.	9 - 26
<b>HUBUNGAN DAN PERIODISITAS LUAS LUBANG KORONA MATAHARI TERHADAP KECEPATAN ANGIN MATAHARI DAN AKTIVITAS GEOMAGNET</b> <i>(RELATIONSHIP AND PERIODICITY OF SOLAR CORONAL HOLE AREA WITH THE SOLAR WIND SPEED AND GEOMAGNETIC ACTIVITY)</i> Dani, T., Priyatikanto, R., Winarko, A., Putri, G. P.	27 - 38
<b>ASTIGMATISMA TELESKOP 50 CM F/3,8 UNTUK OBSERVATORIUM NASIONAL TIMAU</b> <i>(ASTIGMATISM OF THE 50 CM F/3.8 FOR TIMAU NATIONAL OBSERVATORY)</i> Priyatikanto, R., Danarianto, M. D., Bumbungan, M. T., Saputra, M. B., Nurzaman, M. Z., Murti, M. D., Rohmah, F., Mumtahana, F., Legitawuri, D.	39 - 48
<b>ANLYSIS OF RAINFALL CONDITIONS OVER NUSA TENGGARA BARAT DURING ENSO EVENTS BASED ON TRMM DATA</b> <i>(ANALISIS KONDISI CURAH HUJAN DI NUSA TENGGARA BARAT SELAMA TERJADINYA ENSO BERDASARKAN DATA TRMM)</i> Nurlatifah, A., Wulandari, E. P.	49 - 60

# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

**Vol. 17 No. 1 Desember 2019**

**P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873**

**Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015**

## **DARI REDAKSI**

Sidang Pembaca yang kami hormati,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Jurnal Sains Dirgantara Vol. 17, No. 1, Desember 2019, hadir ke hadapan sidang pembaca dengan mengetengahkan 5 (lima) artikel dengan beragam bidang fokus. Pada terbitan kali ini, Priyatikanto *et al.* (halaman 1) membahas probabilitas lontaran massa korona berdasarkan parameter medan magnet daerah aktif. Kedua, Muhamad & Nurzaman (halaman 9) melaporkan hasil analisisnya terhadap daerah aktif penghasil flare NOAA 12017, khususnya terhadap parameter arus listrik dan kuat medan magnet. Selanjutnya, Dani *et al.* (halaman 27) memaparkan hubungan statistik serta hasil analisis periodisitas parameter luas lubang korona dan kecepatan angin surya serta aktivitas geomagnet. Terkait instrumentasi pengamatan astronomi, Priyatikanto *et al.* (halaman 39) menyajikan hasil pengukuran parameter astigmatisma teleskop optik berdiameter 50 cm yang akan dipasang di Observatorium Nasional Timau. Terakhir, Nurlatifah & Wulandari (halaman 49) membahas curah hujan di Nusa Tenggara selama kejadian ENSO. Studi tersebut didasarkan pada hasil pengamatan satelit TRMM.

Kami berterima kasih kepada sejumlah kolega yang berkenan menjadi mitra bestari yang berkenan melakukan telaah serta memberikan komentar/saran konstruktif terhadap makalah yang dikirimkan ke Jurnal Sains Dirgantara. Di antara mitra bestari tersebut adalah:

- Dr. Dhani Herdiwijaya (ITB)
- Prof. Dr. Eddy Hermawan (LAPAN)
- Dr. Emanuel S. Mumpuni (LAPAN)
- Dr. Hakim L. Malasan (ITB)
- Dr. Noersomadi (LAPAN)
- Prof. Dr. Taufiq Hidayat (ITB)

Terakhir, kami senantiasa mengundang sidang pembaca yang budiman untuk berpartisipasi aktif dengan mengirimkan karya tulis ilmiah yang sesuai dengan lingkup jurnal ini.

Demikian kami sampaikan, semoga sidang pembaca dapat mengambil manfaatnya.

Bandung, Mei 2020

# PROBABILITAS CME BERDASARKAN PARAMETER MEDAN MAGNET UNIVARIAT (PROBABILITY OF CORONAL MASS EJECTION FROM UNIVARIATE MAGNETIC FIELD PARAMETERS)

Rhorom Priyatikanto\*, Emanuel Sungging Mumpuni, Tiar Dani, Farahhati Mumtahana, Nana Suryana  
Pusat Sains Antariksa  
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Dr. Djundjuran no. 133 Bandung 40173  
\*e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 30 Agustus 2018; Direvisi 13 September 2019; Disetujui 13 September 2019

## ABSTRACT

Forecasting of flare occurrence and coronal mass ejection (CME) are necessary since those energetic phenomena can effectively influence the space weather on Earth. In this study, we analyzed four magnetic parameters of active region: (1) mean gradient of horizontal magnetic field (MEANGBH), (2) mean helicity (MEANJZH), (3) mean photospheric magnetic free energy (MEANPOT), and (4) mean gradient of total field (MEANGBT) and their potential usage for the input in CME prediction based on linear statistics. Obtained that among those four parameters, MEANGBT is the best parameter for the purpose mentioned. Active regions with  $MEANGBT \leq 96$  Gauss/Mm probably produce flare with CME and the True Skill Score for this prediction is ~20%. Even though this achieved score is considerably low, it is proportionally comparable to the other work.

Keywords: *coronal mass ejection, statistical probability, magnetic parameter, active region*

## ABSTRAK

Prediksi *flare* dan CME (*coronal mass ejection*, CME) perlu dilakukan mengingat kedua peristiwa energetik tersebut dapat mempengaruhi cuaca antariksa di Bumi secara efektif. Pada studi kali ini, kami menganalisis empat parameter magnet daerah aktif: (1) rerata gradien medan horizontal (MEANGBH), (2) rerata arus puntir (MEANJZH), (3) rerata gradien medan magnet total (MEANGBT), dan (4) rerata energi magnet bebas fotosfer (MEANPOT) serta potensinya sebagai input dalam prediksi CME berbasis statistik linier. Hasilnya, di antara keempat parameter tersebut, MEANGBT merupakan parameter terbaik untuk keperluan tersebut. Daerah aktif dengan  $MEANGBT \leq 96$  Gauss/Mm berpotensi menghasilkan *flare* yang disertai CME dan *True Skill Score* dari prediksi ini adalah ~20%. Meski masih tergolong rendah, skor yang didapatkan dapat disandingkan secara proporsional dengan hasil dari peneliti lain.

Kata kunci: *CME, probabilitas statistik, parameter magnet, daerah aktif*

## 1 PENDAHULUAN

CME (*coronal mass ejection*, CME) merupakan letupan dengan skala paling besar di seantero Tata Surya. Melalui kejadian ini, sejumlah plasma korona ( $10^8 - 10^{10}$  ton) lepas dari atmosfer Matahari dan bergerak ke ruang antarplanet dengan kecepatan hingga ~1000 km/s (Chen, 2011). CME banyak berkaitan dengan peningkatan fluks

partikel berenergi tinggi (*solar energetic particles*, SEP), terutama bila terjadi di barat piringan Matahari (Gopalswamy *et al.*, 2008). Aliran partikel semacam inilah yang menjadi ancaman potensial bagi aset antariksa sehingga kejadian CME dan SEP perlu diprakirakan dengan saksama.

Beberapa studi telah dilakukan untuk memprediksi kejadian CME

menggunakan sejumlah prediktor. Peredupan korona yang teramati pada jendela ultraviolet ekstrem dan terjadi beberapa jam sebelum CME dianggap sebagai salah satu prediktor. Secara statistik, 84% kejadian CME dapat dikaitkan dengan peredupan korona sebelumnya (Bewsher *et al.*, 2008). Statistik tersebut dapat dianggap signifikan karena hanya 58% di antaranya yang dapat dikaitkan dengan kejadian acak. Sistem deteksi peredupan korona telah dikembangkan untuk mendukung prediksi CME (Kraaikamp dan Verbeeck, 2015). CME juga dapat dikaitkan dengan *flare* kuat, meski tidak seluruh *flare* dahsyat disertai CME. Qahwaji *et al.* (2008) menggunakan jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*) untuk mempelajari keterkaitan antara *flare* dengan karakteristik tertentu (diparameterisasi oleh intensitas dan durasi *flare*) dan CME. Berikutnya, Bobra dan Ilonidis (2016) menggunakan parameter medan magnet daerah aktif untuk memperkirakan terjadinya CME. Pada studi tersebut, metode statistik nonlinier berbasis jaringan saraf tiruan kembali digunakan.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Bobra dan Ilonidis (2016), terdapat beberapa parameter magnet yang dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu *flare* kuat diikuti CME atau tidak. Empat parameter yang menempati peringkat teratas sebagai indikator CME adalah: (1) rerata gradien medan horisontal (MEANGBH), (2) rerata arus puntir (MEANJZH), (3) rerata gradien medan magnet total (MEANGBT), dan (4) rerata energi magnet bebas fotosfer (MEANPOT). Keempat parameter tersebut beserta 14 parameter lain dihitung berdasarkan citra Matahari yang dipotret *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) yang terpasang pada *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Tim ilmuwan SDO/HMI menghitung dan merilis parameter magnet tersebut sebagai

*Space-Weather HMI Active Region Patches* [SHARPs, Bobra *et al.*, 2014].

Pemanfaatan jaringan saraf tiruan dalam melakukan prediksi aktivitas Matahari memang sedang jamak dilakukan. Namun, jaringan saraf tiruan dapat dikatakan sebagai kotak hitam (*black box*) yang memberikan keluaran yang bersifat nonlinier dan terkadang kontraintuitif. Hal ini menjadi dorongan untuk menguji apakah statistik linier dari parameter magnet daerah aktif dapat digunakan untuk memprediksi kejadian CME yang menyertai *flare* kuat.

## 2 DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan dalam studi ini adalah 480 data SHARP (*Space-Weather HMI Active Region Patches*) dari daerah aktif yang menghasilkan *flare* sinar-X dengan fluks puncak lebih dari  $10^{-5}$  W/m<sup>2</sup> (kelas M1.0 atau lebih kuat) sejak Januari 2010 hingga Agustus 2017. Di antaranya, terdapat 410 data berasosiasi dengan *flare* tanpa CME serta 70 data yang berasosiasi dengan *flare* kuat yang disertai CME. Kelas pertama disebut sebagai kelas negatif (nonCME), sedangkan kelas kedua disebut kelas positif (CME). Data SHARP sendiri merupakan keluaran *pipeline* identifikasi otomatis daerah aktif berdasarkan data vektor medan magnet yang diperoleh menggunakan SDO/HMI. Terdapat 25 parameter magnet daerah aktif yang dapat dihitung berdasarkan data SHARP. Dari data SHARP yang tersedia, diambil nilai dari empat parameter magnet yang menjadi fokus telaah, yakni MEANGBH, MEANJZH, MEANPOT, dan MEANGBT. *Scatter plot* distribusi bivariat dari parameter magnet tersebut disajikan pada Gambar 2-1. Dalam plot tersebut, nilai dari setiap parameter telah ditransformasikan secara linier sehingga nilainya berada pada kisaran 0 dan 1. Tabel 2-1 merangkum nilai minimum dan maksimum yang digunakan dalam transformasi.

Tabel 2-1: NILAI MINIMUM DAN MAKSIMUM PARAMETER MAGNET YANG DIANALISIS.

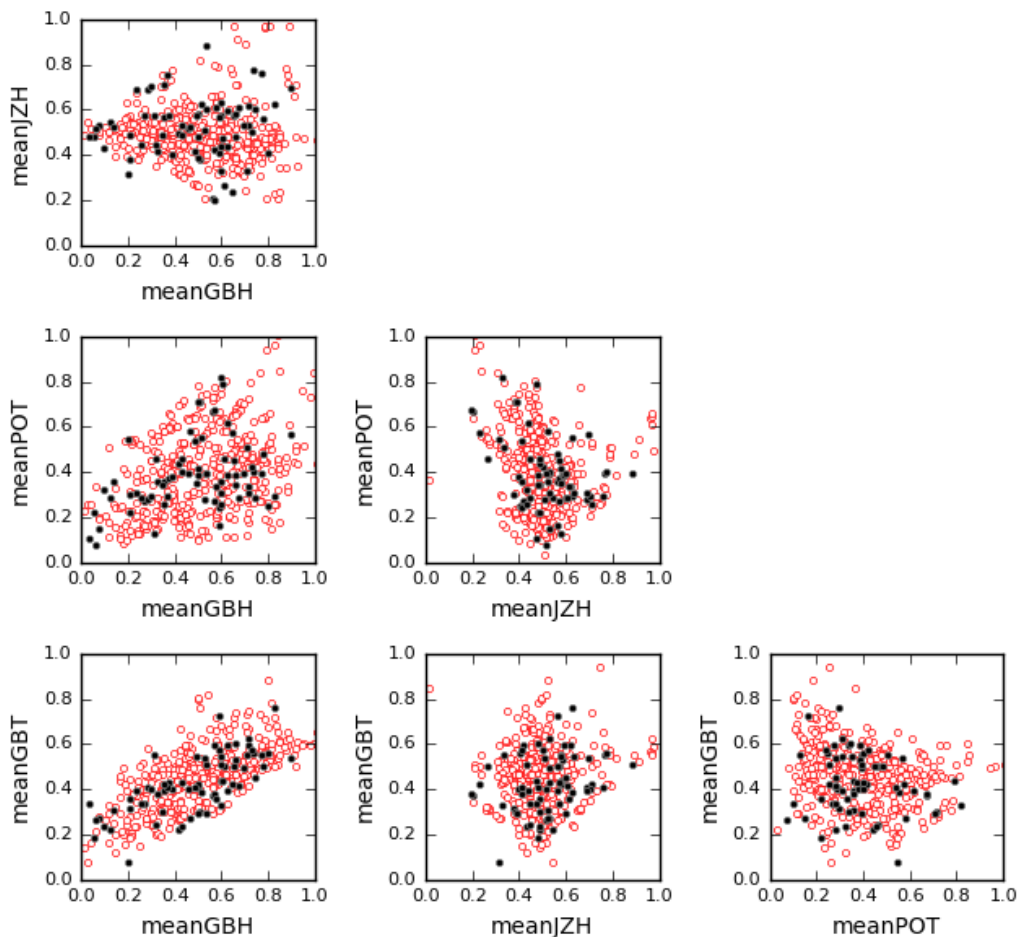
Parameter	Min	Maks	Satuan
MEANGBH	30	80	10 <sup>-6</sup> G/m
MEANJZH	-4,5	4,5	10 <sup>-2</sup> G <sup>2</sup> /m
MEANPOT	0	25	10 <sup>2</sup> J/m <sup>3</sup>
MEANGBT	50	145	10 <sup>-6</sup> G/m

Distribusi univariat dari setiap parameter tersebut akan ditelaah lebih lanjut. Perbandingan antara kelas positif dan negatif akan menjadi prinsip utama dari telaah yang dilakukan. Bila distribusi kelas positif terpisah dari

distribusi kelas negatif, parameter ini menjadi indikator kuat untuk prediksi CME. Sebaliknya, bila distribusi keduanya serupa dan berimpit, parameter tersebut kurang baik untuk dijadikan indikator.

Langkah pertama yang dilakukan adalah membangun *nonparametric probability density function* (PDF) menggunakan metode estimasi kerapatan kernel (*kernel density estimation*, KDE). Secara prinsip, KDE di titik  $x$  dari sebaran data  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  dihitung dengan persamaan berikut (Sheather, 2004):

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}\right] \dots\dots\dots (2-1)$$



Gambar 2-1: Plot distribusi bivariat pasangan parameter magnet daerah aktif yang menghasilkan *flare* ≥ M1.0 (lingkaran merah) serta yang menghasilkan *flare* ≥ M1.0 dan CME (lingkaran hitam).

Persamaan (2-1) menggunakan fungsi Gaussian sebagai fungsi kernel. Lebar kernel  $h$  menentukan tingkat kemulusan dari fungsi distribusi yang dihasilkan. Aturan Silvermann (1986),

$$h = 1,06\sigma^{-0,2} \dots\dots\dots (2-2)$$

digunakan untuk menghitung lebar kernel sebagai fungsi simpangan baku dari data ( $\sigma$ ).

Langkah berikutnya adalah menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov (KS) untuk membandingkan distribusi parameter untuk kelas positif dan negatif. Bila uji KS menunjukkan bahwa kedua kelas memiliki distribusi yang berbeda, terdapat kemungkinan untuk menghitung probabilitas CME berdasarkan fungsi distribusi yang telah dibangun. Dengan mengadopsi metode perhitungan probabilitas keanggotaan gugus bintang secara non-parametrik (misalnya Balaguer-Nunez *et al.*, 2007 dan Priyatikanto dan Arifyanto, 2015), probabilitas CME dinyatakan sebagai berikut:

$$PDF = \frac{\hat{f}_p}{\hat{f}_p + \hat{f}_n} \times 100\% \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan  $\hat{f}_p$  dan  $\hat{f}_n$  berturut-turut menyatakan fungsi kerapatan kelas positif dan negatif. Pada prinsipnya, probabilitas tersebut mengikuti definisi klasik bahwa probabilitas merupakan jumlah suatu kejadian dibagi dengan total kejadian yang mungkin.

Untuk menilai seberapa baik parameter MEANGBT dan MEANGBH dalam prediksi, dilakukan simulasi berdasarkan 480 kasus CME yang disebutkan sebelumnya. Dalam setiap tahap simulasi, digunakan nilai ambang spesifik sebagai penentu apakah daerah tersebut diprediksi akan menghasilkan CME atau tidak. Bila nilai parameter magnet suatu daerah aktif kurang dari atau sama dengan nilai ambang tersebut, daerah tersebut diprediksi akan menghasilkan CME dalam 24 jam (*CME-positive*). Sebaliknya, bila daerah tersebut memiliki nilai MEANGBT atau MEANGBH lebih tinggi maka dianggap

*CME-negative*. Selanjutnya, pada setiap nilai ambang dibuat tabel kontingensi untuk perhitungan skor prediksi.

