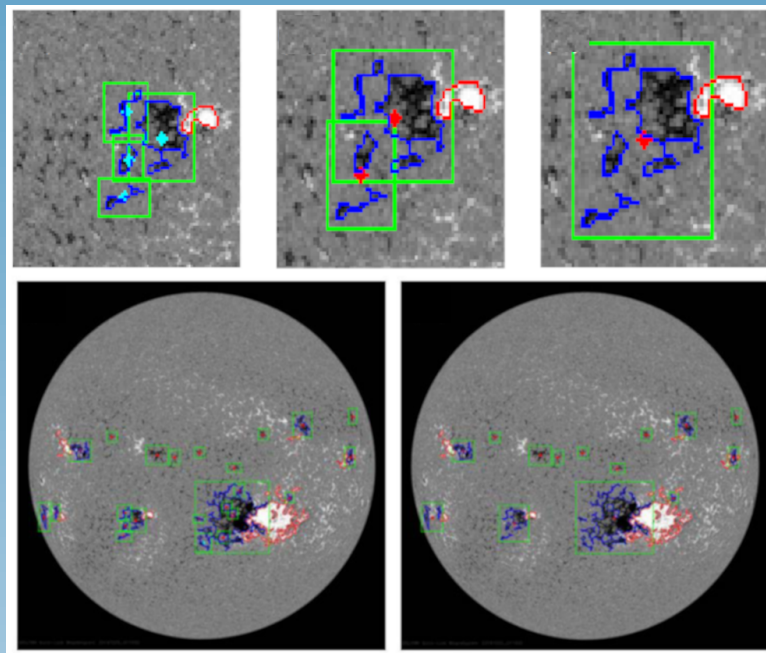


# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 18 No. 2 Juni 2021

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. 18

No. 2

Hal. 54-110

Bandung, Juni 2021

ISSN 2597-7873

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

**Vol. 18 No. 2 Juni 2021**

**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. Rhorom Priyatikanto

### **Editor**

Dr. Trismidianto (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

Dr. Noersomadi (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

Fitri Nuraeni, M.Si. (Fisika Magnetosferik dan Ionosferik)

Dr. Johan Muhamad (Astronomi dan Astrofisika)

Tiin Sinatra, M.Si. (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

### **Korektor Naskah**

Dr. Wiwiek Setyawati

Visca Wellyanita, M.Si.

Risyanto, M.Sc.

Emmanuel Adetya, S.Kom.

Santi Sulistiani, M.Si.

Ferdhiansyah Noor, S.Kom.

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

### **Pemimpin Umum**

Ir. Halimurrahman, M.T.

### **Pemimpin Redaksi Pelaksanaan**

Dra. Clara Yono Yatini, M.Sc.

Dr. Didi Satiadi

### **Redaksi Pelaksana**

Amalia Nurlatifah, M.T.

M. Faizal Eko Saputro, S.Kom.

Devi Rafsanjani, S.Kom.

### **Penata Letak**

Anton Winarko, S.Si.

Gammameridianti, S.Si.

Siti Maryam, S.T.

Indah Susanti, 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: Deteksi otomatis daerah aktif Matahari berdasarkan magnetogram dari SDO/HMI (lihat Utama & Dani, halaman 70-71)

### **Alamat Penerbit**

LAPAN Jl. Dr. Djundjungan 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. 18 No. 2 Juni 2021

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

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

## **DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>DETEKSI OTOMATIS DAERAH TERANG DI SISI JAUH MATAHARI UNTUK PREDIKSI KEMUNCULAN BINTIK</b> <i>(AUTOMATIC FAR-SIDE BRIGHT REGION DETECTION FOR PREDICTING SPOTS APPEARANCE)</i> Nurzaman, M. Z., Muhamad, J., Kesumaningrum, R., Sulistiani, S., Pangestu, A. D.	55 – 62
<b>DETEKSI OTOMATIS DAERAH AKTIF DARI CITRA SDO/HMI MAGNETOGRAM MATAHARI MENGGUNAKAN ADAPTIVE CENTROID CLUSTERING</b> <i>(AUTOMATIC DETECTION OF ACTIVE REGION FROM SDO/HMI MAGNETOGRAM IMAGE USING ADAPTIVE CENTROID CLUSTERING)</i> Utama, A. Z., Dani, T.	63 – 76
<b>IDENTIFIKASI DAN KARAKTERISTIK CO-ROTATING INTERACTION REGION GEOEFEKTIF</b> <i>(IDENTIFICATION AND CHARACTERISTICS OF GEOEFFECTIVE CO-ROTATING INTERACTION REGIONS)</i> Winarko, A., Nuraeni, F.	77 – 88
<b>EVALUASI SKEMA PARAMETERISASI MODEL WRF UNTUK PENGAMATAN KEMUNCULAN AWAN DARI SATELIT HIMAWARI-8 DI ATAS INDONESIA</b> <i>(EVALUATION OF WRF MODEL PARAMETERIZATION SCHEMES FOR OBSERVATION OF CLOUD OCCURENCES FROM HIMAWARI-8 SATELLITE OVER INDONESIA)</i> Lasmono, F., Risyanto, Fathrio, I.	89 – 98
<b>PERUBAHAN KARAKTERISTIK CURAH HUJAN JANGKA PANJANG DI PROVINSI JAWA BARAT TAHUN 1921-2010</b> <i>(LONG-TERN CHANGES IN RAINFALL CHARACTERISTICS IN WEST JAVA PROVINCE)</i> Sigid, M. F., Abdillah, M. R., Dupe, Z. L.	99 – 110

# JURNAL SAINS DIRGANTARA Journal of Aerospace Sciences

Vol. 18 No. 2 Juni 2021

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. 18, No. 2, Juni 2021, hadir ke hadapan sidang pembaca dengan menengahkan 5 (lima) artikel dengan beragam bidang fokus. Dalam kondisi pandemi COVID-19 serta pembatasan sosial selama ini, editorial Jurnal Sains Dirgantara telah berusaha sekuat tenaga untuk terus menjangkau dan memroses makalah yang ada.

Pada terbitan kali ini, Nurzaman *et al.* (halaman 55) menyampaikan hasil pengembangan algoritma deteksi otomatis daerah terang di sisi jauh Matahari yang diperkirakan akan menjadi daerah aktif. Utama & Dani juga menyampaikan evaluasi algoritma deteksi otomatis daerah aktif yang berprinsip pada *adaptive centroid clustering* (halaman 63). Hasil penelitian keduanya berkontribusi dalam pemantauan daerah aktif yang berkemungkinan mempengaruhi cuaca antariksa di Bumi. Dari perspektif lain, Winarko & Nuraeni menyampaikan hasil identifikasi dan karakterisasi *co-rotating interaction regions* (CIR) yang merupakan salah satu fenomena kunci dalam memahami badai geomagnet (halaman 77). Khasanah pengetahuan atmosfer di atas wilayah Indonesia turut diperkaya oleh studi Lasmono *et al.* (halaman 89) dan Sigid *et al.* (halaman 99). Makalah Lasmono *et al.* membahas kinerja skema parameterisasi model WRF sementara makalah Sigid *et al.* menyoroti perubahan karakteristik curah hujan di Jawa Barat selama hampir satu abad.