Tabel 2-2: KONTINGENSI PREDIKSI DAN OBSERVASI YANG DIPAKAI UNTUK PERHITUNGAN SKOR PREDIKSI

		Observasi	
		Positif	Negatif
Prediksi	Positif	$a$ <i>hits</i>	$b$ <i>false alarms</i>
	Negatif	$c$ <i>misses</i>	$d$ <i>correct rejection</i>

Adapun skor yang digunakan meliputi *Percent Correctness (PC)*, *False Alarm Rate (FAR)*, *Probability of Detection (POD)*, *Probability of False Detection (POFD)*, serta *True Skill Score (TSS)*. Berikut adalah persamaan yang digunakan:

$$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \dots\dots\dots (2-1)$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \dots\dots\dots (2-2)$$

$$POD = \frac{a}{a+c} \dots\dots\dots (2-3)$$

$$POFD = \frac{b}{b+d} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$TSS = POD - POFD \dots\dots\dots (2-5)$$

dengan notasi yang dirangkum dalam Tabel 2-2. Skor ini biasa digunakan dalam verifikasi prediksi cuaca antariksa (misalnya Devos *et al.*, 2014; Crown, 2016).

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3-1 menyajikan fungsi distribusi nonparametrik yang dibangun berdasarkan parameter magnet daerah aktif penghasil *flare*  $\geq M1.0$ , baik yang disertai CME maupun tidak. Distribusi MEANGBH memiliki profil yang melebar/landai, berbedan dengan profil distribusi normal. PDF yang dikonstruksi dari sampel CME tidak jauh berbeda dibandingkan PDF dari sampel nonCME. Uji Kolmogorov-Smirnov menghasilkan nilai  $p = 68,1\%$ , jauh lebih besar dari

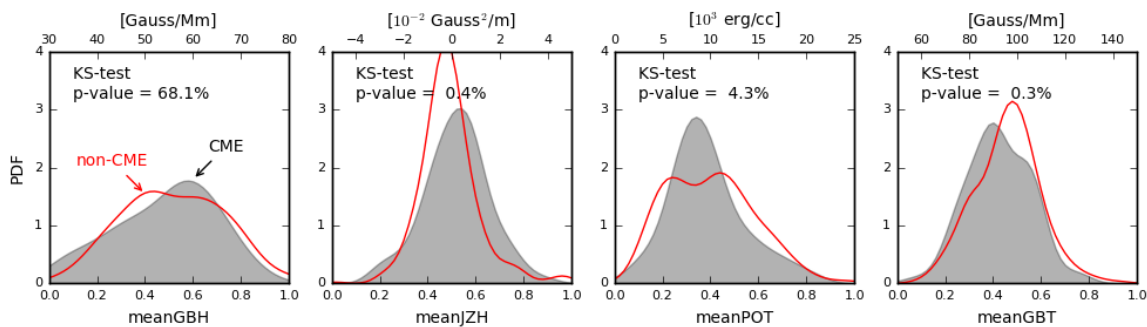


ambang 5% sehingga *null-hypotheses* bahwa kedua sampel memiliki distribusi yang serupa tidak dapat ditolak.

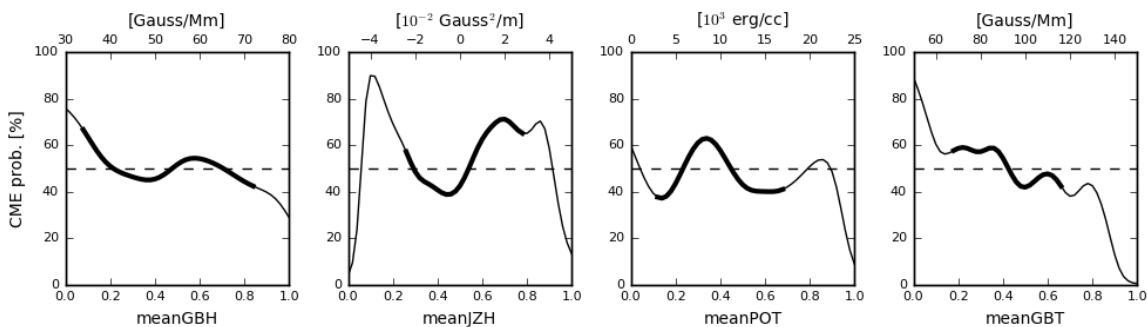
Parameter MEANJZH tampak memiliki distribusi yang simetris, tetapi puncak distribusi sampel CME tidak berimpit dengan puncak distribusi dari sampel nonCME. Uji KS memberikan hasil  $p = 0,4\%$  sehingga distribusi dari kedua sampel dapat dianggap memiliki perbedaan yang signifikan. Hal yang sama juga dapat diamati pada distribusi parameter MEANGBT. Untuk parameter ini, uji KS menghasilkan  $p = 0,3\%$ . Kemudian, uji KS yang dilakukan terhadap parameter MEANPOT menghasilkan  $p = 4,3\%$  sehingga distribusi sampel CME dan nonCME dapat dianggap berbeda dengan tingkat

keyakinan lebih dari 95%. Namun, tampak bahwa distribusi MEANPOT dari sampel nonCME memiliki ‘plato’.

Gambar 3-2 menampilkan plot probabilitas kejadian CME yang dihitung berdasarkan fungsi distribusi parameter magnet sampel daerah aktif. Mengacu pada Persamaan 2-3, probabilitas CME meningkat saat  $f_p > f_n$ . Probabilitas CME bernilai maksimum ketika distribusi dari sampel CME menyimpang jauh dari distribusi nonCME. Sebaliknya, bila distribusi yang dibangun dari kedua sampel memiliki profil yang serupa, probabilitas CME hanya berfluktuasi di sekitar nilai tengah 50%. Bila demikian, parameter magnet yang ditelaah kurang efektif untuk digunakan dalam prediksi kejadian CME.



Gambar 3-1: Fungsi distribusi probabilitas (PDF) dari empat parameter magnet yang menjadi fokus. Area kelabu adalah PDF dari kelas positif ( $f_p$ ), sedangkan garis merah merupakan PDF dari kelas negatif ( $f_n$ ). Hasil uji Kolmogorov-Smirnov juga dituliskan pada setiap panel.



Gambar 3-2: Probabilitas CME sebagai fungsi parameter magnet. Pada setiap panel, garis tebal menunjukkan probabilitas yang dihitung jika  $f_p \geq 0,5$ .

Bila diperhatikan, probabilitas nonparametrik yang dihitung berdasarkan distribusi parameter MEANGBH memiliki nilai berfluktuasi di sekitar 50%. Hal ini selaras dengan uji KS yang menunjukkan bahwa distribusi parameter dari sampel CME dan nonCME tidak menyimpang jauh. Sekilas, probabilitas CME memiliki kecenderungan menurun dengan bertambahnya nilai MEANGBH. Namun, perlu menjadi catatan bahwa probabilitas di ujung kiri dan kanan memiliki signifikansi statistik yang rendah karena dihitung berdasarkan  $f_p$  yang kecil.

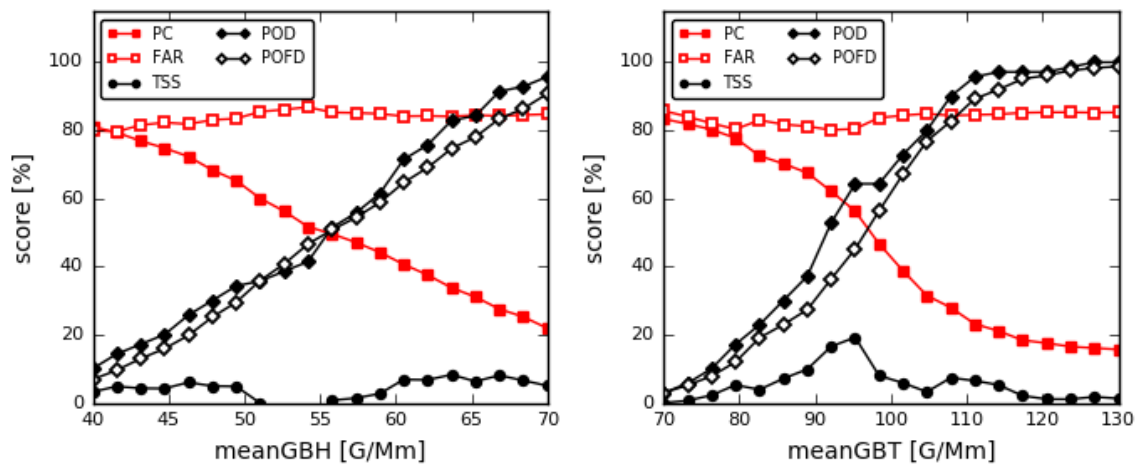
Tren menurun juga teramati lebih jelas pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANGBT. Merupakan hal yang wajar bila keduanya menunjukkan kecenderungan yang serupa mengingat parameter MEANGBH berkorelasi baik dengan MEANGBT ( $R^2 = 0,49$ ; lihat Gambar 2-1). Berdasarkan distribusi yang telah dikonstruksi, daerah aktif yang menghasilkan *flare* dan CME cenderung memiliki MEANGBT lebih rendah. Daerah aktif dengan MEANGBT < 100 Gauss/Mm memiliki probabilitas CME lebih dari 50%.

Tren positif/naik diharapkan teramati pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANJZH karena distribusi MEANJZH daerah aktif positif CME sedikit menyimpang ke kanan bila dibandingkan distribusi dari sampel nonCME (Gambar 3-1). Namun, karena distribusi parameter nonCME lebih curam dengan dispersi lebih kecil, maka probabilitas CME tampak berfluktuasi. Bila hanya mempertimbangkan  $f_p \geq 0,5$ , daerah aktif dengan MEANJZH positif Gauss<sup>2</sup>/m cenderung menghasilkan *flare* yang disertai CME. Namun, pernyataan ini tidak terlalu kuat. Fluktuasi yang lebih jelas tampak pada plot probabilitas CME sebagai fungsi MEANPOT. Tanpa dikombinasikan dengan parameter lain, parameter magnet ini tidak dapat digunakan sebagai indikator terjadinya CME.

Di antara keempat parameter yang ditelaah dalam studi ini, MEANGBT merupakan parameter dengan tren probabilitas yang paling jelas. Probabilitas CME menurun dengan bertambahnya nilai rerata gradien medan magnet total. Parameter MEANGBT tergolong parameter intensif karena merupakan nilai rerata yang tidak bergantung pada ukuran daerah aktif yang dibicarakan (Welsch *et al.*, 2009). Menurut Bobra dan Ilonidis (2016), parameter dengan peringkat tertinggi sebagai indikator CME tergolong parameter intensif. Namun, parameter intensif justru tidak signifikan dalam prediksi *flare* kuat (Bobra dan Couvidat, 2015).

Kedua parameter (MEANGBH dan MEANGBT) diperiksa lebih lanjut melalui simulasi untuk mengetahui potensi penggunaan parameter magnet tersebut untuk prediksi CME, dikuantisasi dengan skor yang telah disebutkan sebelumnya (Persamaan 2-1 hingga 2-5). Kelima skor tersebut dihitung untuk setiap nilai ambang yang digunakan. Nilai ambang MEANGBH berkisar antara 40 hingga 70 Gauss/Mm, sedangkan nilai ambang MEANGBT berkisar antara 70-130 Gauss/Mm.

Plot skor sebagai fungsi nilai ambang disajikan pada Gambar 3-3. Dari plot tersebut, terdapat pola yang sama untuk kedua parameter medan magnet. Pertama, nilai *PC* menurun dari 80% menjadi sekitar 20% seiring dengan membesarnya nilai ambang yang digunakan. Hal ini terjadi karena jumlah prediksi *true positive* (a) dan *true negative* (d) menurun. Di sisi lain, *FAR* yang merepresentasikan prediksi *false positive* cenderung konstan di sekitar 80%. Pola kedua adalah peningkatan *POD* dan *POFD* hingga hampir 100%. *POD* atau juga disebut *hit rate* menyatakan rasio prediksi tepat dan bernilai maksimum pada bagian kanan distribusi. Skor ini hanya berfokus pada kejadian CME positif. Sebaliknya, *POFD* berfokus pada CME negatif.



Gambar 3-3: Skor prediksi CME berdasarkan berbagai nilai ambang MEANGBH yang berkisar antara 40-70 Gauss/Mm dan nilai ambang MEANGBT yang berkisar antara 70-130 Gauss/Mm.

Skor terbaik yang dianggap mewakili kinerja metode prediksi adalah *TSS* yang merupakan kombinasi dari *POD* dan *POFD*. Semakin tinggi nilai *TSS* berarti semakin baik metode tersebut karena jumlah prediksi yang tinggi tidak banyak terkotori oleh jumlah prediksi yang tidak tepat. Untuk parameter MEANGBH, *TSS* bernilai < 10% dan bahkan bernilai netgatif untuk nilai ambang sekitar 53 Gauss/Mm. Dengan demikian, penggunaan parameter tunggal MEANGBH tidak cukup meyakinkan untuk prediksi CME.

Untuk parameter MEANGBT, *TSS* mencapai nilai maksimum ~20% ketika nilai ambang yang digunakan adalah 96 Gauss/Mm sehingga nilai ambang ini dapat digunakan sebagai prediktor CME. Bila suatu daerah aktif memiliki MEANGBT ≤ 96 Gauss/Mm, maka terdapat kemungkinan akan muncul CME dari daerah tersebut.

*True Skill Score* sebesar 20% bukan merupakan nilai yang memuaskan, tetapi dapat dianggap baik dan dapat disandingkan secara proporsional dengan pekerjaan lain. Bobra dan Ilonidis (2015) mendapatkan nilai *TSS* < 10% ketika metode machine learning diterapkan hanya pada 1 parameter magnet. Nilai *TSS* ~20% baru dicapai saat empat parameter magnet dipakai secara simultan untuk prediksi CME,

sedangkan nilai maksimum *TSS* sebesar ~80% dicapai ketika menggunakan lebih dari 10 parameter medan magnet sebagai input. Proses ini tentunya menuntut kerja komputasi luar biasa.

Identifikasi serta prediksi CME bergantung pada pengamatan lapisan korona dengan kerapatan dan temperatur tertentu. Penggunaan parameter SHARP atau magnetogram yang memotret medan magnet fotosfer merupakan langkah ekstrapolasi untuk menilai ketidakstabilan magnet yang dapat memicu CME. Tentu ada kesenjangan non-linier antara parameter di fotosfer dan kondisi di korona sehingga penggunaan parameter tunggal dalam prediksi hanya mampu mencapai skor tertinggi sebesar 20%. Selain itu, parameter langsung seperti MEANGBT dan MEANGBH lebih baik digunakan untuk prediksi *flare* dibandingkan parameter tidak langsung seperti MEANJZH dan MEANPOT. Komponen gerak dan medan magnet radial dapat berperan lebih baik dibandingkan komponen horizontal.

#### 4 KESIMPULAN

Pada studi ini, empat parameter medan magnet daerah aktif dianalisis secara statistik untuk mengetahui potensi penggunaan parameter tersebut untuk prediksi CME. Berdasarkan sampel yang terdiri 410 kasus *flare* ≥

M1.0 yang tidak disertai CME dan 70 kasus *flare*  $\geq$  M1.0 yang disertai CME, disimpulkan bahwa parameter MEANGBT yang menyatakan rerata gradien medan magnet total berpotensi untuk digunakan dalam prediksi CME.

Daerah aktif dengan MEANGBT  $\leq$  96 Gauss/Mm berpotensi menghasilkan *flare* yang disertai CME. Berdasarkan sampel kasus yang sama, *True Skill Score* dari metode prediksi ini adalah  $\sim$ 20%. Meski masih tergolong rendah, skor yang didapatkan dapat disandingkan secara proporsional dengan hasil dari peneliti lain.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada penelaah yang telah memberikan masukan konstruktif terhadap penulisan makalah ini. Penelitian ini didanai dengan DIPA Pusat Sains Antariksa tahun 2016.

### DAFTAR RUJUKAN

- Balaguer-Núñez, L., D. Galadí-Enriquez dan C. Jordi, 2007. *wavy - H $\beta$  CCD Photometry and Membership Segregation of the Open Cluster NGC 2682 (M 67)*. *Astronomy and Astrophysics*, 470, 585.
- Bewsher, D., R.A. Harrison, dan D.S. Brown, 2008. *The Relationship between EUV Dimming and Coronal Mass Ejections. I. Statistical Study and Probability Model*. *Astronomy and Astrophysics*, 478, 897.
- Bobra, M.G., dan S. Couvidat, 2015. *Solar Flare Prediction Using SDO/HMI Vector Magnetic Field Data with a Machine-learning Algorithm*. *The Astrophysical Journal*, 798, 135.
- Bobra, M.G., dan S. Itonidis, 2016. *Predicting Coronal Mass Ejections Using Machine Learning Methods*. *The Astrophysical Journal*, 821, 127.
- 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, 3549.
- Chen, F.P., 2011. *Coronal Mass Ejection: Models and Their Observational Basis*. *Living Review in Solar Physics*, 8, 1.
- Crown, M.D., 2012. *Validation of the NOAA Space Weather Prediction Center's solar Flare Forecasting Look-Up Table and Forecaster-Issued Probabilities*. *Space Weather*, 10, S06006.
- Devos, A., C. Verbeeck, dan E. Robbrecht, 2014. *Verification of Space Weather forecasting at the Regional Warning Center in Belgium*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, 29.
- Gopalswamy, N.Y., 2008. *Coronal Mass Ejections, Type II Radio Bursts, and Solar Energetic Particle Events in the SOHO Era*. *Annales Geophysicae*, 26, 3033-3047.
- Kraaikamp, E., dan C. Verbeeck, 2015. *Solar Demon - an Approach to Detecting Flares, Dimmings, and EUV Waves On SDO/AIA Images*. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5, 18.
- Priyatikanto, R., dan M.I. Arifyanto, 2015. *The Implementation of Binned Kernel Density Estimation to Determine Open Clusters' Proper Motions: Validation of the Method*. *Astrophysics and Space Science*, 355, 161.
- Qahwaji, R., T. Colak, M. Al-Omari, dan S. Ipson, 2008. *Automated Prediction of CMEs Using Machine Learning of CME - Flare Associations*. *Solar Physics*, 248, 471.
- Sheather, S.J., 2004. *Density Estimation*. *Statistical Science*, 19, 588.
- Silverman, B.W., 1986. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman and Hall.
- Welsch, B.T., Y. Li, P.W. Schuck, dan G.H. Fisher, 2009. *What is the Relationship Between Photospheric Flow Fields and Solar Flares? The Astrophysical Journal*, 705, 821.

# **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*.



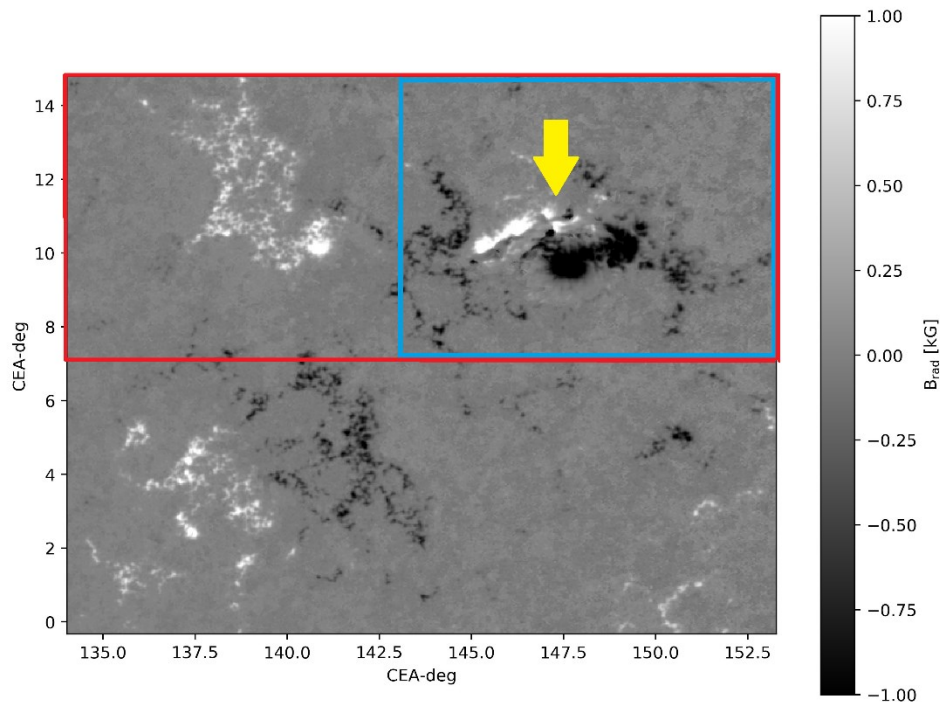
Data SHARP dengan resolusi waktu 12 menit dapat diunduh melalui alamat situs [http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html?ds=hmi.sharp\\_cea\\_720s](http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html?ds=hmi.sharp_cea_720s). Kami mengunduh data dengan menggunakan modul *drms* pada pemrograman Python (Glogowski 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).



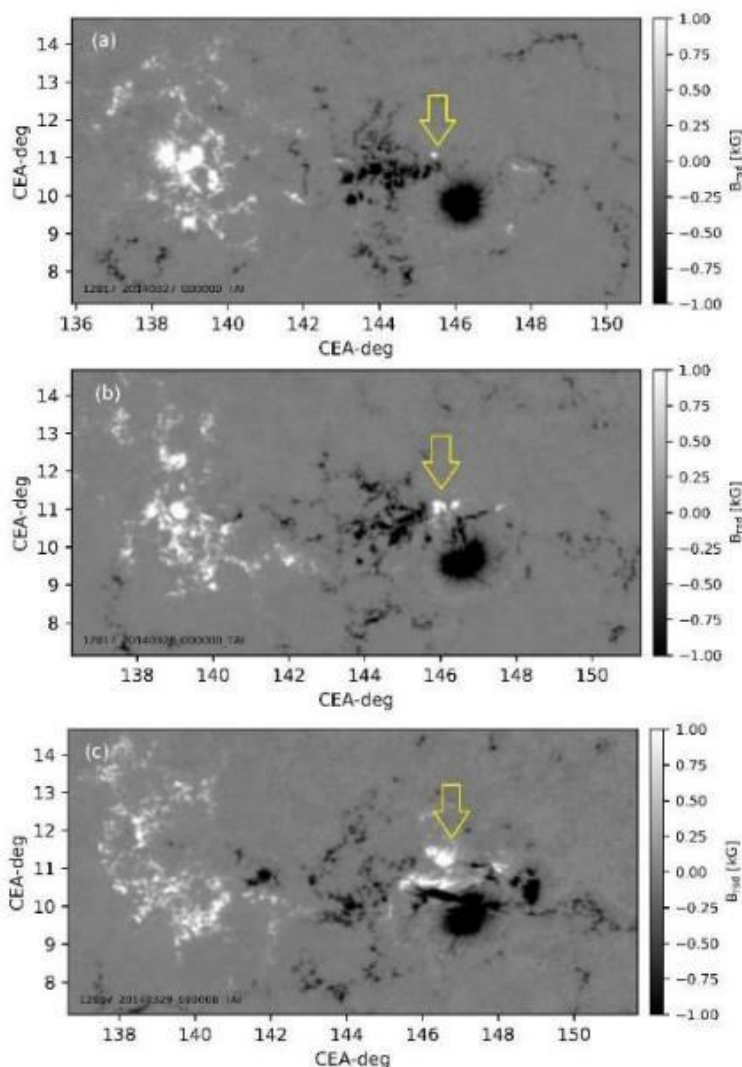
Gambar 2-1: Komponen radial medan magnet ( $B_z$ ) dari data SHARP untuk nomor HARP 3894 pada tanggal 29 Maret 2014 pukul 19:00 UT. Kotak merah dan biru menunjukkan wilayah 1 (WIL1) dan wilayah 2 (WIL2), secara berurutan. WIL1 melingkupi NOAA 12017. WIL2 melingkupi wilayah yang memiliki dinamika magnetik 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 ( $\Phi$ ) 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.

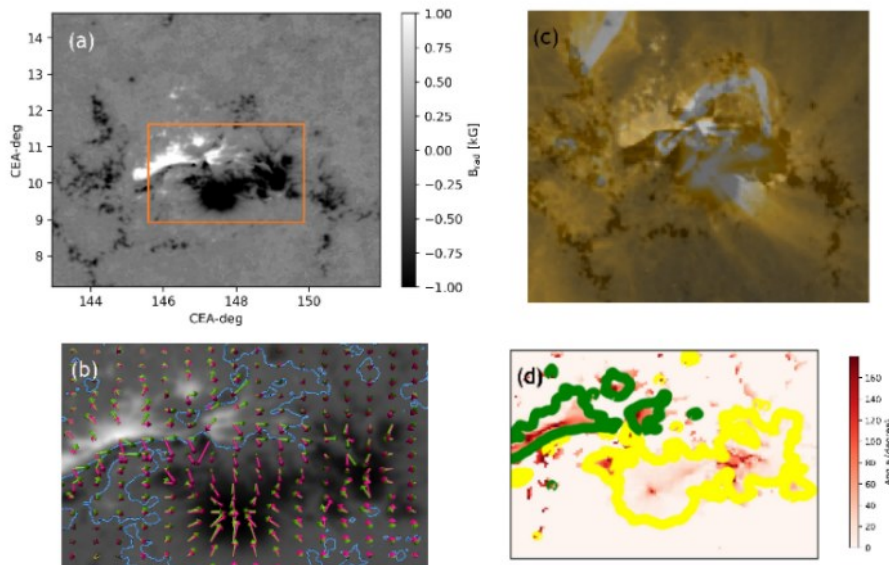
**2.3.2 Sudut Geser (Shear Angle)**

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

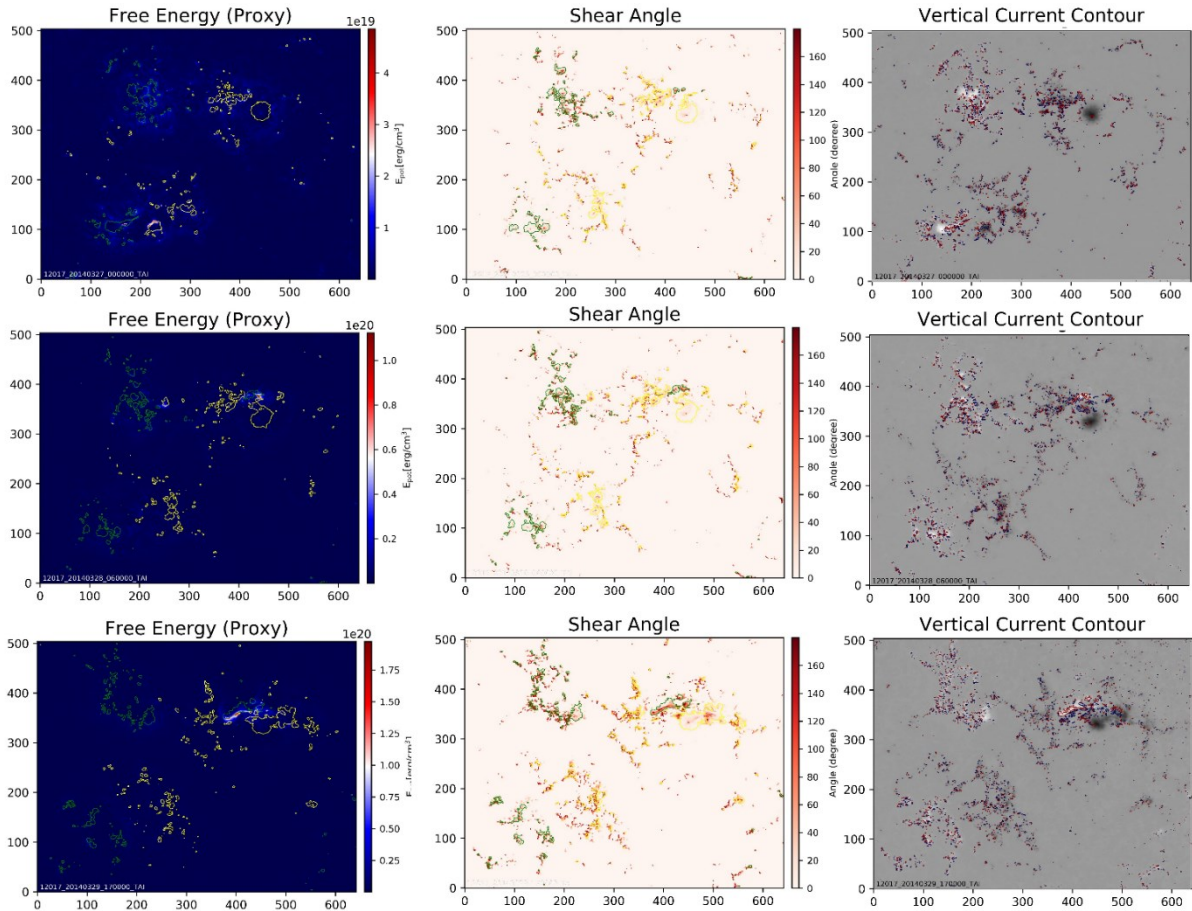
Untuk menghitung parameter-parameter yang terkait dengan energi bebas dan sudut geser, langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung medan potensial. Dengan menggunakan  $B_z$  hasil pengamatan pada setiap waktu, komponen horizontal medan potensial ( $B_{xp}$  dan  $B_{yp}$ ) dapat dihitung. Dari 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  $6 \times 10^5$  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/m<sup>2</sup>.

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.

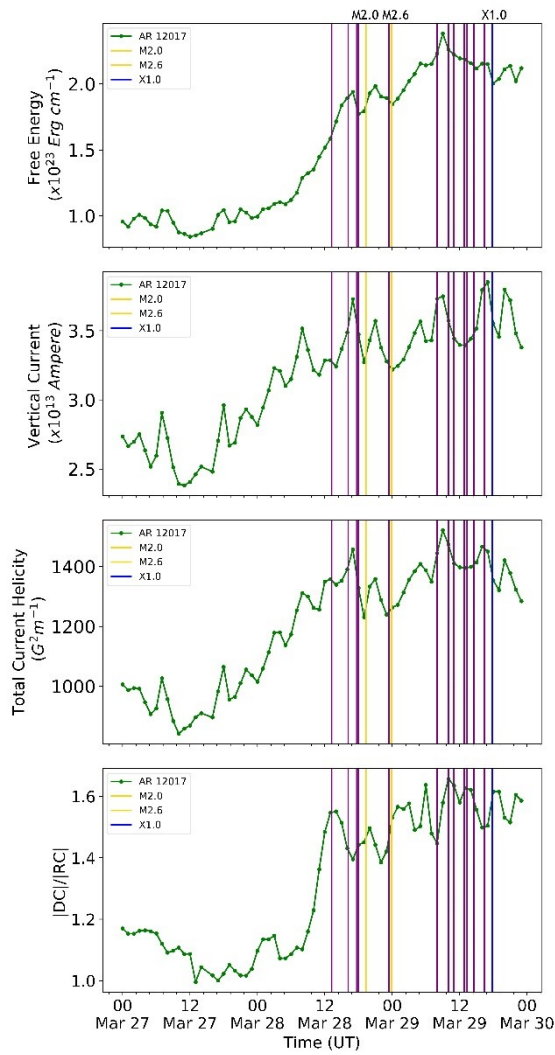
Gambar 3-2 menunjukkan evolusi energi bebas total, arus vertikal total, helisitas arus total, dan rasio netralitas arus dari daerah di WIL1. Tampak dari gambar ini bahwa pada awalnya keseluruhan parameter di NOAA 12017 bernilai relatif rendah. Peningkatan nilai seluruh parameter hampir terjadi dalam 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  $2 \times 10^{22}$  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.

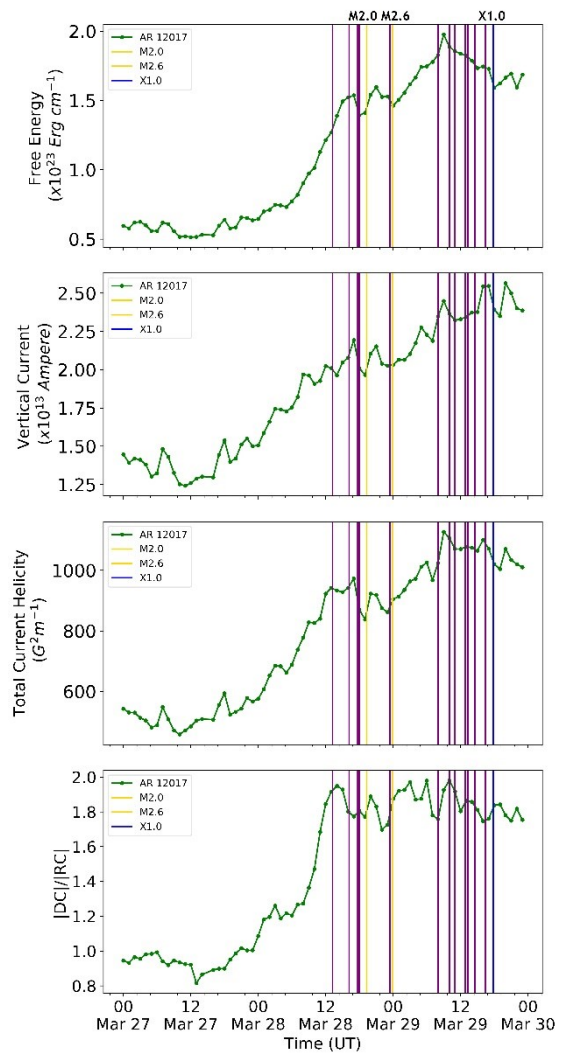




Gambar 3-2: Dari atas ke bawah: total energi bebas, total arus vertikal, total helisitas arus, dan rasio arus searah dan arus berbalik untuk wilayah WIL1 yang meliputi seluruh NOAA 12017. Sumbu X dimulai pada tanggal 27 Maret 2014. Garis vertikal ungu, kuning, dan biru pada setiap gambar secara berurutan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



# **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<sup>1\*</sup>, Rhorom Priyatikanto<sup>1</sup>, Anton Winarko<sup>1</sup>, Gerhana Puannandra Putri<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

<sup>2</sup>Balai 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  $512 \times 512$  piksel dan resolusi temporal 12 menit. Citra yang dianalisis memiliki resolusi lebih rendah dibandingkan dengan citra asli yang berukuran  $4096 \times 4096$  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](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  $-15^\circ$  hingga  $70^\circ$ . 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

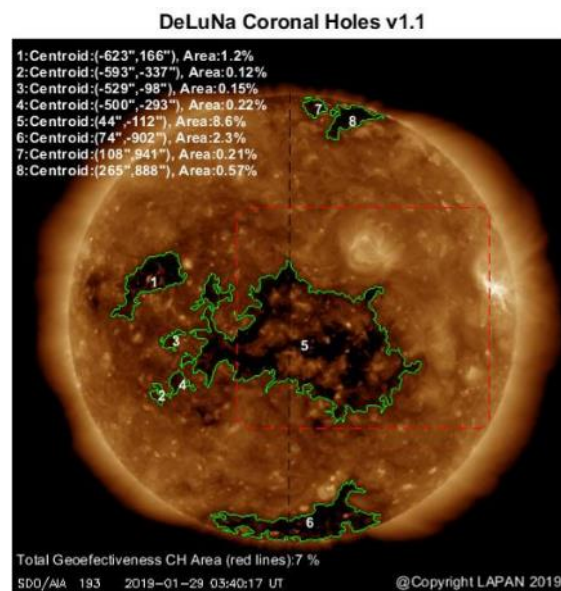
berdasarkan intensitas yang teramati. Pendekatan ini banyak digunakan dalam identifikasi dan karakterisasi lubang korona (Krista dan Gallagher, 2009; Verbanac *et al.*, 2010; Lemen *et al.*, 2012; Rotter *et al.*, 2012; dan Garton *et al.*, 2018).

Citra RGB dengan resolusi  $512 \times 512$  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  $25 \pm 5$  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  $4096 \times 4096$  piksel yang diambil setiap 12 detik sedangkan SOHO/EIT memiliki resolusi tertinggi  $1024 \times 1024$  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  $30^\circ$  lintang selatan dan  $30^\circ$  lintang utara serta  $15^\circ$  bujur timur dan  $75^\circ$  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.