Kami berterima kasih kepada sejumlah kolega 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. Adi Sujiwo (IPB)
- Anwar Santoso, M. Si. (LAPAN)
- Dr. Dhani Herdiwijaya (ITB)
- Dr. Muhammad Abdilla (ITB)
- Dr. Suaidi Ahadi (BMKG, STMKG)
- Dr. Teguh Harjana (LAPAN)
- Tiar Dani, M. Si. (LAPAN)
- Dr. Wendi Harjupa (LAPAN)

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, Juni 2021

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

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

Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 30-10-2020

Direvisi: 06-01-2021

Disetujui: 11-01-2021

## Korespondensi:

Muhamad Zamzam Nurzaman  
mzn5412@gmail.com

## ABSTRAK

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

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

## ABSTRACT

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

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

## 1. Pendahuluan

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

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

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

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

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

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

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

Hasil penelitian Liewer *et al.* (2017) menggunakan data tahun 2011-2012 atau saat puncak siklus. Selain itu, belum ada penelitian deteksi daerah aktif secara *near real-time* untuk mendukung aplikasi prediksi *flare* terkini. Oleh karena itu, penelitian kami mengenai deteksi otomatis daerah terang di sisi jauh dapat dimanfaatkan untuk keperluan praktis prediksi *flare* terkini, khususnya dalam sistem layanan informasi cuaca antariksa milik Pusat Sains Antariksa, LAPAN yaitu *Space Weather Information and Forecast Services* (SWIFTS<sup>1</sup>). Selain itu, data yang kami gunakan adalah data awal siklus ke-25 sehingga dapat melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya. Tulisan ini dibuat dalam sistematika yang dimulai dari Bab Pendahuluan, kemudian dilanjutkan dengan Data dan Metodologi. Bab selanjutnya adalah Hasil dan Pembahasan, lalu ditutup dengan Kesimpulan.

## 2. Data dan Metodologi

### 2.1. Data

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

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

---

<sup>1</sup> <http://swifts.sains.lapan.go.id/>

karena plasma panas yang berkaitan dengan aktivitas *flare* dapat terdeteksi dengan jelas. Data STEREO/EUVI-195 diunduh melalui laman STEREO *Science Center*<sup>2</sup>. Kami juga memakai data *quicklook* dari instrumen AIA 193 angstrom<sup>3</sup> pada wahana SDO untuk data sisi dekat Matahari.

## 2.2. Metode

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

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

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

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

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

dengan  $\varphi$  adalah lintang dan  $\Omega$  dalam derajat/hari.

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

Akan ada dua kemungkinan. Pertama, daerah terang tidak akan sampai ke sisi dekat tepi timur karena intensitasnya semakin melemah sehingga tidak sesuai kriteria lagi dan proses *monitoring* dinyatakan selesai. Kemungkinan kedua, daerah terang bertahan sampai sisi dekat tepi timur dan kemudian posisinya dibandingkan dengan data harian daerah aktif dari SWPC<sup>4</sup> untuk menentukan daerah terang tersebut menjadi bintik atau *plage*.

## 3. Hasil dan Pembahasan

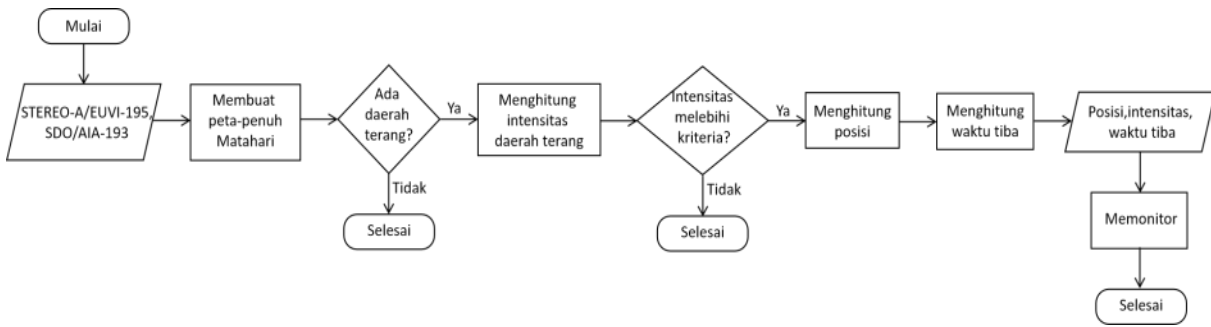
Hasil dari langkah pertama proses deteksi daerah terang di sisi jauh yaitu membuat peta penuh Matahari, dapat dilihat pada Gambar 2 atas. Bagian sisi dekat yang merupakan gabungan dari sebagian citra STEREO-A/EUVI 195 dan SDO/AIA 193 A berada di posisi bujur  $-90^\circ$  (sisi timur) hingga  $90^\circ$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