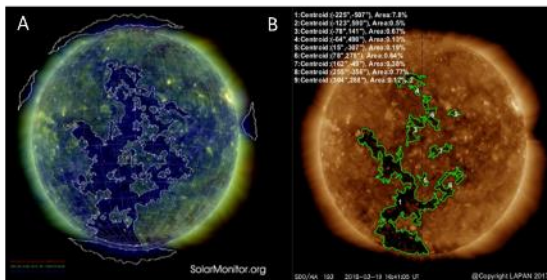
Proses de-proyeksi yang memperhitungkan posisi dari lubang korona tidak dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa faktor proyeksi mempertegas geoeftifitas dari lubang korona yang teramati di Bumi. Sebagai perbandingan, Verbanac *et al.* (2010) hanya menganalisis lubang korona yang berada  $10^\circ$  di 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  $512 \times 512$  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

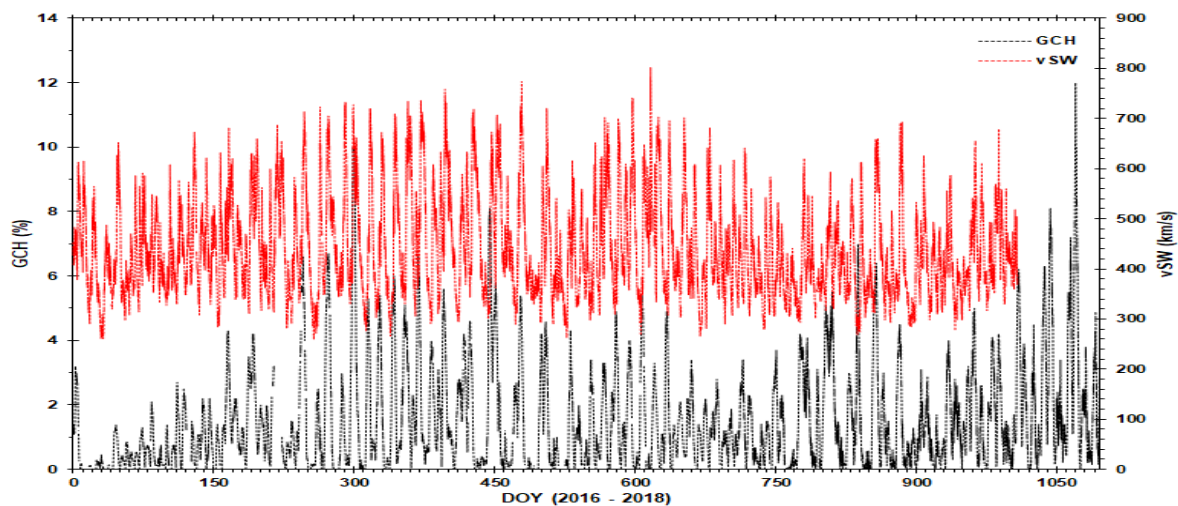
Gambar 3-3 menunjukkan plot luas lubang korona yang bersifat geoeftif (GCH) dan kecepatan angin Matahari (vSW) selama tahun 2016-2018. Terlihat bahwa perubahan luas GCH memiliki pola *sinusoidal* dengan luas terbesar dapat mencapai sekitar 12% dari total luas keseluruhan piringan Matahari seperti yang 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.

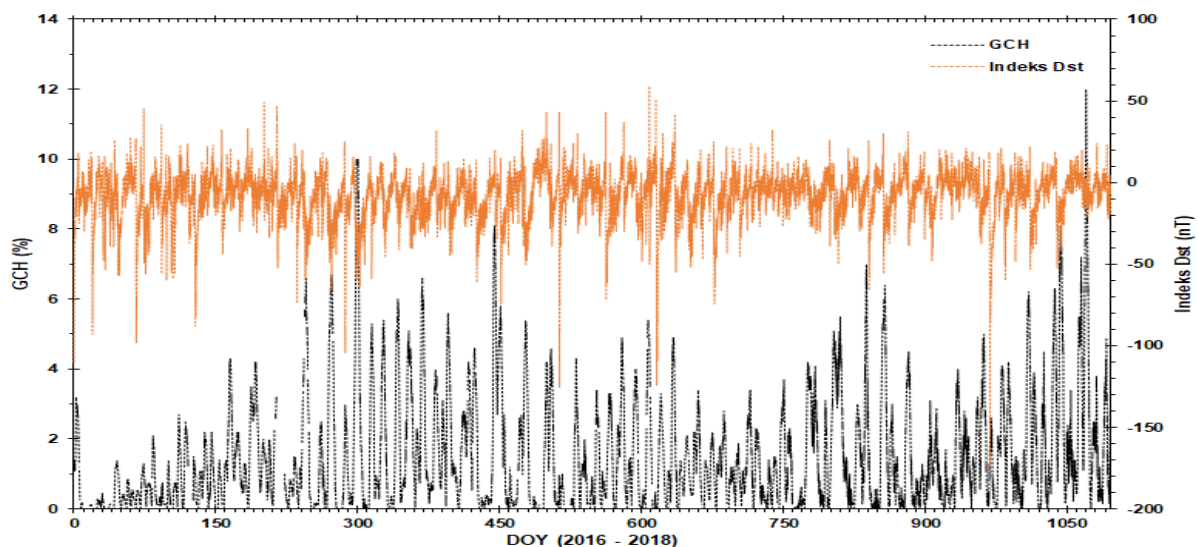
Pola *sinusoidal* yang terlihat di kedua data tersebut dengan puncak-puncak yang agak bergeser menandakan adanya waktu tunda (*lag*) yang terjadi. Waktu tunda terlihat saat GCH mencapai puncak, diikuti dengan vSW mencapai puncak beberapa waktu kemudian. Untuk lebih menjelaskan seberapa besar waktu tunda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



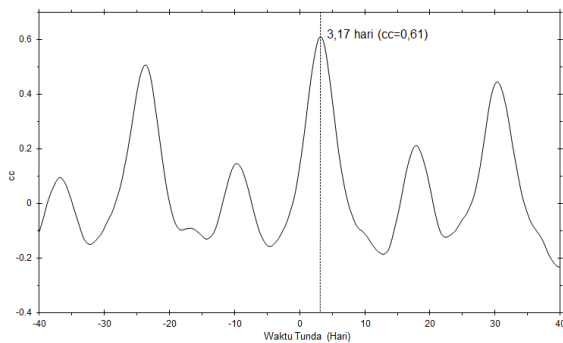
Gambar 3-4: Plot GCH (hitam) dari hasil DeLuNa dan indeks Dst dari WDC Kyoto (oranye) selama tahun 2016-2018.



### 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.



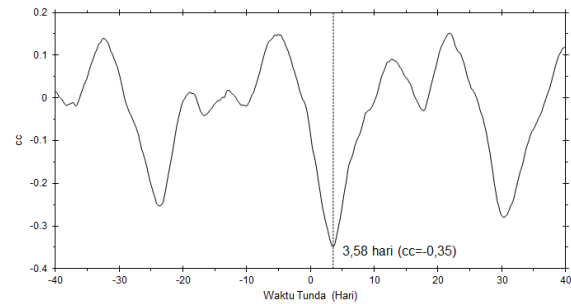
Gambar 3-5: Korelasi silang GCH terhadap vSW diperoleh waktu tunda 3,17 hari dengan  $cc = 0,65$ .

Gambar 3-5 juga memperlihatkan adanya beberapa puncak lokal di sekitar  $\pm 14$  hari dan  $\pm 27$  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

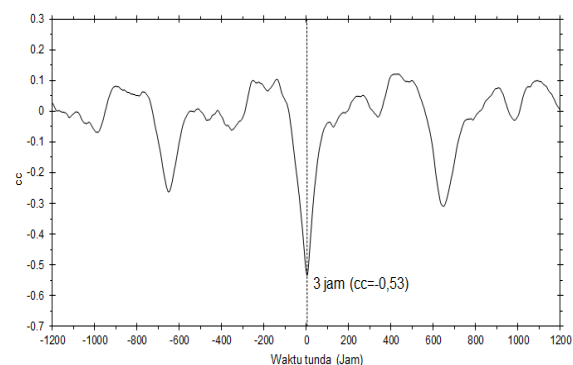
negatif menunjukkan peningkatan luas GCH akan diiringi dengan penurunan indeks Dst dalam waktu sekitar 3,58 hari atau 85,92 jam kemudian.



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

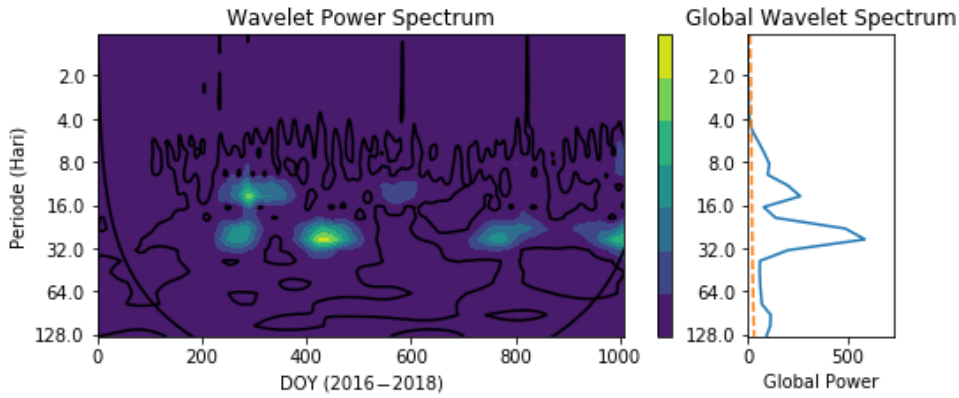
kuat pada DOY 300-360, terlihat lebih kuat dibandingkan dengan yang terlihat pada GCH. Jika meninjau dari pengamatan SDO/AIA193, terdapat lubang korona yang cukup besar memanjang secara latitudinal. Menurut Mursula dan Zieger (2004), periodisitas 13,5 hari di kecepatan angin Matahari yang teramati L1 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.

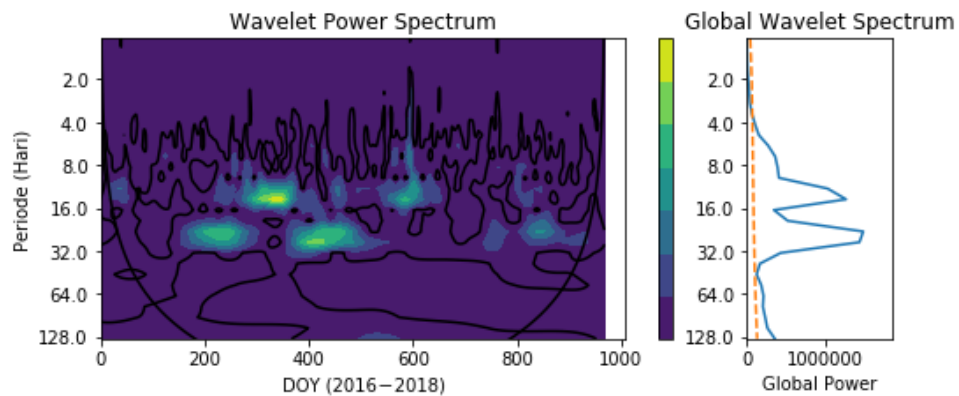
Dari ketiga analisis *wavelet* tersebut, kemunculan periodisitas terjadi pada DOY yang hampir bersamaan. Periodisitas 9 hari meskipun lemah, tetapi cukup tampak pada data GCH. Periodisitas 13,5 hari cukup kuat muncul pada parameter kecepatan angin Matahari meskipun melemah di indeks Dst. Hal ini menunjukkan,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

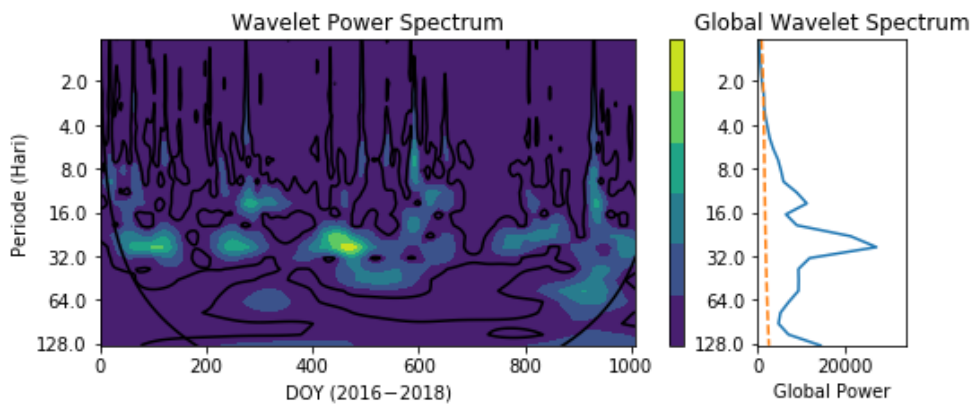
merupakan syarat masuknya partikel-partikel energi tinggi ke permukaan Bumi melalui kutub-kutub. Sementara itu, periodisitas 27 hari dari lubang korona muncul secara kuat di kecepatan angin Matahari dan indeks Dst.



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.

# ASTIGMATISMA TELESKOP 50 CM F/3,8 UNTUK OBSERVATORIUM NASIONAL TIMAU (ASTIGMATISM OF THE 50 CM F/3.8 TELESCOPE FOR TIMAU NATIONAL)

Rhorom Priyatikanto<sup>1,\*</sup>, Muhamad Dio Danarianto<sup>1</sup>, Manoreddy Tobias Bumbungan<sup>1</sup>, Muhammad Bayu Saputra<sup>1</sup>, Muhamad Zamzam Nurzaman<sup>1</sup>, Mulya Diana Murti<sup>1</sup>, Futikhathun Rohmah<sup>1</sup>, Farahhata Mumtahana<sup>1</sup>, Delina Legitawuri<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Dr. Djundjunaan no. 133 Bandung 40173

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Institut Sains dan Teknologi Nasional  
Jl. Moh. Kahfi II Jagakarsa, Jakarta 12640

\*e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 5 Desember 2018; Direvisi 8 Maret 2019; Disetujui 16 September 2019

## ABSTRACT

Timau National Observatory will be a new observing facility in the south-eastern part of Indonesia, equipped with sub-meter and meter class optical telescopes. A Ritchey-Chretien telescope with 50 cm aperture and 190 cm focal length is expected as the work horse of survey program. In this paper, the level of astigmatism of the telescope is evaluated by means of geometric approach. The result shows that the astigmatism is considerably small and insignificantly affects the overall system performance. It is represented by the Zernike coefficient  $Z_2^2$  of 200 nm, much smaller than the operational wavelength and camera pixel size.

Keywords: *optical telescope, aberration, astigmatism*

## ABSTRAK

Observatorium Nasional Timau akan menjadi fasilitas observatorium di bagian tenggara Indonesia, dilengkapi dengan teleskop optik kelas submeter dan meter. Sebuah teleskop tipe Ritchey-Chretien dengan bukaan 50 cm dan panjang fokus 190 cm diharapkan menjadi kuda kerja dari program survei. Dalam makalah ini, tingkatan astigmatisme dari teleskop dievaluasi dengan menggunakan pendekatan geometris. Hasilnya menunjukkan bahwa astigmatisme cukup kecil dan tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja sistem keseluruhan. Besarnya direpresentasikan oleh koefisien Zernike  $Z_2^2$  yang nilainya 200 nm, jauh lebih kecil dari panjang gelombang operasional dan ukuran piksel kamera.

Kata kunci: *teleskop optik, cacat bayangan, astigmatisme*

## 1 PENDAHULUAN

Undang-undang Republik Indonesia No. 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan salah satunya memberikan amanah bahwa bangsa Indonesia harus menguasai sains antariksa yang meliputi, tetapi tidak terbatas pada, penelitian mengenai: (a) cuaca antariksa; (b) lingkungan antariksa; dan (c) astrofisika. Kegiatan penelitian keantariksaan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan sarana: (a) satelit; (b) stasiun antariksa; dan (c) fasilitas

observasi di ruas Bumi. Atas dasar tersebut serta diperkuat dengan kebutuhan akan adanya fasilitas observasi yang lebih maju, LAPAN bekerja sama dengan ITB, UNDANA, Pemprov NTT, dan Pemkab Kupang membangun Observatorium Nasional Timau di lereng Gunung Timau ( $9,5614^\circ$  LS,  $123,9465^\circ$  BT, 1300 mdpl), Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur (Mumpuni *et al.*, 2018). Daerah ini dipilih karena memiliki karakteristik klimatologi yang mendukung pengamatan

astronomi pada jendela optik. Menurut studi yang dilakukan oleh Hidayat *et al.* (2012), daerah Kupang memiliki langit malam cerah selama sekitar 200 hari dalam setahun, salah satu yang terbaik di Indonesia.

Area seluas 30 hektar yang berada di kawasan hutan lindung dipinjam-pakai oleh LAPAN untuk keperluan pembangunan observatorium. Teleskop optik bercermin majemuk dengan diameter efektif 3,8 m (Kurita *et al.*, 2004; 2010) akan menjadi fasilitas andalan di observatorium ini. Selain itu, terdapat pula teleskop berdiameter kecil (50 cm) untuk keperluan pengamatan survei dan tindak lanjut. Teleskop ini direncanakan sebagai sistem teleskop robotik yang dapat bekerja secara otonom untuk memenuhi target pengamatan yang telah ditentukan.

Pada akhir tahun 2016, Pusat Sains Antariksa LAPAN telah mengadakan 2 buah sistem teleskop yang dapat dikendalikan dari jarak jauh dan juga secara otonom (Bumbungan *et al.*, 2018). Keduanya merupakan teleskop dengan arsitektur Ritchey-Chretien yang memiliki cermin primer dan sekunder berbentuk cekung hiperboloid dengan diameter 50 cm. Cermin sekunder teleskop tersebut berbentuk cembung hiperboloid. Sistem pertama memiliki nisbah fokus  $f/3,8$  atau panjang fokus 190 cm sehingga dapat dianggap sebagai teleskop ‘cepat’ dengan medan pandang lebih lebar. Sistem kedua memiliki nisbah fokus  $f/8,0$  atau panjang fokus 400 cm. Makalah kali ini akan berfokus pada sistem pertama yang diarahkan untuk misi pengamatan survei.

Teleskop dengan arsitektur Ritchey-Chretien atau juga dikenal sebagai *aplanatic Cassegrain* telah bebas dari *spherical aberration* dan koma yang biasa ditemui pada teleskop cermin, tetapi mengalami astigmatisme (Schroeder, 2000). Astigmatisme merupakan cacat optik yang menyebabkan citra objek titik (bintang) yang

berada jauh dari sumbu optik (*off-axis*) tampak lonjong atau kabur. Berbeda dengan koma, astigmatisme bersifat simetris sehingga tidak terlalu menurunkan kualitas citra yang dihasilkan.