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

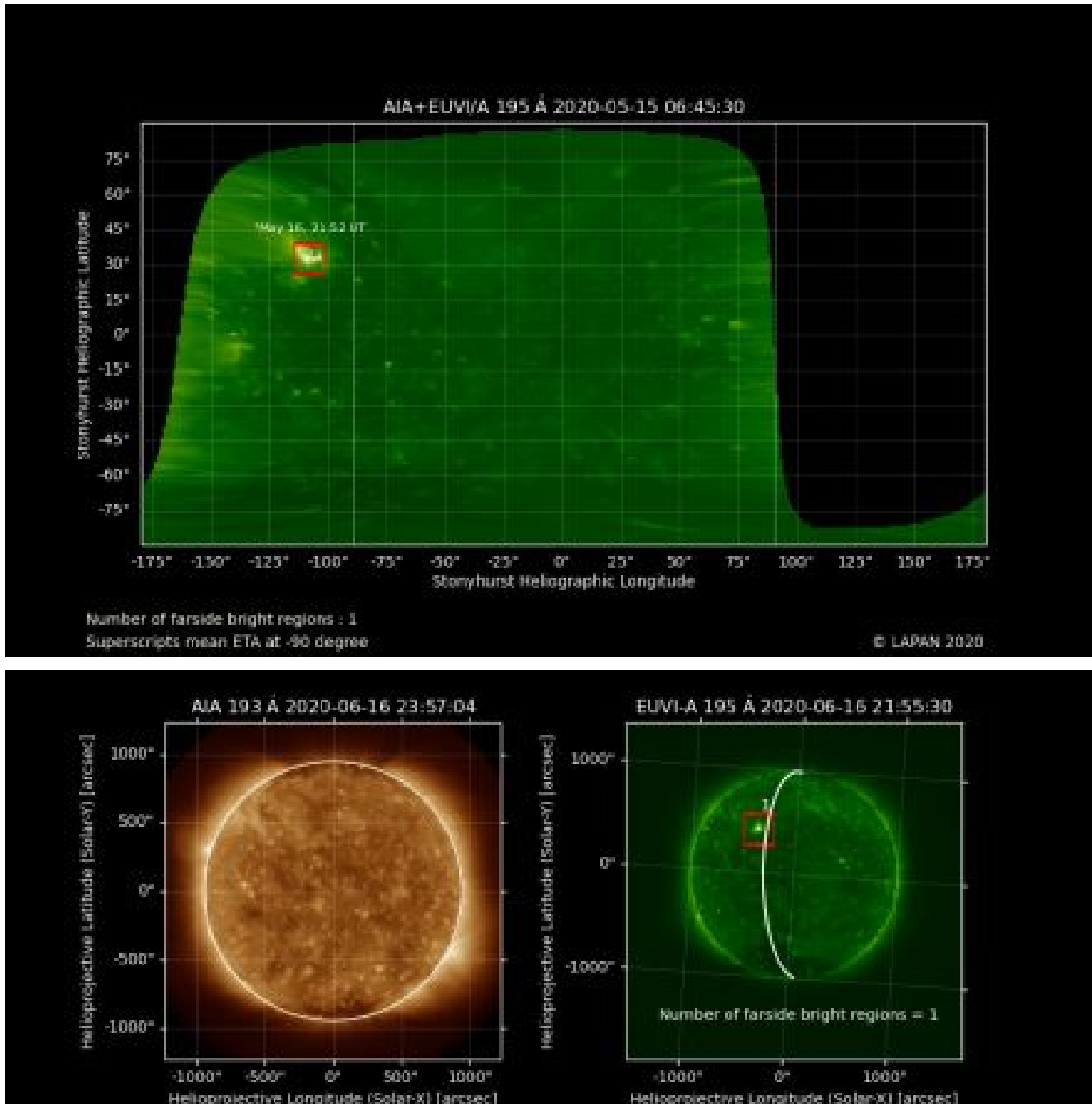
<sup>3</sup> <http://sdo.oma.be/latest/data/0193>

<sup>4</sup>

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

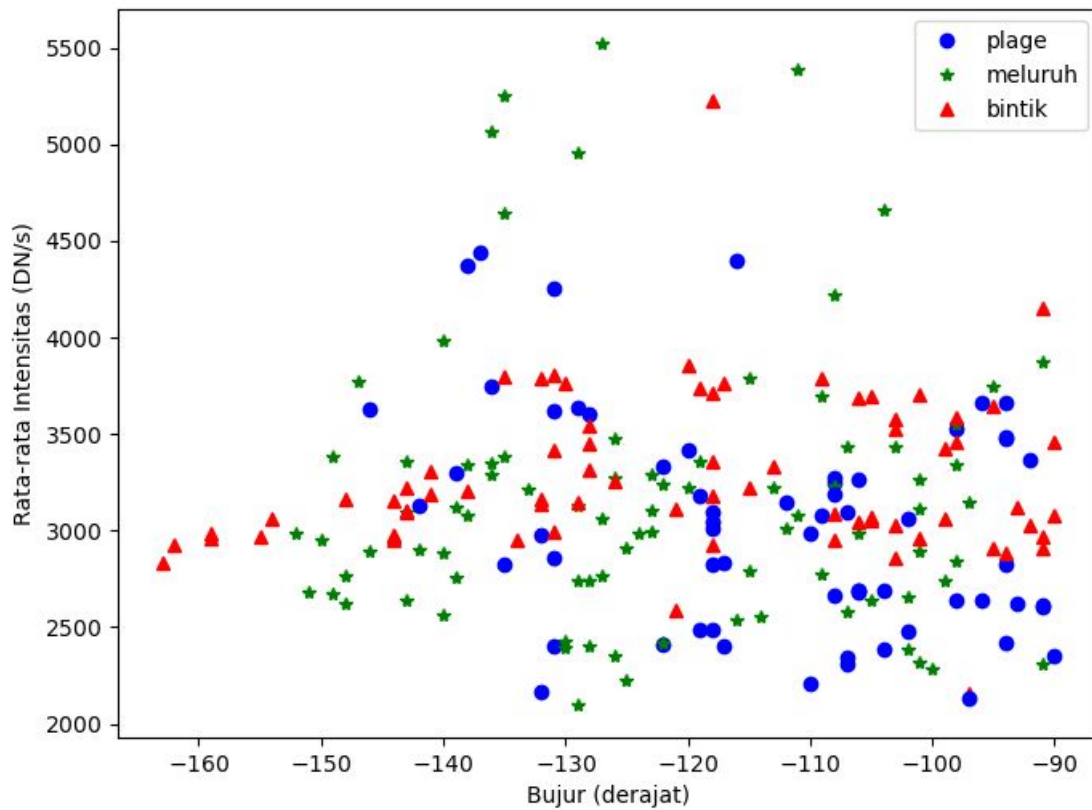


Gambar 1. Diagram alur proses deteksi daerah terang sisi jauh hingga dihasilkan informasi posisi, intensitas dan waktu tiba di tepi timur.



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





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

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

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

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

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

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

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

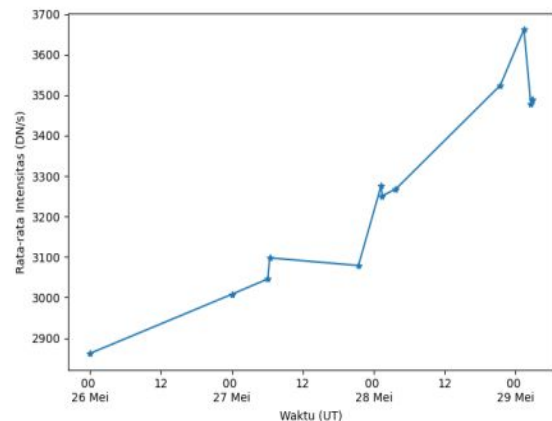
Pada Gambar 3 terlihat bahwa daerah terang yang meluruh sebelum sampai di  $-90^\circ$  mempunyai data rata-rata intensitas dengan rentang nilai terlebar. Hal ini dipertegas dengan simpangan bakunya yang bernilai paling besar (Tabel 1). Daerah terang yang menjadi bintik mempunyai nilai simpangan baku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

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

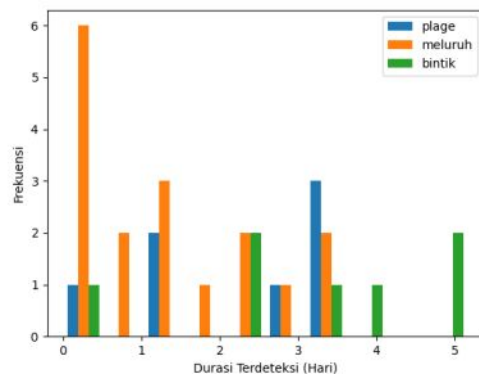
Perbedaan nilai rata-rata intensitas memang tidak terlalu signifikan antara yang meluruh, menjadi *plage* atau menjadi bintik. Akan tetapi lebih dari 80% daerah terang di sisi jauh yang menjadi bintik dipastikan sudah terdeteksi 2 hari dan bertahan paling lama hingga 5 hari sebelum sampai di bujur  $-90^\circ$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

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

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



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



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

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

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

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

#### 4. Kesimpulan

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

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

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

#### Ucapan Terima Kasih

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

terbuka untuk penelitian ini. Penelitian ini dilakukan menggunakan dana DIPA Pusat Sains Antariksa, LAPAN, tahun 2019. Penulis berterima kasih kepada para penelaah (mitra bestari) yang telah memberikan saran-saran bagi perbaikan makalah ini.