Karena itulah, arsitektur Ritchey-Chretien banyak digunakan pada teleskop-teleskop besar dewasa ini. Meski demikian, astigmatisme membatasi lebar medan pandang efektif yang dihasilkan oleh teleskop (Schroeder, 2000). Di luar batasan tersebut, kualitas citra dianggap rendah.

Sebagai bagian dari karakterisasi sistem pengamatan yang baru diadakan, maka dilakukanlah pengukuran besaran astigmatisme yang dialami oleh teleskop 50 cm  $f/3,8$  yang akan dioperasikan di Observatorium Nasional Timau. Metode dan data yang digunakan untuk keperluan ini diulas pada bagian 2, sedangkan hasil dan pembahasannya diberikan pada bagian 3. Kesimpulan dari studi ini diberikan pada bagian 4.

## 2 METODE DAN DATA

### 2.1 Metode Pengukuran Astigmatisme

Muka gelombang cahaya (*wave front*) yang mencapai bidang potret teleskop (*pupil plane*) dapat dideskripsikan dengan persamaan polinom Zernike (1934). Dalam tata koordinat polar, persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (McLeod, 1996; Lakshminarayanan dan Fleck, 2011):

$$\begin{aligned}
 W = & Z_0^0 + Z_1^1 \rho \cos \varphi + Z_1^{-1} \rho \sin \varphi \\
 & + Z_2^0 (2\rho^2 - 1) + Z_2^2 \rho^2 \cos 2\varphi \\
 & + Z_2^{-2} \rho^2 \sin 2\varphi \\
 & + Z_3^1 (3\rho^3 - 2\rho) \cos 2\varphi \\
 & + Z_3^{-1} (3\rho^3 - 2\rho) \sin 2\varphi \\
 & + \dots
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

dengan  $\rho(r)$  dan  $\varphi(\theta)$  menyatakan koordinat polar pada bidang potret yang telah dinormalisasi. Koefisien  $Z_0^0$ ,  $Z_1^1$ , dan  $Z_1^{-1}$  berturut-turut berkaitan dengan pergeseran fase dan kemiringan pada

dua arah ( $x$ -tilt dan  $y$ -tilt). Koefisien  $Z_2^0$  berkaitan dengan besaran *defocus*, sedangkan  $Z_2^2$  dan  $Z_2^{-2}$  berasosiasi dengan astigmatisme pada arah  $x$  dan  $y$ . Koefisien  $Z_3^1$  dan  $Z_3^{-1}$  berkaitan dengan cacat bayangan koma, sedangkan komponen dengan orde lebih tinggi tidak dituliskan.

Pada teleskop Ritchey-Chretien dengan komponen optik yang telah terkolimasi dengan baik, koefisien Zernike yang berkaitan dengan *tilt* dan koma dapat diabaikan sementara nilai koefisien  $Z_2$  menjadi fokus. Luna *et al.* (2007) mengusulkan metode geometri untuk mengukur besaran astigmatisme yang dialami teleskop, yakni dengan mengukur tingkat kelonjongan citra tak fokus dari sebuah bintang.

Bila dinyatakan dalam tata koordinat kartesian ( $x, y, z$ ), tepian citra tak fokus dari sebuah bintang dapat direpresentasikan oleh persamaan elips sebagai berikut:

$$r^2 = \frac{x^2}{\left\{ \left[ -z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 + \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \right\}^2} + \frac{y^2}{\left\{ \left[ -z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 - \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \right\}^2} \quad (2-2)$$

dengan koefisien  $Z_2^{-2}$  yang simetri dengan  $Z_2^2$ .  $R$  dan  $a$  berturut-turut menyatakan panjang fokus dan radius cermin primer teleskop. Adapun sumbu panjang dan sumbu pendek dari elips tersebut adalah

$$A = \left[ -z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 + \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \quad (2-3)$$

dan

$$B = \left[ -z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 - \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \quad (2-4)$$

Eksentrisitas dari elips dinyatakan sebagai

$$e = \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \quad (2-5)$$

sedangkan besaran astigmatisme dapat dihitung dengan persamaan

$$Z_2^2 = \frac{A-B}{4\sqrt{6}} \frac{a}{R} \quad (2-6)$$

Pada praktiknya,  $Z_2^2$  dapat dihitung setidaknya dengan dua cara. Pertama, dengan menggunakan Persamaan 2-6 secara langsung. Cara kedua adalah dengan mengukur eksentrisitas citra tak fokus yang memiliki  $A$  beragam dan diambil pada jarak  $z$  berbeda. Sebagaimana didemonstrasikan oleh Luna *et al.* (2007), kurva eksentrisitas sebagai fungsi sumbu panjang atau  $e(A)$  bersifat unik dan bergantung pada besar astigmatisme yang dialami sistem. Dengan memadukan Persamaan 2-5 dan Persamaan 2-6, didapatkan

$$e = \sqrt{1 - \left( 1 - 4\sqrt{6} \frac{RZ_2^2}{a} \right)^2} \quad (2-7)$$

Koefisien  $Z_2^2$  dapat ditentukan dengan mencocokkan Persamaan 2-7 dengan data  $e$  sebagai fungsi  $A$ .

## 2.2 Citra Altair

Sebagaimana ditunjukkan oleh Luna *et al.* (2007), citra bintang yang diambil pada beberapa jarak di luar fokus (*out focus*) adalah data utama yang diperlukan untuk pengukuran astigmatisme dan kelonjongan citra tak fokus tersebut merupakan inti dari metode geometri yang digunakan.

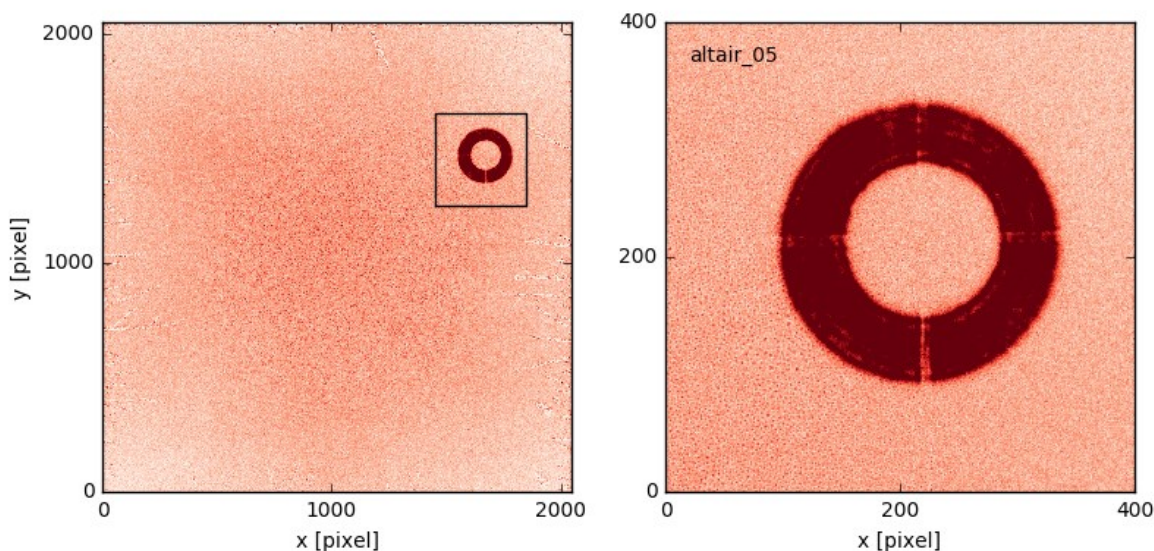
Dalam studi ini, citra tersebut diambil menggunakan kamera *Charge-Coupled Device* (CCD) tipe FLI PL4240 yang terpasang di belakang teleskop 50 cm  $f/3,8$ . CCD tersebut berukuran  $2048 \times 2048$  piksel berbentuk persegi dengan sisi 13,5 mikron/piksel. Teleskop juga dilengkapi dengan RotoFocuser yang berfungsi untuk mengatur orientasi sudut kamera dan jaraknya dari titik fokus. Konfigurasi ini menghasilkan skala bayangan sekitar 1,47 detik busur per piksel pada bidang fokus dan medan

pandang hingga  $50' \times 50'$  (1,7 kali ukuran Bulan).

Citra yang digunakan dalam studi ini adalah citra Altair (*a Aquilae*) yang memiliki magnitudo semu visual 0,75 dipotret tanpa filter pada tanggal 18 September 2018 sekitar pukul 20.00 waktu lokal. Saat itu, Altair berada pada ketinggian sekitar  $60^\circ$ . Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2-1, Altair diposisikan sekitar 770 piksel atau 18,8 menit busur dari sumbu optik teleskop sehingga astigmatisme diharapkan dapat diukur. Citra tak fokus diambil pada jarak antara -12 mm hingga +4 mm dari bidang fokus dengan waktu paparan (*exposure time*) 0,1 detik. Dengan waktu paparan ini, hanya citra fokus Altair saja yang mengalami saturasi. Prosedur reduksi *simple autodark* dilakukan pada setiap citra sehingga citra lebih bersih dari derau dan bias. Jauh dari bidang fokus, citra bintang akan tampak seperti cincin/donat karena merepresentasikan cahaya bintang yang diterima cermin primer yang terhalang oleh cermin sekunder. Untuk setiap jarak, dilakukan

beberapa kali pemotretan dan analisis lebih lanjut dilakukan terhadap lima citra yang diperoleh. Karena kondisi cuaca yang berubah-ubah, *signal-to-noise ratio* (SNR) yang didapatkan pada tiap citra cukup bervariasi. Pada kondisi berawan, SNR bernilai lebih rendah dan citra tampak kurang kontras dibandingkan langit latar depan. Hampir semua citra yang dianalisis memiliki SNR  $\geq 5$ , tetapi ada satu citra dengan SNR  $\approx 2$  dan algoritma yang digunakan tidak berhasil mengidentifikasi tepi elips dari citra tersebut.

Saat pengambilan citra, CCD didinginkan hingga temperatur  $-20^\circ\text{C}$  untuk meminimalisasi *dark noise*. Pada temperatur ini, kristal es terbentuk di bagian tepi citra, kemungkinan karena bagian sensor tidak terisolasi dengan baik sehingga uap air masuk dan mengalami kondensasi. Keberadaan citra dianggap tidak memengaruhi hasil pengukuran astigmatisme karena jejak kristal es yang terbentuk tidak mencapai daerah dekat Altair.



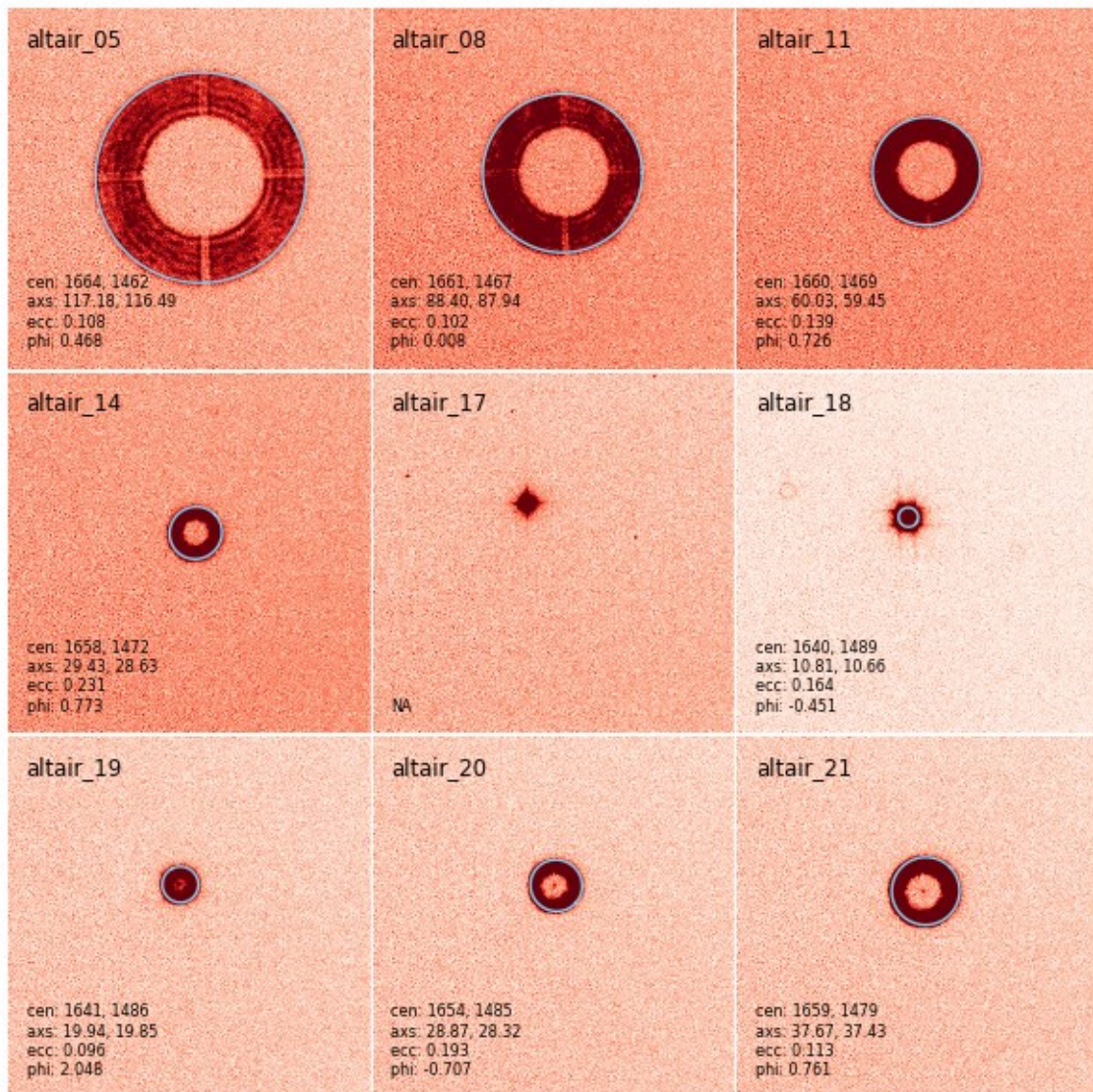
Gambar 2-1: Citra tak fokus dari Altair (kiri) yang diambil pada tanggal 18 September 2018 sekitar pukul 20.00 waktu lokal. Citra *full-frame* (kiri) mengindikasikan adanya jejak kristal es di tepi citra dan background level yang tidak rata. Untuk mempermudah analisis, citra dipotong di sekitar lokasi Altair (kanan).



### 2.3 Identifikasi dan Karakterisasi Elips

Sebagaimana tampak pada Gambar 2-1, citra tak fokus yang dihasilkan tampak sebagai cincin atau donat yang hampir lingkaran. Ekstraksi fitur elips dilakukan menggunakan algoritma komputer yang terdiri atas deteksi tepi (*edge detection*) menggunakan metode Canny (1986) yang termasuk dalam modul *scikit-image* berbahasa python dan penentuan parameter elips yang sesuai menggunakan metode *least square* (Fitzgibbon *et al.*, 1996). Proses pertama menghasilkan citra biner berisikan garis-garis tipis yang menandai bagian citra

dengan gradien tajam. Citra tersebut perlu dibersihkan dengan *masking* sehingga hanya satu elips yang tersisa. Proses kedua adalah pencocokan elips berbasis eigensystem yang menghasilkan koordinat pusat elips, setengah sumbu panjang ( $\frac{1}{2}A$ ) dan setengah sumbu pendeknya ( $\frac{1}{2}B$ ) serta sudut orientasi ( $\psi$ ) dari elips tersebut. Kedua proses dilakukan pada citra yang telah dipotong pada area tertentu untuk mempercepat proses komputasi. Gambar 2-2 menunjukkan hasil identifikasi dan karakterisasi elips yang dilakukan pada citra Altair yang diambil pada berbagai jarak tak fokus.



Gambar 2-2: Identifikasi tepi cincin dari citra Altair yang dipotret pada berbagai jarak. Parameter elips yang terdiri dari koordinat pusat (cen), setengah sumbu panjang dan pendek (axs), eksentrisitas (ecc), serta orientasi sudut (phi) disertakan pada tiap panel kecuali pada citra fokus (Altair 17 tengah)

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter elips yang diperoleh dari citra tak fokus Altair dirangkum dalam Tabel 3-1. Sumbu panjang dan sumbu pendek yang didapatkan merentang dari 20 hingga 230 piksel dengan ketidakpastian relatif berada di bawah 2%. Eksentrisitas citra berada pada kisaran 0,084 dan 0,250, tetapi dengan ketidakpastian relatif hingga 46%. Dengan 8 pasang nilai  $A$  dan  $B$  serta panjang fokus teleskop  $R = 1900$  mm dan radius cermin primer  $a = 250$  mm, nilai koefisien  $Z_2^2$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-6. Hasilnya berkisar antara 0,09 hingga 0,26 piksel atau setara dengan 99 hingga 345 nm. Rata-rata terbobot dari 8 nilai yang diperoleh adalah  $Z_2^2 = 201$  nm.

Orientasi elips (rata-rata) berada pada rentang 0-90°. Parameter ini tidak memengaruhi besarnya astigmatisme, tetapi konsistensi dari parameter ini mencerminkan bahwa algoritma otomatis yang diterapkan telah

memberikan hasil yang cukup baik. Kelonjongan yang teramati tidak disebabkan oleh masalah *tracking* teleskop yang timbul karena orientasi poros gerak teleskop tidak sepenuhnya sejajar dengan poros rotasi Bumi (*polar aligned*). Hal ini juga diperiksa dengan menumpuk 5 citra fokus (Altair 18). Tidak ada indikasi *trailing* pada citra yang diambil dalam durasi yang relatif singkat (kurang dari 5 detik).

Plot eksentrisitas sebagai fungsi sumbu panjang disajikan pada Gambar 3-1. Terdapat tren penurunan eksentrisitas dengan bertambahnya sumbu panjang. Dengan menggunakan prinsip *least square*, Persamaan 2-7 dapat dicocokkan dengan data untuk mendapatkan koefisien  $Z_2^2 = 177$  nm. Nilai ini tidak jauh berbeda dibandingkan nilai yang diperoleh dengan cara pertama (Persamaan 2-6) dan kurva yang merepresentasikan kedua nilai pun tampak berdekatan pada Gambar 3-1.

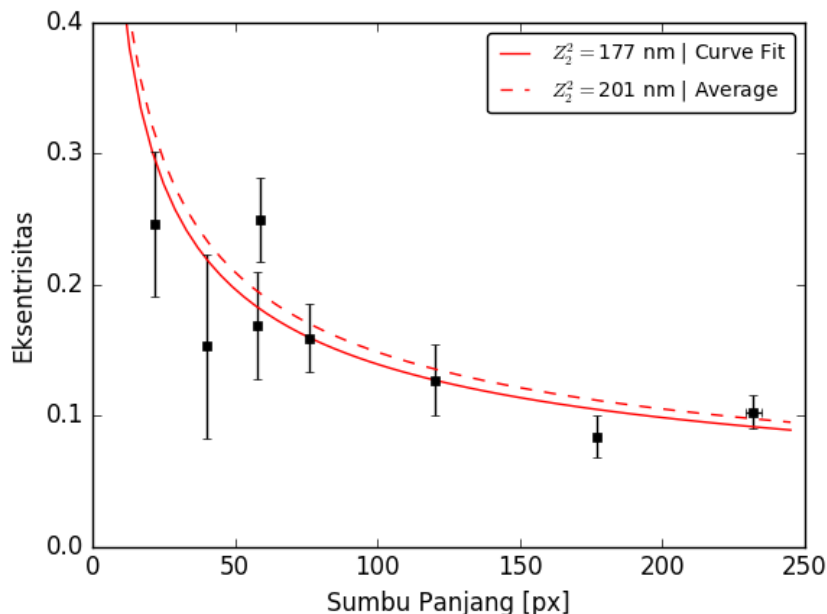
Tabel 3-1: PARAMETER ELIPS ( $A$ ,  $B$ ,  $e$ ,  $\psi$ ) DARI CITRA TAK FOKUS YANG DIAMBIL PADA JARAK  $z$  BERBEDA, RELATIF TERHADAP TITIK FOKUS TELESKOP. PARAMETER TERSEBUT MERUPAKAN RATA-RATA DARI LIMA KALI PENGUKURAN, SEDANGKAN NILAI DALAM KURUNG ADALAH SIMPANGAN BAKUNYA.

ID	$z$ [mm]	$A$ [piksel]	$B$ [piksel]	$e$	$\psi$ [°]	$Z_2^2$ [nm]
Altair 05	-12	231,8 (2,7)	230,6 (2,6)	0,103 (0,013)	29	226
Altair 08	-9	117,0 (0,3)	176,3 (0,5)	0,084 (0,016)	4	117
Altair 11	-6	120,0 (0,3)	119,0 (0,3)	0,127 (0,027)	55	181
Altair 14	-3	58,7 (0,4)	56,8 (0,4)	0,250 (0,032)	39	345
Altair 17	0	-	-	-	-	-
Altair 18	+1	21,7 (0,3)	21,0 (0,2)	0,246 (0,055)	38	126
Altair 19	+2	39,8 (0,1)	39,3 (0,5)	0,153 (0,070)	64	99
Altair 20	+3	57,6 (0,3)	56,7 (0,3)	0,169 (0,041)	57	160
Altair 21	+4	75,8 (0,3)	74,8 (0,1)	0,159 (0,026)	23	178



Sebenarnya, Luna *et al.* (2007) merekomendasikan untuk menggunakan Persamaan 2-6 untuk nilai  $A$  yang cukup kecil atau saat  $e$  mendekati nilai maksimum. Citra yang digunakan sebaiknya juga jauh dari *vignetting* dari sistem. Bila mengikuti saran tersebut, citra Altair 18 merupakan citra dengan eksentrisitas paling tinggi di antara yang lainnya. Besaran astigmatisma yang diperoleh berdasarkan citra ini adalah 126 nm, lebih rendah dibandingkan nilai yang didapatkan dengan pencocokan kurva, meski masih dalam kisaran  $1\sigma$ . Penentuan parameter elips berdasarkan citra berukuran kecil memang lebih sulit untuk dilakukan karena tingkat akurasi dari ekstraksi parameter elips bergantung pada jumlah titik tepi citra yang diperhitungkan. Karena mekanisme gerak teleskop (*tracking*) yang belum sempurna, citra yang didapatkan sedikit bergeser dan pergeseran 1-2 piksel dapat mempengaruhi parameter elips yang diperoleh dari citra berukuran kecil.

Terlepas dari perbedaan yang muncul, nilai  $Z_2^2 = 200$  nm dapat digunakan sebagai nilai acuan besarnya astigmatisma yang dialami oleh teleskop 50 cm  $f/3,8$  yang menjadi objek dari studi ini. Nilai tersebut bersesuaian dengan nilai rata-rata dari 40 pengukuran serta sedikit lebih besar dibandingkan hasil pencocokan kurva yang telah disebutkan sebelumnya. Astigmatisma 200 nm tergolong kecil bila dibandingkan dengan nilai yang disebutkan dalam literatur. Luna *et al.* (2007) mendapatkan koefisien astigmatisma sebesar  $600 \pm 50$  nm untuk teleskop 1,5 meter dari *National Observatory of Mexico* di San Pedro Martir. McLeod (1996) mendapatkan nilai 360 nm untuk *Multiple Mirror Telescope* berdiameter 6,5 meter di Mount Hopkins. Nilai koefisien yang kecil memang wajar untuk teleskop berkualitas baik dengan bukaan di bawah 1 meter. Geometri cermin primer dapat dibuat dengan sangat baik untuk mencapai kinerja optimal.



Gambar 3-1: Eksentrisitas citra yang menurun sebagai fungsi sumbu panjang cocok dengan model dengan besaran astigmatisma tertentu. Parameter  $Z_2^2 = 177$  nm dan  $Z_2^2 = 201$  nm didapatkan dengan *least square fitting* (garis tegas) dan perata-rataan terbobot (garis putus-putus).

Astigmatisma yang dialami tergolong kecil dan dapat dikatakan tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja sistem. Dengan mempertimbangkan *seeing* di sekitar Gunung Timau yang sering berada di bawah 2 detikbusur (Mahasena *et al.*, 2013) atau setara dengan 1,4 piksel untuk sistem yang menjadi fokus dalam studi ini (RC 50 cm f/3,8, CCD 13,5 mikron/piksel), maka citra bintang yang terbentuk diperkirakan akan tampak lonjong dengan eksentrisitas hingga 0,8. Mengingat astigmatisma bersifat simetris, maka cacat bayangan ini tidak akan memengaruhi kinerja sistem. Titik berat (*centroid*) dari citra yang dihasilkan tetap berimpit dengan pusat elips. Namun, hal ini tetap perlu menjadi catatan, terutama ketika menggunakan algoritma otomatis untuk deteksi dan klasifikasi sumber, misalnya menggunakan *SExtractor* (Bertin dan Arnouts, 1996) yang dapat mengelompokkan sumber dengan kelonjongan tertentu sebagai objek ekstragalaktik.

Teleskop tipe Ritchey-Chretien juga dapat mengalami cacat bayangan lain yang tergolong sebagai *Seidel aberration* (Schechter dan Levinson, 2011). Koma dan *spherical aberration* telah dipangkas pada sistem ini, sedangkan astigmatisma telah dievaluasi dan tampak tidak signifikan pada teleskop 50 cm f/3,8 yang menjadi subjek. Cacat berikutnya adalah distorsi yang tidak menurunkan kualitas citra, tetapi dapat mengubah posisi objek pada bidang potret. Jenis cacat bayangan terakhir adalah kelengkungan medan (*curvature of field*) yang menyatakan variasi jarak fokus sebagai fungsi radius dari sumbu optik. Dua jenis cacat bayangan yang terakhir disebutkan perlu dievaluasi, tetapi dengan skema pengambilan data yang berbeda dibandingkan dengan apa yang dilakukan pada studi ini. Citra tak fokus dari bintang perlu dipotret pada posisi polar  $(\rho, \varphi)$  berbeda untuk memahami

pola yang timbul dan untuk mengukur seberapa parah cacat yang dialami.

#### 4 KESIMPULAN

Pada studi ini, astigmatisma yang dialami teleskop tipe Ritchey-Chretien berdiameter 50 cm dan panjang fokus 190 cm telah dievaluasi berdasarkan hasil pengamatan Altair pada tanggal 18 September 2018. Dengan menggunakan metode geometris, didapatkan koefisien Zernike  $Z_2^2$  sekitar 200 nm dengan batas atas 350 nm. Dengan mempertimbangkan *seeing* dan *sampling* dari sistem ini, astigmatisma yang dialami teleskop dianggap tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja teleskop.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada konsorsium Observatorium Nasional Timau yang telah bekerja keras dalam proses pembangunan observatorium, baik secara fisik maupun saintifik. RP berterima kasih kepada Neem Shadalmelik atas dukungan yang diberikan saat penulisan makalah ini.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Bertin, E., dan S. Arnouts, 1996. *SExtractor: Software for Source Extraction*. Astronomy & Astrophysics Supplements, 117, 393.
- Bumbungan, M.T., R. Priyatikanto, M.D. Danarianto, M.B. Saputra, F. Rohmah, M.D. Murti, F. Mumtahana, M.Z. Nurzaman, dan N.D. Legita, 2018. *Two 0.5-m Robotic Telescopes for Timau National Observatory in Eastern Indonesia*. Journal of Physics: Conference Series, 1231, 012008.
- Canny, J., 1986. *Computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8, 679.
- Fitzgibbon, A., M. Pilu, dan R.B. Fisher, 1996. *Direct Least Square Fitting of Ellipses*. Proceeding of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 21, p. 253.

- Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, T.W. Hadi, P.W. Premadi, dan D. Herdiwijaya, 2012. *Clear Sky Fraction Above Indonesia: an Analysis for Astronomical Site Selection*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 1903.
- Kurita, M., H. Ohmori, M. Kunda, H. Kawamura, N. Noda, T. Seki, et al., 2010. *Light-Weight Telescope Structure Optimized by Genetic Algorithm*. Proceeding of SPIE, 7733, 3.
- Kurita, M., S. Sato, K. Morishima, H. Achiwa, H. Ito, T. Nagata, N. Noda, dan N. Koiso, 2004. *Development of the Ultralight Medium-Size Telescope*. Proceeding of SPIE, 5495, 518.
- Lakshminarayanan, V., dan A. Fleck, 2011. *Zernike Polynomials: A Guide*. Journal of Modern Optics, 58, 545.
- Luna, E., L. Salas, L. Gutierrez, dan J.M. Nunez, 2007. *Geometric Method to Measure Astigmatism Aberration at Astronomical Telescopes*. Applied Optics, 46, 3439.
- Mahasena, P., E.I. Akbar, M. Yusuf, T. Hidayat, B. Dermawan, D. Herdiwijaya, C. Kunjaya, Z.L. Dupe, H.L. Sianturi, A. Warsito, J.L. Tanesib, D.H. Nugroho, M. Yusuf, E.I. Akbar, A.T. Jaelani, D. Mandey, A.T.P. Jatmiko, Sulistiyowati, dan Y. Yulianti, 2013. *Pengukuran Seeing di Sekitar Gunung Timau, Nusa Tenggara Timur*. Prosiding Seminar HAI 2013.
- McLeod, B. 1996. *Collimation of Fast Wide-Field Telescopes*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 108, 217.
- Mumpuni, E.S., L. Puspitarini, R. Priyatikanto, C.Y. Yatini, dan M. Putra, 2018. *Future Astronomy Facilities in Indonesia*. Nature Astronomy, 2, p. 930.
- Schechter, P.L., dan S. Levinson, 2011. *Generic Misalignment Aberration Patterns in Wide-Field Telescopes*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 123, 812.
- Schroeder, D., 2000. *Astronomical Optics: Second Edition*. San Diego: Academic Press.
- Zernike, F., 1934. *Diffraction Theory of the Knife-Edge Test and Its Improved Form, the Phase-Contrast Method*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 94, 377.



# **ANALYSIS OF RAINFALL CONDITIONS OVER NUSA TENGGARA BARAT DURING ENSO EVENTS BASED ON TRMM DATA (ANALISIS KONDISI CURAH HUJAN DI NUSA TENGGARA BARAT SELAMA TERJADINYA ENSO BERDASARKAN DATA TRMM)**

**Amalia Nurlatifah<sup>1</sup>, Eka Putri Wulandari<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Center of Atmospheric Science and Technology,  
Indonesian National Institute of Aeronautics and Space  
e-mail: amalianurlatifah92@gmail.com

Diterima 19 Agustus 2019; Direvisi 10 Maret 2020; Disetujui 6 Mei 2020

## **ABSTRACT**

Nusa Tenggara Barat (NTB) is part of the Indonesian Maritime Continent region whose weather conditions are influenced by the dynamics of the Pacific Ocean and Indian Ocean. One of the dynamics that influenced the rainfall condition is the ENSO phenomenon (El Niño and La Niña). This study analyzed rainfall response in NTB to ENSO phenomenon. The research data was taken from TRMM 3B43 with a monthly temporal resolution and 0.25° spatial resolution. Based on the analysis, it was found that El Niño phenomenon characterized by the heating of Sea Surface Temperature (SST) in Niño 3.4 had an impact on decreasing rainfall in NTB. In contrast, the La Niña phenomenon characterized by the cooling of SST in Niño 3.4 tends to have an impact on increasing rainfall in NTB. Nevertheless, the value of the increase and decrease of Niño 3.4 SST anomaly and rainfall in NTB itself is not linear. This is due to the periodicity between rainfall and the Niño 3.4 index is not uniform. The rainfall in NTB follows a monsoonal pattern while the SST of Niño 3.4 tends to follow 2-7 years period. However, the correlation between rainfall and Niño 3.4 anomaly in the ENSO event showed a strong correlation with correlation value at 6 stations reaching smaller than -0.5. Spatially, almost all areas in NTB in El Niño month experience a decrease in rainfall. In contrast, almost all areas in NTB in the month of La Niña experience an increase in rainfall. Sumbawa Island has the smallest decrease or increase in rainfall during El Niño or La Niña. That means, the influence of the ENSO phenomenon in this region tends to be weak.

Keywords: *El Niño, La Niña, NTB rainfall, TRMM 3B43*

## **ABSTRAK**

Nusa Tenggara Barat (NTB) adalah bagian dari wilayah Benua Maritim Indonesia yang kondisi cuacanya sangat dipengaruhi oleh dinamika Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Salah satu dinamika yang mempengaruhi kondisi curah hujan adalah fenomena ENSO (El Niño dan La Niña). Studi ini menganalisis respons curah hujan di NTB terhadap fenomena ENSO. Data penelitian diambil dari TRMM 3B43 dengan resolusi temporal bulanan dan resolusi spasial 0,25°. Hasil analisis menemukan bahwa fenomena El Niño yang ditandai dengan pemanasan temperatur permukaan laut (TPL) di wilayah Niño 3.4 berdampak pada penurunan curah hujan di NTB. Sebaliknya, fenomena La Niña yang ditandai dengan pendinginan TPL di wilayah Niño 3.4 cenderung berdampak pada peningkatan curah hujan di NTB. Namun demikian, nilai kenaikan dan penurunan anomali TPL Niño 3.4 dan curah hujan di NTB sendiri tidak linear. Hal ini disebabkan periodisitas antara kenaikan dan penurunan curah hujan dan indeks Niño 3.4 tidak seragam. Kenaikan dan penurunan curah hujan di NTB mengikuti pola muson, sedangkan TPL Niño 3.4 cenderung mengikuti periode 2-7 tahun. Namun demikian, pada kejadian ENSO korelasi antara curah hujan dan TPL Niño 3.4 menunjukkan korelasi yang kuat dengan nilai korelasi di 6 stasiun mencapai lebih kecil dari -0,5. Secara spasial, hampir semua wilayah di NTB mengalami penurunan curah hujan pada saat El Niño. Sebaliknya, hampir semua wilayah di NTB mengalami peningkatan curah hujan pada saat La Niña. Penurunan atau peningkatan curah hujan

terkecil selama El Niño atau La Niña terjadi di barat daya Pulau Sumbawa. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh fenomena ENSO di wilayah tersebut cenderung lemah.

Kata kunci: *El Niño, La Niña, curah hujan NTB, TRMM 3B43*

## 1 INTRODUCTION

Indonesia's geographical location in the equator makes Indonesia strongly influenced by the movement of inter-tropical convergence zone position (ITCZ), so that the variability of Indonesian rainfall both monthly and seasonally is influenced by monsoonal system (western/wet and east/dry monsoon) (Ramage, 1971). Moreover, Indonesia is a maritime country that located between the Pacific Ocean and Indian Ocean. Changes in weather and climate conditions in both oceans can affect weather and climate conditions in Indonesia.

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the interaction between the ocean and atmosphere in Pacific Ocean. Similar event occurring in the Indian Ocean Equator is known as the Indian Ocean Dipole (IOD). Both events can affect the humidity, wind and rainfall conditions in Indonesia. The impacts for each region vary depend on the topography and geography (Mulyana, 2002).

ENSO is a phenomenon of deviation of sea surface temperature that characterized by a shift of warm water columns between the Western Pacific and the Central Pacific. ENSO consists of El Niño and La Niña. El Niño occurs when sea surface temperature in the Niño 3.4 region (Pacific Region in 5°N-5°S, 120°W-170°W) is warmer than usual, whereas La Niña occurs when sea surface temperature in the Niño 3.4 region becomes cooler than usual. Interaction between ENSO and rainfall in Indonesia can be seen based on the value of Southern Oscillation Index (SOI). SOI is the difference between surface air pressure in East Pacific region measured in Tahiti (Hawaii) and the Western Pacific region measured in Darwin (Australia) (NCDC, 2019). According to Salmawati

(2010), when SOI value less than -5 for 3 consecutive months in a year, then it is expressed as El Niño year. Whereas the value of SOI more than 5 for 3 consecutive months, then the year can be expressed as La Niña year.

Similar to ENSO, IOD is also characterized by shifting warm water columns. The difference from ENSO, IOD is shifting of warm water column that occur between the Western Indian Ocean (East African Coast) and Southeast (West Coast of Sumatra) Indian Ocean. IOD condition can be seen based on the magnitude of Dipole Mode Index (DMI) which is the gradient of West and Southeast Indian Ocean air pressure. Because IOD is a coupling of ocean-atmosphere interactions, the IOD condition can also be represented by other climatic parameters such as air pressure. A positive DMI score indicates a positive IOD event that can generally lead to a lack of rainfall in Indonesia, and vice versa.