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

#### Pernyataan Kontribusi

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

#### Daftar Rujukan

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

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

# Deteksi Otomatis Daerah Aktif dari Citra SDO/HMI Magnetogram Matahari Menggunakan Adaptive Centroid Clustering (Automatic Detection of Active Region from SDO/HMI Magnetogram Image Using Adaptive Centroid Clustering)

Ahmad Zulfiana Utama, Tiar Dani

Pusat Sains Antariksa, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 07-12-2020

Direvisi: 16-04-2021

Disetujui: 19-04-2021

## Korespondensi:

Ahmad Zulfiana Utama

ahmad.zulfiana@lapan.go.id

## ABSTRAK

Peristiwa *flare* yang terjadi di daerah aktif Matahari dapat diamati melalui citra yang dihasilkan oleh satelit *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Citra *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) Magnetogram SDO menampilkan informasi area medan magnet pada permukaan Matahari yang direpresentasikan oleh area putih (polaritas positif) dan area hitam (polaritas negatif). Daerah aktif yang muncul dalam citra magnetogram merupakan struktur berpasangan antara polaritas positif dan negatif. Teknik pengolahan citra digital digunakan untuk mendeteksi dan mengelompokkan daerah aktif citra HMI Magnetogram dimulai dari fase *preprocessing*, pengelompokan kluster lokal kontur hitam/putih, pengelompokan daerah aktif, dan ekstraksi parameter luas daerah aktif. Algoritma *Adaptive Centroid Clustering* (ACC) telah dikembangkan untuk mengelompokkan daerah aktif berdasarkan titik tengah (*centroid*) pada kluster yang terdeteksi, jarak antara *centroid*, dan perpotongan garis batas area. Pengujian pengelompokan daerah aktif menggunakan 12 data historis peristiwa *flare* kelas X dan M yang terekam dan diuji menggunakan matriks evaluasi *area-based accuracy*. Matriks evaluasi menunjukkan bahwa algoritma ACC dapat mendeteksi daerah aktif pada citra HMI Magnetogram. Selain itu, setiap daerah aktif yang terdeteksi pada 12 citra dapat diekstraksi parameter luasnya dan diperoleh bahwa luas daerah aktif terbesar memiliki korelasi dengan daerah aktif penghasil *flare*.

**Kata kunci:** Pengelompokan kontur, Pengolahan citra digital, Daerah aktif

## ABSTRACT

Flare events occur in the active regions of the Sun and can be observed by the Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite. Images taken by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Magnetogram onboard the SDO show the magnetic field on the Sun's surface in which the white (black) regions represent the magnetic positive (negative) polarities. Active region is a paired structure of positive and negative polarity. Active regions are detected and classified by using several image processing techniques, which are preprocessing phase, local cluster grouping of black/white areas, active regions grouping, and extraction of the active region parameters. Adaptive Centroid Clustering (ACC) algorithm has been developed to classify active regions by using area centroids, which are grouped based on the distance and intersection regions. To examine the results, we used 12 historical data of recorded X and M class flare events and tested them by using an area-based accuracy evaluation matrix. The evaluation matrix shows that the ACC algorithm can detect active regions in the HMI Magnetogram. Area of the detected active regions can be extracted from the 12 images. It is found that the largest active region in image is related to the flare productive active region.

**Keywords:** Clustering, Digital image processing, Active region

## 1. Pendahuluan

Aktivitas Matahari berupa *flare* dan *coronal mass ejection* (CME) dapat memberikan dampak terhadap lingkungan antariksa dan lingkungan di sekitar Bumi. Dampak serius akibat peristiwa tersebut di antaranya adalah gangguan terhadap operasional satelit yang berada di orbitnya, gangguan terhadap komunikasi radio HF, gangguan terhadap jaringan listrik, dan juga radiasi, terutama terhadap penerbangan yang melintasi kutub Bumi (Schrijver *et al.*, 2015). Untuk meminimalkan dampak dari aktivitas Matahari tersebut, diperlukan sistem peringatan dini yang andal agar dapat diambil langkah mitigasi untuk melindungi infrastruktur teknologi yang terdampak (Sreeja, 2016).

Daerah aktif memiliki keterkaitan yang erat dengan peristiwa *flare* atau CME. Daerah aktif dapat diamati menggunakan citra *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) Magnetogram pada satelit *Solar Dynamics Observatory* (SDO) (Bobra *et al.*, 2014). Citra magnetogram tersebut dapat memberikan informasi mengenai kompleksitas medan magnet suatu daerah aktif yang direpresentasikan oleh pasangan polaritas positif dan negatif (Mackay *et al.*, 2011).

Pada contoh kasus yang paling sederhana, daerah aktif terbentuk dari struktur bipolar (positif dan negatif), akan tetapi pada kasus lain daerah aktif dapat berbentuk kompleks dengan berbagai ukuran dan jumlah area magnetik (Guglielmino *et al.*, 2012). Daerah putih dalam citra magnetogram merepresentasikan polaritas positif dan daerah hitam merepresentasikan polaritas negatif, sedangkan daerah berwarna abu-abu mengindikasikan daerah yang memiliki kekuatan medan magnet yang lemah.

Hubungan kompleksitas daerah aktif dengan produktifitas *flare* telah diteliti oleh Georgoulis (2008). Beliau mempelajari peristiwa erupitif pada 23 daerah aktif dan menemukan keterkaitan fitur batas garis antara daerah polaritas positif dan negatif, atau dikenal dengan *polarity inversion line* (PIL), dengan kemunculan *flare* atau CME.

Steward *et al.* (2017) mengembangkan program Flarecast untuk mendeteksi dan mengambil fitur daerah aktif menggunakan citra magnetogram *Global Oscillation Network Group* (GONG) untuk memprediksi peristiwa *flare* menggunakan model probabilitas pembelajaran mesin. Data garis-pandang GONG digunakan untuk mendeteksi daerah

aktif berdasarkan nilai ambang tertentu. Selanjutnya, dicari nilai PIL pada daerah yang terdeteksi menggunakan teknik *shifting-pixel*. PIL dan fitur daerah aktif digunakan sebagai masukan pada model probabilitas sebagai data latih dalam memprediksi peristiwa *flare*.

Aplikasi SMART (*Solar Feature Detection Algorithms*) mengekstraksi karakteristik daerah aktif untuk memahami keterkaitannya dengan kemunculan peristiwa *flare* (Higgins *et al.*, 2011). Aplikasi ini membandingkan dua buah citra SOHO/MDI LOS Magnetogram dengan interval waktu 96 menit. Pengaplikasian teknik pengolahan citra seperti *smoothing*, *noise-threshold*, *static-threshold*, *line of sight correction*, *masking*, *subtraction*, dan *dilation* dilakukan secara berulang terhadap dua citra tersebut untuk memperoleh *indexed grown mask* (IGM) dari suatu daerah aktif. IGM merupakan kumpulan nilai piksel yang membentuk kontur pada daerah aktif yang terdeteksi. Ekstraksi fitur daerah aktif diperoleh berdasarkan nilai IGM. Hasil akhir dari aplikasi ini menghasilkan katalog struktur data daerah aktif yang terdeteksi beserta fitur yang terkandung di dalamnya.

Algoritma Ashamari *et al.* (2015) menggunakan citra intensitigram dan magnetogram MDI-SOHO dalam mendeteksi suatu daerah aktif. Pemrosesan dimulai dari deteksi awal bintik Matahari pada citra intensitigram dan deteksi daerah magnetik pada citra magnetogram. Metode *thresholding* dan *mean filter* digunakan untuk mendeteksi daerah bintik Matahari. Sementara itu, daerah magnetik diperoleh dari proses *contrast stretching*, *median-filter*, dan *thresholding*. Nilai batas pada proses *thresholding* diperoleh dari analisis data statistik pada periode minimum aktivitas Matahari. Daerah aktif diperoleh berdasarkan lokasi awal bintik Matahari yang terdeteksi, lalu dibandingkan dengan lokasi daerah magnetik. Jika lokasi bintik Matahari berada di lokasi yang sama maka daerah magnetik dijadikan sebagai kandidat daerah aktif. Atribut kandidat daerah aktif dan bintik Matahari dimasukkan ke dalam metode *neural network* (NN) sebagai data latihan. Keputusan akhir dalam menentukan daerah aktif ditentukan oleh hasil metode NN. Tujuan utama dari algoritma deteksi dan ekstraksi fitur daerah aktif dan daerah magnetik yang sudah dilakukan oleh Ashamari *et al.* (2015), Higgins *et al.* (2011), dan Georgoulis (2018) adalah untuk mengetahui karakteristik dan memahami

keterkaitan peristiwa *flare* berdasarkan karakteristik daerah aktif.

Daerah aktif dapat muncul lebih dari satu atau tidak sama sekali dalam satu citra HMI Magnetogram. Program harus mampu untuk membedakan, memberikan tanda, dan mengelompokkan tiap daerah aktif. Penelitian ini akan menjabarkan deteksi daerah aktif pada citra HMI Magnetogram menggunakan teknik pengolahan citra dan penggunaan sebuah algoritma baru yang diberi nama *Adaptive Centroid Clustering (ACC)*. Algoritma ACC ini berfungsi untuk mengelompokkan daerah aktif berdasarkan informasi *centroid* dari kontur polaritas negatif dan positif yang terdeteksi. Pengelompokan tersebut dilakukan berdasarkan jarak *centroid*, garis perpotongan luas daerah, penggabungan daerah, dan optimasi pengelompokan kluster secara berulang.

Proses identifikasi daerah aktif pada penelitian ini relatif lebih singkat jika dibandingkan dengan penelitian Higgins *et al.* (2011) dan Ashamari *et al.* (2015). Hal tersebut dikarenakan pada penelitian mereka pencarian daerah aktif menggunakan dua buah tipe citra yang berbeda. Selain itu, penggunaan fungsi pencarian dan penggabungan kontur pada pustaka pemrograman OpenCV dapat mempercepat proses identifikasi daerah aktif. Fungsi kontur dikombinasikan dengan algoritma ACC dalam mendeteksi dan mengelompokkan daerah aktif berdasarkan daerah polaritas negatif dan positif pada citra HMI Magnetogram.

Verifikasi hasil deteksi daerah aktif menggunakan metode tingkat akurasi deteksi daerah yang digunakan pada penelitian *object-based image analysis* (Cai *et al.*, 2018). Selanjutnya, parameter luas daerah aktif yang terdeteksi akan diekstraksi dan dikorelasikan terhadap 12 peristiwa *flare*.

## 2. Metodologi

### 2.1. Data

Penelitian ini menggunakan citra magnetogram *full-disk* yang direkam oleh instrumen HMI pada satelit SDO. Citra HMI Magnetogram diperoleh dari website resmi SDO dengan resolusi citra 512 × 512 piksel.

Data pengujian menggunakan 12 citra HMI Magnetogram SDO pada saat peristiwa *flare* kelas X dan M selama siklus Matahari ke-24. Hasil deteksi daerah aktif dan luas area akan dikorelasikan dengan 12 data tersebut.

Citra magnetogram memiliki informasi mengenai area medan magnet (daerah aktif)

yang direpresentasikan oleh pasangan polaritas positif dan negatif. Parameter yang akan diambil dari informasi area medan magnet yaitu luas area polaritas negatif (area hitam) dan positif (area putih), luas area total, dan posisi koordinat dari area yang berpasangan (negatif dan positif).

### 2.2. Metode Penelitian

Metode pengelompokan (kluster) sederhana, contohnya algoritma K-Means, tidak dapat mencapai hasil secara maksimal karena kompleksitas objek daerah aktif yang terdiri dari pasangan area positif dan negatif.

Penggunaan algoritma K-Means harus menentukan jumlah kluster yang diinginkan sehingga hasil kluster bergantung pada jumlah inisialisasi tersebut (Kaushik & Mathur, 2014). Menurut Kaushik & Mathur (2014), apabila jumlah kluster yang ditentukan tidak tepat maka hasil yang diperoleh tidak akan maksimal. Penentuan jumlah kluster tersebut tidak cocok digunakan untuk mencari daerah aktif pada citra HMI Magnetogram secara otomatis karena citra tersebut merupakan data observasi yang bersifat dinamis. Selain pengelompokan daerah aktif, program mampu mengekstraksi informasi luas daerah aktif dan koordinat Kartesian berdasarkan piksel citra yang teramati.

Algoritma ACC yang dikembangkan pada penelitian ini tidak perlu menginisialisasi jumlah kluster seperti pada algoritma K-Means, akan tetapi jumlah kluster dicari berdasarkan nilai *centroid* yang terdeteksi secara dinamis.