ENSO and IOD occur independently, but the interaction of these two events can either reinforce or weaken of each event (Ashok et al., 2003). Positive ENSO events along with positive IOD will decrease the annual and seasonal rainfall in Indonesia (Tjasyono et al., 2008). Based on the NOAA Climate Prediction Center (CPC) data, 1997 and 2015 are indicated as years with strong positive El Niño phase. Both of these years caused a long and severe drought in most parts of Indonesia. However, according to the National Disaster Management Agency (BNPb), the dry season in 1997 caused more severe impacts than in 2015 because of a strong positive Niño 3.4 in 1997 along with strong positive IOD while in 2015 IOD condition is still relatively neutral.

Nusa Tenggara Barat (NTB) is part of Indonesia Maritime Continent (IMC) and is located in the southeast of the IMC area. Aldrian and Susanto (2003) classify this area into a monsoonal precipitation zone where the peak of monthly rainfall occurs in DJF season (December - January - February) and the lowest rainfall occurs in JJA season (June-July-August). This study aims to describe how the rainfall conditions in NTB temporally when El Niño (Niño 3.4 anomaly is positive) and La Niña (Niño 3.4 anomaly is negative) occurred.

## **2 MATERIALS AND METHODOLOGY**

### **2.1 Data**

The following data were used in this research.

1. Monthly rainfall data throughout NTB was obtained from TRMM 3B43 with 0.25° spatial resolution. In accordance grid data with NTB's BMKG observation station points were used, namely in Batujai, Dompu, Gapit, Gunungsari, Ijobalit, Jurangsate, Kabul, Kadindi, Keru, Keruak, Kumbe, Kuripan, Lingkoklime and Loangmake. Data used for this research is TRMM 3B43 from 1998 to 2017. These points are illustrated on the map in Figure 2-1. TRMM 3B43 data is obtained from <https://disc.gsfc.nasa.gov/SSW/#keywords=3B43>.

Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) is a product of the orbiting satellite collaboration of National Aeronautics and Space Administration (NASA) and Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA) aimed at studying rainfall conditions in the tropics. The first TRMM satellite was launched in November 1997. With three sensors owned, satellites have been able to observe data such as rain structures, tropical and subtropical distribution and

their role to find out the mechanisms of global climate change and monitoring of environmental variations. The three TRMM sensors are Precipitation Radar (PR), TRMM Microwave Imager (TMI), and Visible Infrared Scanner (VIRS). PR is the first space tool designed to provide a three-dimensional plot of storm structure. It has a horizontal resolution of about 5 km with 247 km swath width. PR can provide a vertical profile of rain and snow from the surface up to a height of 20 km and sensitive to light rainfall levels (0.5 mm.hr<sup>-1</sup> rain rate). TMI is a passive microwave sensor based on Special Sensor Microwave / Imager (SSM / I) and can measure radiation intensity at 10.7, 19.4, 21.3, 37 and 85.5 GHz. VIRS can capture radiation in visible and infrared wavelengths of 0.63, 1.6, 10.8 and 12 micrometers, and has a horizontal resolution of 2.4 km and a swath width of approximately 833 km.

TRMM satellite observation data is divided into 3 levels based on type and shape. Level 1 is raw data that has been radiometrically calibrated and geometric correction. Level 2 data is a picture of the geophysical parameters of rain. Level 3 data already has rain value, especially the monthly condition which is a combination of rain condition from level 2.

TRMM level 3, TRMM 3B43 version 7, was used in this study. TRMM 3B43 is a product of TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA) in the form of rainfall value estimation, resulted from satellite rainfall prediction data (Sensor TRMM, IR, SSM / I and COMB) with observation data. It makes TMPA product has better accuracy than the original data (Mehta et al., 2008). TRMM 3B43

has a spatial resolution of  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  with coverage from  $50^{\circ}N$  to  $50^{\circ}S$  and  $180^{\circ}W$ - $180^{\circ}E$  (NASA, 2012).

Validation of TRMM 3B43 data has been done in several studies as conducted by Fleming et al. in 2011. Their result shows that cross-correlation data value of TRMM 3B43 with measurement data is more than 0.90 for Australia region. Result from Principal Component Analysis show that the existence of spatial and temporal variation patterns is very similar between TRMM 3B43 data with measurement rainfall data results. The correlation of TRMM 3B43 with

the measurement data shows the value higher than 0.60 for the territory of Indonesia (Mamenun et al., 2014). The suitability of TRMM 3B43 data and the measurement data is strongly influenced by Indonesia's topographical and ocean condition, and also the monsoonal pattern (As-syakur et al., 2013).

2. Sea surface temperature (SST) anomaly were calculated to get Niño 3.4 index. Niño 3.4 SST data were obtained from [https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos\\_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.data](https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.data). Figure 2-2 shows the SST Niño 3.4 anomaly.



Figure 2-1. Location of BMKG observation station

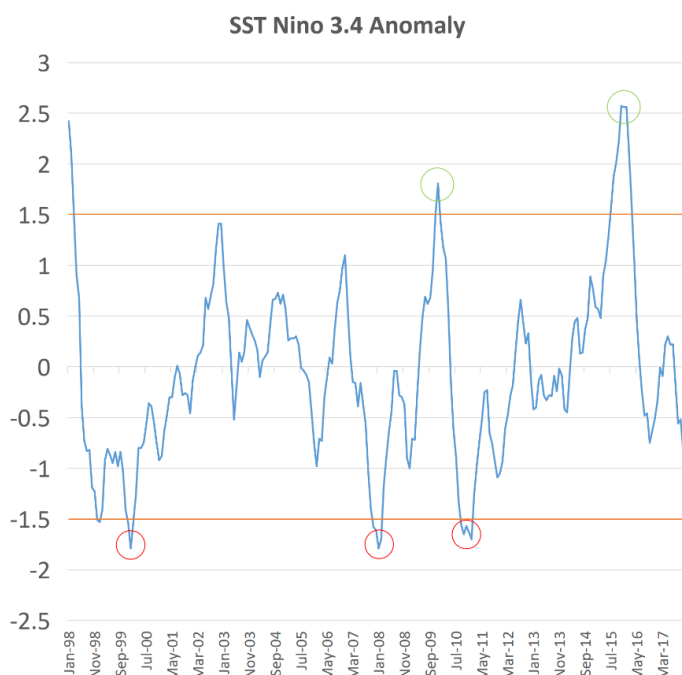


Figure 2-2. SST Niño 3.4 anomaly (red circle: La Niña, green circle: El Niño)



Niño 3.4 anomaly data are grouped into 5 classifications of ENSO conditions. Table 1 is a classification of Niño 3.4 anomalies.

**TABLE 1.** ANOMALY VALUE OF NIÑO 3.4 SST

Anomaly Value of Niño 3.4 SST	Meaning
Anomaly > 2.5	Strong El Niño
2.5 > Anomaly > 0.5	El Niño
0.5 > Anomaly > -0.5	Neutral
-0.5 > Anomaly > -2.5	La Niña
-2.5 > Anomaly	Strong La-Niña

Based on Table 1, we can classify when El Niño and La Niña occurred (Table 2).

**TABLE 2.** CLASSIFICATION OF EL NIÑO, LA NIÑA, AND NEUTRAL CONDITIONS BASED ON SST NIÑO 3.4 ANOMALY VALUE

Condition	Time (years)
El Niño	1998, 2002, 2004, 2006, 2009, 2015
Netral	2000, 2001, 2003, 2005, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017
La Niña	1999, 2007, 2008, 2010, 2016

**2.2 Methods**

This research use Pearson correlation analysis and time series analysis. Figure 2-3 shows the flowchart of this research.

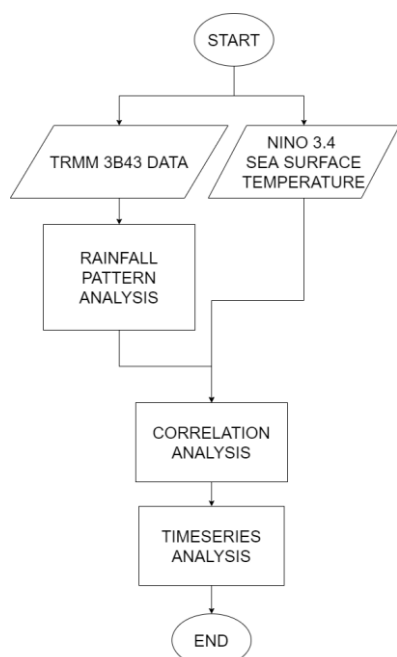


Figure 2-3. Flow chart of the research

The analysis of linear relationship between Niño 3.4 anomaly and rainfall is done by calculating Pearson correlation coefficient.

Pearson correlation is used to measure the strength of the relationship between the two variables. These variables are correlated if the changing of one variable are accompanied by changes in other variables. It should be remembered that even though the value of the correlation coefficient is small (not significant), it does not mean the two variables are not interconnected. It is possible that two variables have a strong relationship relationship, but the correlation coefficient value is near zero (for example, in the case of non-linear relationship). Thus, the correlation coefficient measures only the strength of the linear relationship. A strong linear relationship between two variables does not necessarily mean causality, cause and effect.

Pearson correlation is calculated by the following formula (Eq. 1):

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \dots \dots \dots (1)$$

where x is the SST anomaly data and y is rainfall data.

Table 3 shows the meaning of Pearson correlation value.

**TABLE 3.** CORRELATION VALUE MEANING

r > 0.5	strong positive correlation
0 < r < 0.5	weak positive correlation
r = 0	not correlated
-0.5 < r < 0	weak negative correlation
-1 < r < -0.5	strong negative correlation

**3 RESULTS AND DISCUSSION**

The result of rainfall composite data of TRMM 3B43 in 1998 - 2017 indicates that the peak rainfall in most of NTB occurred in December, January and February while the minimum rainfall occurred in June, July, August and September (Figure 3-1). This rainfall

pattern follows the monsoon precipitation pattern where rainfall is heavily influenced by monsoon phenomena (Ramage, 1971). Weather conditions in NTB are heavily influenced by Australian monsoon dynamics that blowing from the southeast of NTB and the Asian monsoon that blowing from the Pacific (Kirono et al., 2014).

In addition to the monsoon phenomenon, the weather dynamics in NTB may be influenced by other inter seasonal dynamics such as ENSO or IOD. Correlation analysis between the sea surface temperature anomaly in Niño 3.4 and rainfall anomaly in NTB based on TRMM 3B43 satellite monitoring was calculated for knowing how far the influence of inter-seasonal phenomenon dynamics to rainfall.

The strong El Niño and La Niña phenomena (1.5 to 1.9 SST anomaly) have occurred several times. In 1998, El Niño occurred in January - March and La Niña occurred in November - December. Very strong El Niño also recorded occurred in 2015 in June to December. Generally, almost all regions in Indonesia are experiencing lack of rainfall during strong El Niño, and vice versa (Hamada et al., 2002; Hendon, 2003). In this study, the relationship between SST and rainfall conditions in

NTB is expressed in terms of Pearson correlation coefficient.

In almost all seasons throughout the site, the correlation between the Niño 3.4 SST and rainfall anomalies tend to be negative (Figure 3-2.). This result indicates that if the Niño 3.4 anomaly is positive, then there is a tendency of rainfall in the fourteen observation points to have a negative anomaly. The negative correlation in this case also indicates if the Niño 3.4 have positive anomaly (El-Niño), then rainfall in NTB tends to decrease. Similarly, if the Niño 3.4 SST anomaly is negative or in other words Niño 3.4 SST cooler than usual (La Niña), then there is an indication of rainfall in NTB will increase. However, in terms of correlation coefficient value, this correlation value is still relatively weak according to Gulliford classification (Storch and Zwiers, 1999). The strongest correlation is only shown in the JJA season where the value reaches -0.4 (Figure 3-2). While in other seasons, especially DJF, the correlation value between the two variables averages below -0.2. This is probably due to the DJF season's predictability of rainfall in the IMC region is quite low when compared to the JJA season (Haylock and McBride, 2001).

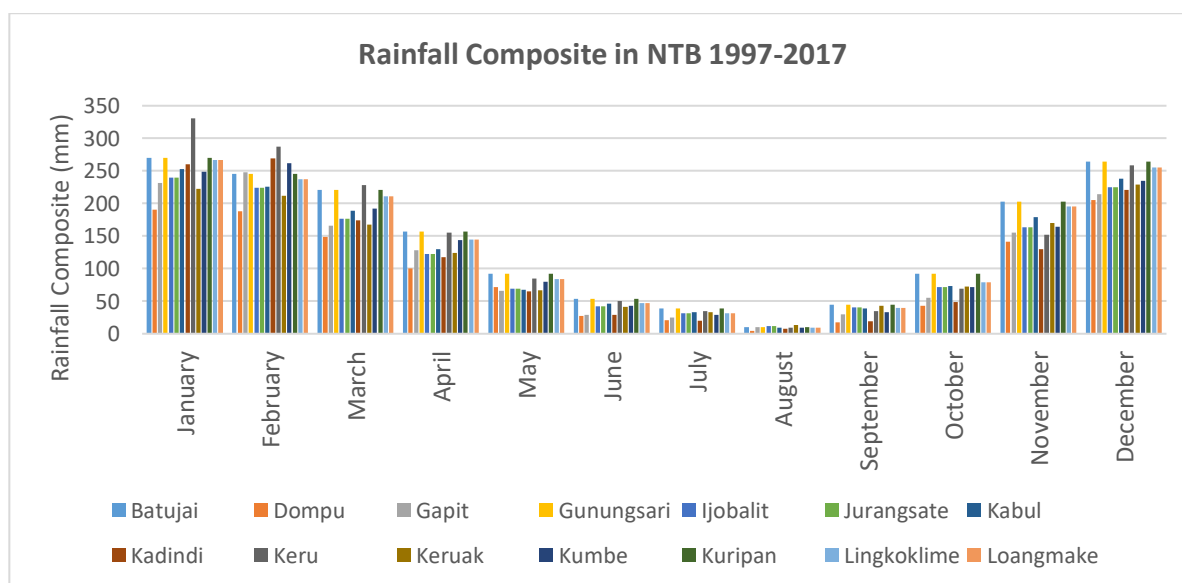


Figure 3-1. Rainfall composite in Nusa Tenggara Barat 1998-2017

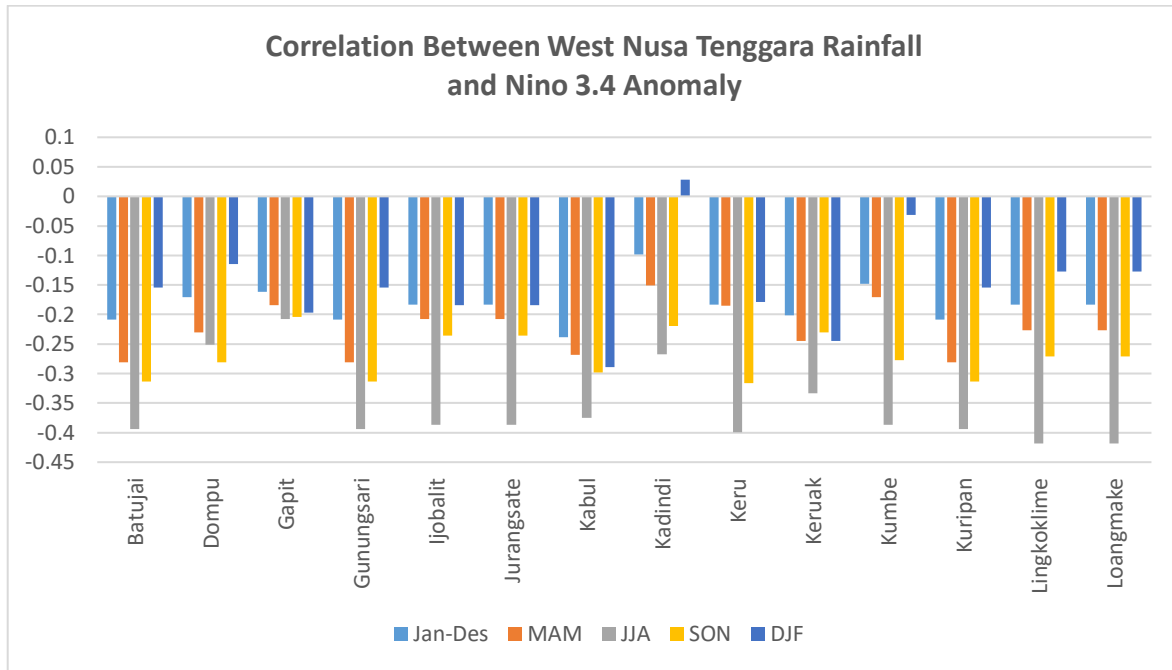


Figure 3-2. Coefficient correlation between NTB rainfall and Niño 3.4 anomaly

A time series analysis of rainfall anomalies at the fourteen points in NTB and Niño 3.4 SST anomaly was used to know the further relationship between ENSO phenomena and rainfall conditions in NTB. Generally, when the Niño 3.4 SST anomaly tends to be positive, the value of rainfall anomalies in the all regions tends to be negative (Figure 3-3). Otherwise, when the Niño 3.4 SST anomaly is negative, the rainfall anomaly in all regions tends to be positive (Figure 3.3). It re-emphasizes that if the Niño 3.4 SST tends to warmer than the average, then the rainfall anomaly in NTB tends to be less than its mean. Conversely, if the Niño 3.4 SST cooler than usual, there is a trend of rainfall in NTB will increase. However, the relationship between Niño 3.4 SST and rainfall in NTB does not always go in same direction. In January 1998, it was seen that the Niño 3.4 SST anomaly tended to be positive, but the rainfall anomaly was not negative (rainfall anomaly ~1)(Figure 3-3). This is likely due to lag time or lead time between ENSO phenomena and rainfall conditions in NTB (Barnston, 2012).

The correlation value between the Niño 3.4 index and the rainfall throughout the year and seasonally reaches the strongest value of -0.4. Negative values indicate that the relationship between the Niño 3.4 anomaly value and rainfall at the fourteen stations in NTB tends to be the opposite. This means that if Niño 3.4 heats up (positive anomaly), the rainfall in the fourteen stations in NTB tends to decrease, and vice versa. However, the value -0.4 is still relatively weak according to Guilford's classification. This is likely due to the decrease and increase periodicity in Niño 3.4 SST which tends to be different from rainfall in NTB. The increase of rainfall in NTB tends to rise and fall following the pattern of monsoonal rainfall where each year the rainfall tends to be low in the June - July - August (JJA) season and becomes high in the December-January-February (DJF) season. Different things happen to SST of Niño 3.4 where the value of the increase in Niño 3.4 occurs over a period of 2-7 years. Therefore, the inverse relationship tends to be seen between the Niño 3.4 SST anomaly and rainfall in NTB because the periodicity of

the increase and decrease between the two variables is different.