Algoritma ACC terdiri dari beberapa fase yaitu *preprocessing*, pengelompokan kluster lokal kontur area hitam dan putih, pengelompokan daerah aktif, dan ekstraksi parameter. Fase *preprocessing* bertujuan untuk mendapatkan informasi piksel dari setiap kontur area hitam dan putih dengan cara membaca masukan citra HMI Magnetogram dan mengonversikan ke dalam kanal warna yang disimpan dalam larik, konversi citra berwarna ke dalam citra abu-abu dan *binary* (citra hitam putih), menghilangkan derau (*noise*) pada citra, klasifikasi area hitam dan putih berdasarkan nilai batas (*threshold,  $T_p$* ), eliminasi pinggiran Matahari, dan mendapatkan nilai kontur dan *centroid*. Seluruh fungsi tersebut disediakan oleh pustaka openCV pada bahasa pemrograman python (Howse, 2013). Tahapan fase *preprocessing* diilustrasikan pada diagram alir Gambar 1.

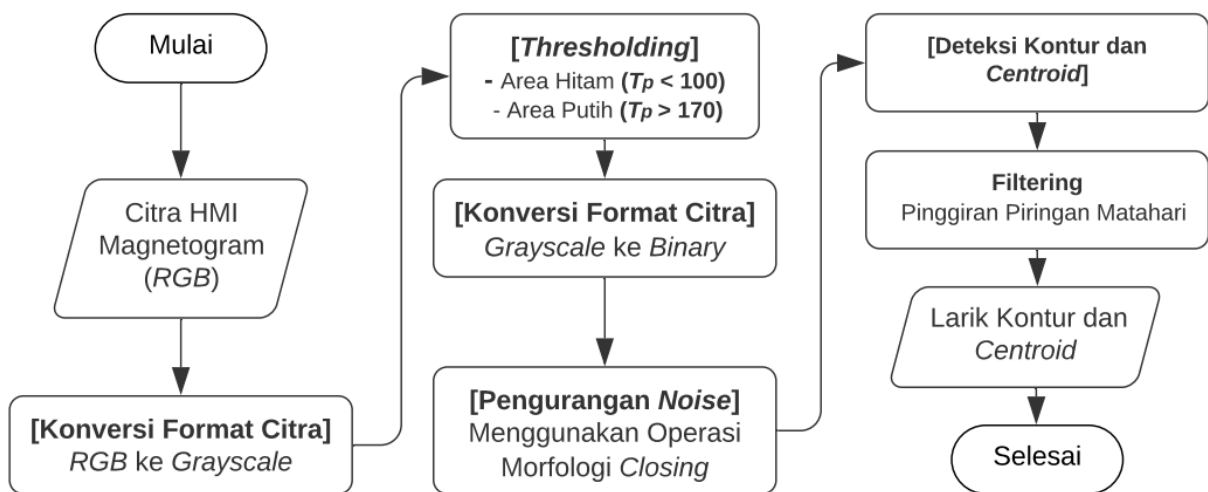
Konversi citra mengubah 3 kanal citra berwarna menjadi 1 kanal warna keabuan (Hidayatullah, 2017). Satu kanal warna menyimpan 8-bit data sehingga konversi citra keabuan akan menghemat ruang penyimpanan data, mengurangi kompleksitas perhitungan, mempermudah pencarian nilai batas untuk klasifikasi area hitam/putih, dan mempercepat perhitungan piksel. Derajat keabuan citra memiliki rentang nilai 0-255 yang didapat dari nilai rata-rata kanal citra berwarna RGB (*red, green, blue*). Piksel dengan nilai terendah akan berwarna hitam, sedangkan nilai tertinggi berwarna putih.

Terdapat derau yang terdistribusi pada citra HMI Magnetogram dan dapat memengaruhi proses pengelompokan daerah aktif. Derau dihilangkan menggunakan operasi morfologi *closing* dan *median filter* dengan setiap piksel dikonvolusi menggunakan sebuah filter  $3 \times 3$  dan nilai piksel yang terkonvolusi digantikan oleh nilai tengah berdasarkan nilai-nilai piksel tetangga (Hidayatullah, 2017).

Klasifikasi area hitam dan putih dilakukan berdasarkan nilai batas,  $T_p$ , pada kanal citra keabuan. Nilai  $T_p$  diambil berdasarkan nilai puncak histogram pada fase Matahari tenang, seperti yang dilakukan oleh Higgins *et al.* (2011), karena nilai puncak tersebut merupakan daerah keabuan yang sebagian besar menyelimuti piringan

Matahari. Nilai puncak histogram pada fase Matahari tenang adalah 125-130. Nilai tersebut dijadikan acuan sebagai nilai batas untuk membedakan area hitam, putih, dan daerah keabuan. Apabila nilai  $T_p$  lebih dari rentang 125-130, maka daerah keabuan di sekitarnya ikut terdeteksi. Sementara itu, untuk nilai  $T_p$  kurang dari 125-130 terdeteksi sebagai daerah hitam. Penggunaan  $T_p = 120$  menghasilkan daerah hitam beserta derau, sedangkan penggunaan  $T_p = 50$  menghasilkan daerah hitam dengan ukuran yang lebih kecil dan memiliki perbedaan morfologi jika dibandingkan dengan citra awal. Atas pertimbangan tersebut, penelitian ini menggunakan  $T_p = 100$  untuk mendeteksi daerah hitam, karena dapat mempertahankan bentuk morfologi dan meminimalkan derau yang terdeteksi. Persaman (1) menjabarkan bahwa nilai piksel lebih dari  $T_p$  akan dimaksimalkan menjadi 255, dan sebaliknya, area lain diberi nilai 0. Hasil dari proses ini menghasilkan citra *binary* dimana nilai 255 dikonversi menjadi 1 yang menggambarkan piksel berwarna putih dan nilai 0 merepresentasikan piksel berwarna hitam.

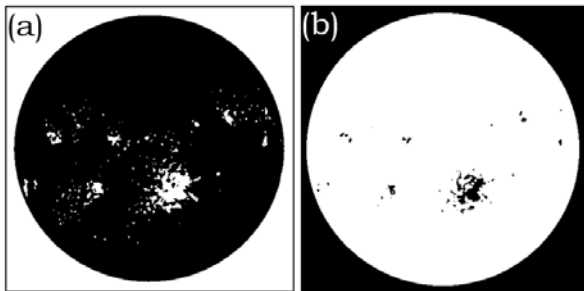
$$D_{(x,y)} = \begin{cases} 255, & \text{if } D_{(x,y)} > T_p ; \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$



Gambar 1. Diagram alir pada fase *preprocessing* untuk mengklasifikasikan area hitam/putih, dan mencari nilai kontur dan *centroid* pada setiap area yang terdeteksi.



Pencarian area putih mengulangi proses tersebut dengan kondisi yang terbalik, yaitu nilai piksel kurang dari nilai batas akan diberi nilai 0, sedangkan area lainnya diberi nilai 255. Selain itu pencarian area putih menggunakan nilai batas  $T_p = 170$  yang diperoleh berdasarkan nilai histogram pada fase tenang. Pada proses klasifikasi ini akan dihasilkan dua buah citra area hitam dan area putih seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil dari proses klasifikasi area hitam dan putih dalam kanal citra *binary* pada fase *preprocessing*.

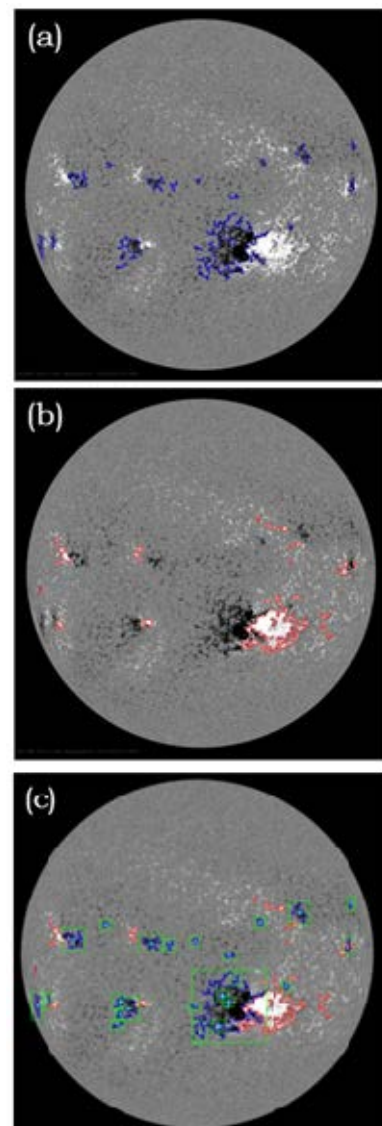
Citra hasil klasifikasi hitam dan putih diproses lebih lanjut untuk mendapatkan informasi kontur dari setiap area magnetik di piringan citra Matahari. Kontur area pada citra merupakan kumpulan piksel yang terkoneksi dan memiliki nilai intensitas warna yang berbeda dengan area tetangga. Pencarian informasi kontur menggunakan fungsi *findContours()* dari pustaka OpenCV. Fungsi *findContours()* menggunakan algoritma yang dikembangkan oleh Suzuki (1985) yang menjadi cikal bakal dalam menganalisis hubungan hierarki dari garis tepi. Hasil kontur area adalah himpunan nilai koordinat  $(x,y)$  garis tepi sebuah objek yang disimpan ke dalam sebuah larik kontur. Gambar 3 merupakan hasil deteksi kontur pada area hitam (a) dan putih (b).

Luas kontur yang terdeteksi dihitung menggunakan fungsi *cv.contourArea()*. Luas kontur digunakan juga untuk mengeliminasi piringan Matahari yang memiliki luas sebesar 174614,5. Nilai ini juga diperoleh dari fungsi *cv.contourArea()*. Nilai *centroid* untuk setiap area yang terdeteksi merupakan nilai tengah dari garis batas kontur area. Kotak hijau pada Gambar 3(c) merupakan garis batas pada setiap kontur dan titik merah merupakan nilai *centroid*. Garis batas memiliki bentuk persegi yang mengelilingi setiap kontur dan digambar menggunakan fungsi *cv.rectangle()*. Untuk mendapatkan titik piksel kiri-atas batas kontur

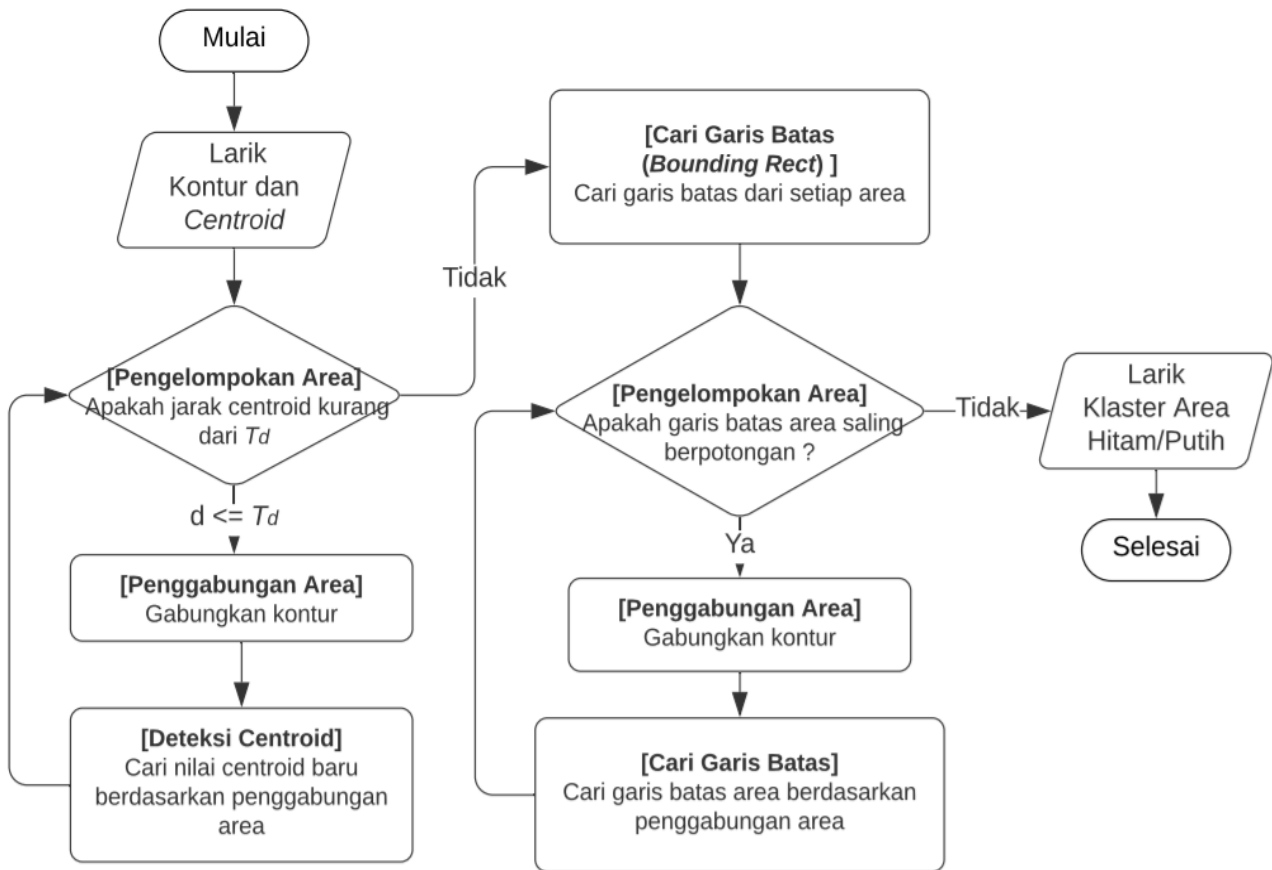
$(x_{min}, y_{min})$ , lebar dan tinggi adalah nilai piksel yang terdapat pada larik kontur menggunakan fungsi *cv.boundingRect()*. Sementara itu, untuk nilai *centroid* diperoleh menggunakan Persamaan (2).

$$Centroid = \begin{cases} Cx = x + 0.5 * width, \\ Cy = y + 0.5 * height \end{cases} \quad (2)$$

Nilai *centroid* dan garis batas kontur area hitam dan putih digunakan untuk mengelompokkan area sejenis (klaster lokal) yang saling bertetangga. Area yang terdeteksi dikelompokkan sesuai dengan jenisnya (hitam/putih) berdasarkan jarak *centroid* dan algoritma perpotongan garis batas kontur.