To be able to emphasize the relationship between Niño 3.4 SST and rainfall in NTB, a Pearson correlation was calculated when ENSO occurred. The criteria for the occurrence of ENSO is when the anomaly value of Niño 3.4 SST is more than 1. If the Niño 3.4 SST anomaly is less than -1, then there will be a cooling SST in Niño 3.4 region which means La Niña.

There were 28 El Niño and La Niña occurrences during the 1997 - 2018

calculated from the Niño 3.4 SST anomaly value. After calculating the correlation value, it is seen that the correlation between NTB rainfall and Niño 3.4 SST anomaly tends to strengthen negatively. It can be seen in Figure 3-4 that in most of observation stations the value tends to be below -0.48. There are 6 stations showing a strong negative correlation value because the correlation tends to be smaller than -0.5

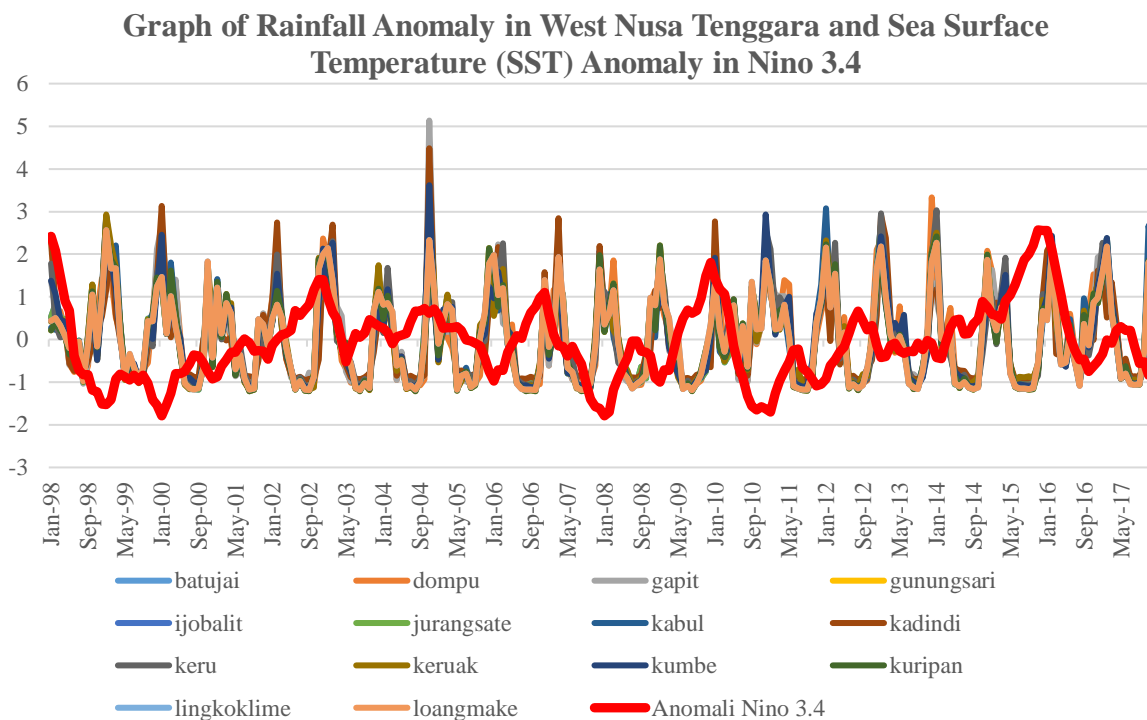


Figure 3-3. Graph of rainfall anomaly in NTB and SST anomaly in Niño 3.4

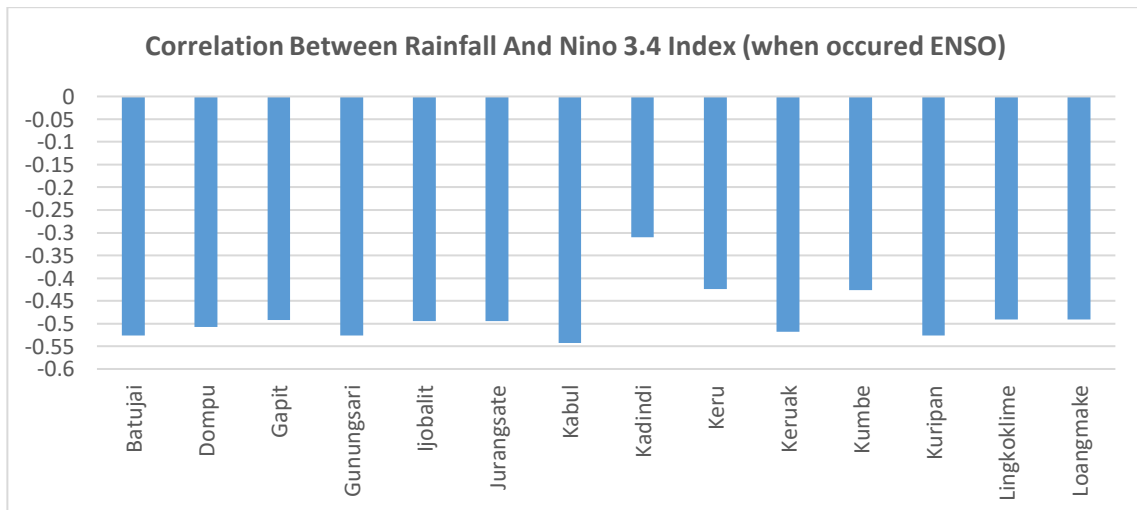


Figure 3-4. Correlation between rainfall and Niño 3.4 SST anomaly (when ENSO occurred)

Spatial analysis of deviation values or changes in rainfall across the entire NTB region was calculated to see the response of spatial rainfall to the ENSO phenomenon. This analysis is done by reducing monthly rainfall in El Niño or La Niña months with an average rainfall of 20 years from 1998-2017. El Niño in November 2015 was chosen with index value 2.57. The month of La Niña was chosen in January 2008 with an anomaly value -1.79.

Spatially, in El Niño month, the rainfall in almost all NTB areas decreased compared to the average. This is evidenced by the spatial plot of rainfall anomaly in NTB in October 2015 which state that in the month of El Niño almost the entire region experiences a water shortage (negative anomaly) when compared with the average (Figure 3-5). The biggest shortfall occurs in the area of the Bali Sea, whereas the smallest changes occur in the southwest region of Sumbawa Island where the anomaly is only about 40 mm (Figure 3-5).

Spatially, in the month of La Niña almost all areas in Sumbawa Island experienced an increase in rainfall (Figure 3-6). However, if in El Niño the deviation or decrease of rainfall is in ranges up to 40 mm, then in the month of La Niña the deviation reach 80 mm (Figure 3-6). Interestingly, the smallest deviations or smallest rainfall changes in both El Niño and La Niña occur on the

Northwest Sumbawa Island. In El Niño conditions, rainfall reduction only occurs about 160 mm (Figure 3-5) while at the time of La Niña the change reaches 80 mm (Figure 3-6).

In El Niño month, not all values of rainfall anomaly in NTB are negative (in the other words rainfall is reduced). In March 2016, the value of the Niño 3.4 index ranged at 1.6. However, the rainfall anomaly in almost all areas of NTB is positive (Figure 3-7). Thus, it can be concluded that generally, the response of rainfall in almost all areas of NTB to the phenomenon of El Niño is the reduction of rainfall value or the tendency of drought. While, the response of rainfall in NTB to La Niña phenomenon is the increase of rainfall value.

However, this response is not always consistent with the magnitude of the anomalies SST Niño 3.4. That is, the increase and decrease of Niño 3.4 SST is not always in line with the decrease or increase in rainfall in NTB. This is what causes the relationship between Niño 3.4 anomaly and rainfall in NTB is not linear so the value of correlation coefficient is small. In other words, El Niño strongly influence the reduction of rainfall in NTB, and La Niña strongly influence the increase of rainfall in NTB, but how far its influence can not be determined because rainfall in NTB itself is much influenced by other phenomena.

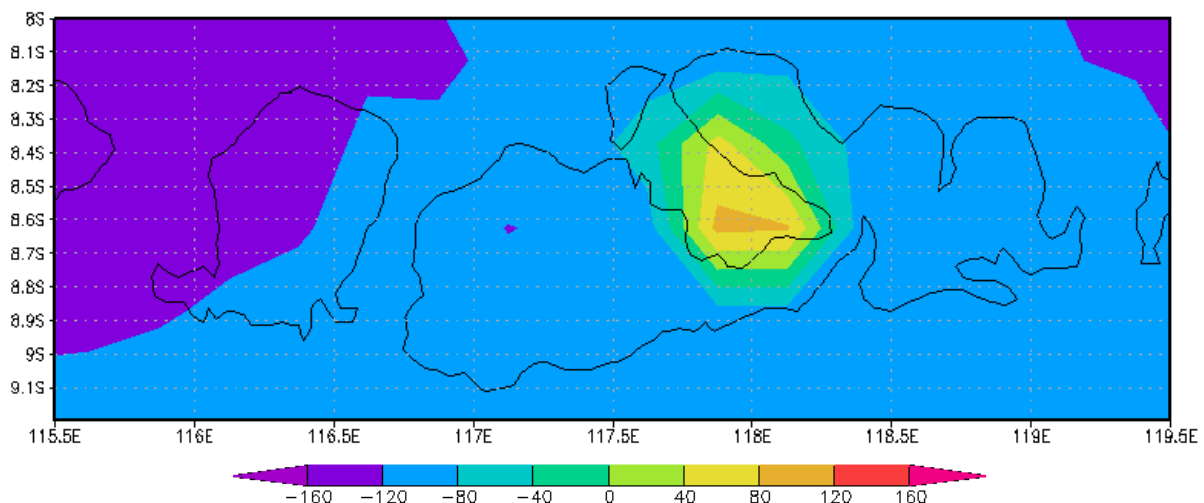


Figure 3.5. Rainfall anomaly in NTB October 2015 (month of El Niño)

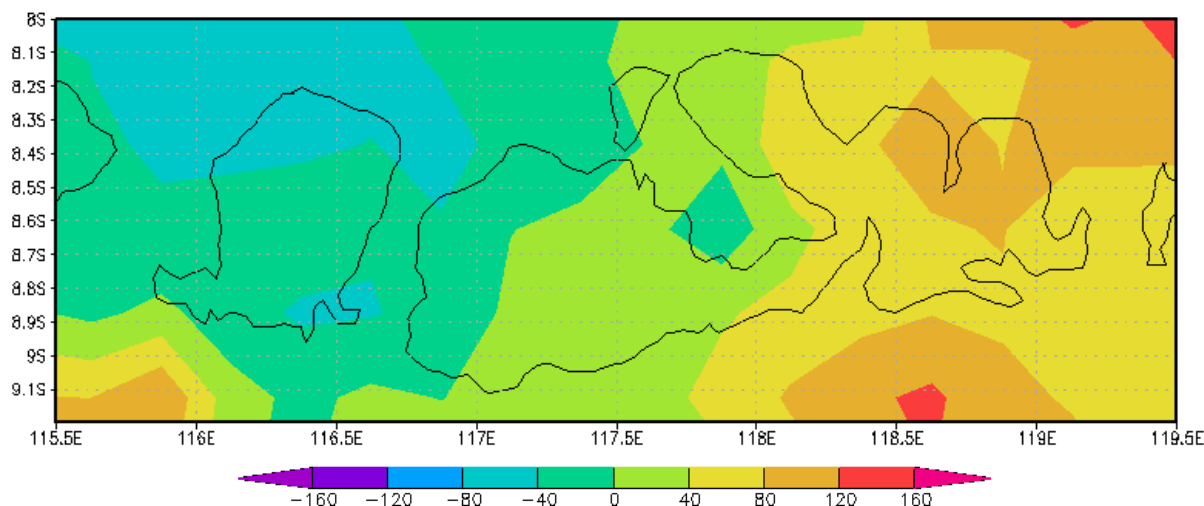


Figure 3-6. Rainfall anomaly in NTB in November 1998 (month of La Niña)

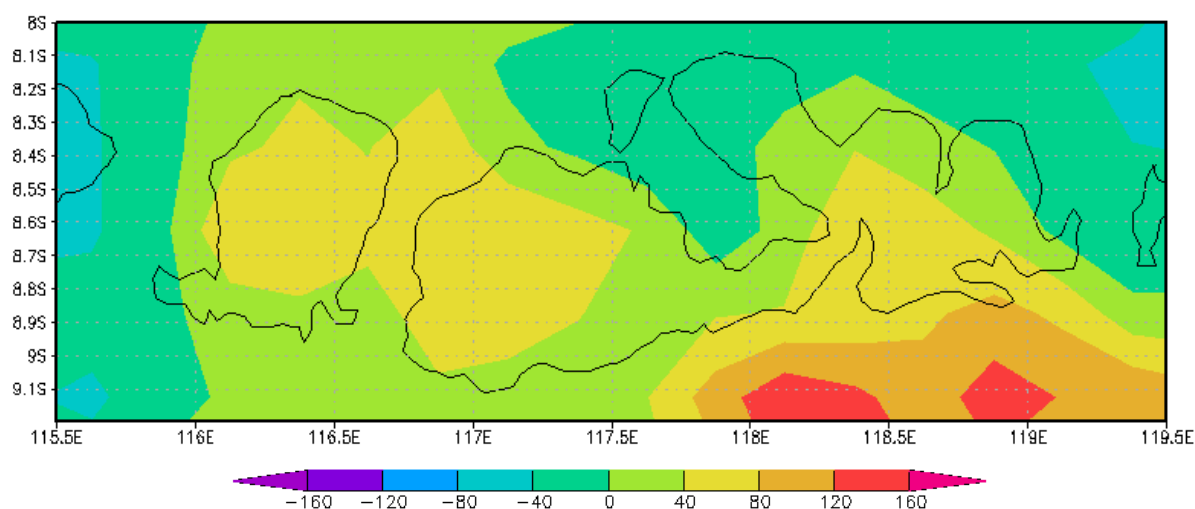


Figure 3-7. Rainfall anomaly in NTB in March 2016 (month of El Niño)

#### 4 CONCLUSIONS

If El Niño (SST of Niño 3.4 warming/ positive anomaly) occurs, then rainfall in NTB tends to decrease (has a negative anomaly). Otherwise, if La Niña occurs (SST of Niño 3.4 cooling / negative anomaly), then rainfall in NTB tends to increase (has a positive anomaly).

#### ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank Prof. Dr. Eddy Hermawan for his helpful advice and comments. This research was supported by Center of Atmospheric Science and Technology, National Institute of Aeronautics and Space.

#### REFERENCES

Ashok, K., Z. Guan, T. Yamagata, 2003. *A Look at the Relationship between the ENSO and the Indian Ocean Dipole*, Journal of

the Meteorological Society of Japan, 81(1), 41-56.

As-Syakur, A. R., T. Tanaka, T. Osawa, M. S. Mahendra, 2013. *Indonesian Rainfall Variability Observation using TRMM Multi-Satellite Data*, International Journal of Remote Sensing, 0(0), 1-16.

Barnston, A. G., M. K. Tippett, M. L. L'Heureux, S. Li, D. G. DeWitt, 2012. *Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002–11: Is Our Capability Increasing?*, Bulletin of American Meteorological Society, 93, 631-651.

Fleming, K., J. L. Awange, M. Kuhn, W. E. Featherstone, 2011. *Evaluating the TRMM 3B43 Monthly Precipitation Product using Gridded Rain-Gauge Data over Australia*, Journal Australian Meteorological and Oceanographic, 61(1), 171-184.

- Hamada, J., M. Yamanaka, J. Matsumoto, S. Fukao, P. Winarso, P. Sribimawati, 2002. *Spatial and Temporal Variations of the Rainy Season over Indonesia and Their Link to ENSO*, Journal of the Meteorological Society of Japan, 80(2), 285-310, <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.285>.
- Haylock, M., J. McBride, 2001. *Spatial Coherence and Predictability of Indonesian Wet Season Rainfall*. Journal of Climate, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3882:SCAPOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3882:SCAPOI>2.0.CO;2)
- Hendon, H., 2003. *Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air-Sea Interaction*, Journal of Climate, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1775:IRVIOE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1775:IRVIOE>2.0.CO;2)
- Mehta, A. V., S. Yang, 2008. *Precipitation Climatology over Mediterranean Basin from Ten Years of TRMM Measurements*, Advanced Geosciences, 17, 87-91.
- Mamenun, M., H. Pawitan, A. Sopaheluwakan, 2014. Validasi dan Koreksi Data Satelit TRMM Pada Tiga Pola Curah Hujan di Indonesia, Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 15(1).
- Mulyana, E., 2002. *Pengaruh Dipole Mode terhadap Curah Hujan di Indonesia*, Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca, 3(1), 39-43.
- NASA, 2017. *Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM: Data Products and Usage*, accessed [https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/national-weather-center/P3\\_TRMM\\_Overview\\_Oklahoma\\_2012.pdf](https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/national-weather-center/P3_TRMM_Overview_Oklahoma_2012.pdf), 27 September 2019.
- NASA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, 2017. *Readme Document for the Tropical Rainfall Measurment Mission (TRMM) Version 7*, accessed [https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM\\_L3/TRMM\\_3B43/doc/README.TRMM\\_V7.pdf](https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B43/doc/README.TRMM_V7.pdf), 28 March 2018.
- NOAA, 2019. *El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion*, accessed <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>, 19 August 2019.
- Ramage, C., 1971. *Monsoon Meteorology*, International Geophysics Series, vol. 15, San Diego, CA: Academic Press.
- Salmawati, 2010. *Studi Pengaruh Indeks Osilasi Selatan sebagai Indikator ElNino terhadap curah hujan di Sulawesi Utara*, Skripsi Sarjana FMIPA Unsrat.
- Storch, H. and F. W. Zwiers, 1999. *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, 484 p.
- Tjasyono, B., A. Lubis, I. Juaeni, Ruminta, S. W. B. Harijono, 2008. *Dampak Variasi Temperatur Samudera Pasifik dan Hindia Ekuator terhadap Curah Hujan di Indonesia*, Jurnal Sains Dirgantara, 5(2), 83-95.