Gambar 3. (a) Hasil deteksi kontur area hitam (garis biru) (b) Kontur area putih (garis merah) (c) Penggabungan kontur hitam dan putih dalam satu citra.



Gambar 4. Diagram alir pengelompokan kluster lokal pada area hitam dan putih.

Gambar 4 merupakan tahapan dalam mengelompokkan kluster lokal pada area hitam dan putih. Algoritma kluster lokal mengadopsi algoritma K-Means Clustering, yaitu pengelompokan kluster berdasarkan jarak antar nilai *centroid*. Jarak *centroid*,  $d$ , dihitung menggunakan rumus *Euclidian Distance*, seperti pada Persamaan (3).

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

Nilai *centroid* pada setiap kontur dihitung jaraknya dengan nilai *centroid* lainnya. Pada penelitian ini kami menggunakan nilai batas jarak,  $T_d$ , sebesar 20. Jika  $d$  kurang dari  $T_d$  maka kedua area tersebut digabungkan sehingga akan menghasilkan nilai *centroid* yang baru. Proses penggabungan larik kontur menggunakan fungsi Numpy *concat()*. Proses ini dilakukan secara berulang dan berhenti pada saat jarak antara *centroid* tidak ada yang kurang dari  $T_d$ .

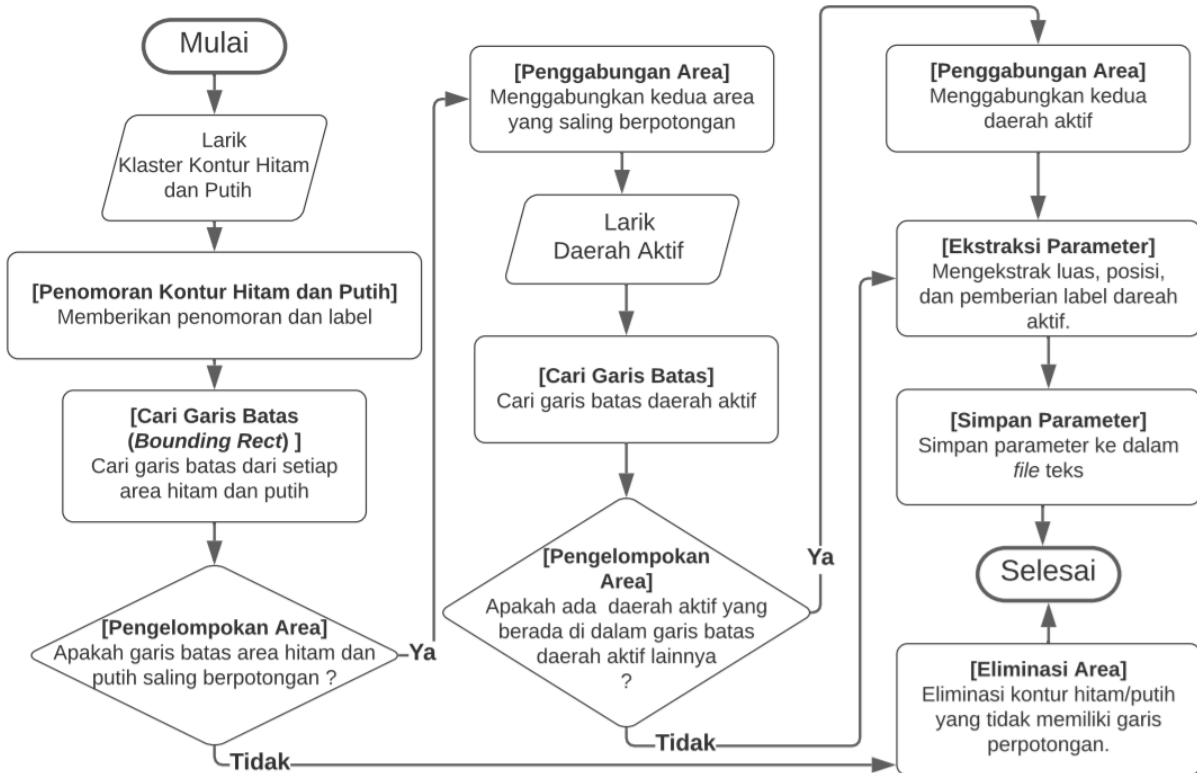
Garis batas kontur yang saling berpotongan merepresentasikan area yang saling bertetangga dan akan dikelompokkan ke dalam satu kluster. Algoritma *intersection region* mendeteksi perpotongan garis dengan

membandingkan nilai koordinat minimum/titik piksel pada kiri-atas ( $x_{min}, y_{min}$ ), dan maksimum/titik piksel kanan-bawah garis batas kontur area ( $x_{max}, y_{max}$ ). Algoritma ini akan dijalankan setelah pengelompokan area berdasarkan jarak *centroid* selesai.

**Algoritma 1. Intersection Region**

```
Function is_intersect (P1, P2)
    if P1.xmin > P2.xmin or P1.xmax < P2.xmax :
        return False
    if P1.ymin > P2.ymin or P1.ymax < P2.ymax :
        return False
    return True
```

Pencarian kluster lokal menghasilkan kluster kontur area hitam dan putih. Informasi ini digunakan dalam pencarian daerah aktif yang terdiri dari pasangan polaritas negatif (area hitam) dan positif (area putih). Gambar 5 merupakan tahapan pengelompokan daerah aktif yang dimulai dari pemberian label unik berdasarkan jenis area untuk setiap kontur untuk menghindari pengelompokan kontur dengan polaritas yang sama. Pemberian label juga memperjelas identitas tiap kontur yang mendefinisikan jenis dan nomor urutan kontur yang terdeteksi.



Gambar 5. Diagram alir pengelompokan daerah aktif berdasarkan kontur hitam dan putih.

Perpotongan garis batas antara kontur area hitam dan putih dijadikan dasar untuk mengelompokkan daerah aktif. Jika garis batas area hitam dan putih berpotongan maka kedua larik kontur area tersebut digabungkan menggunakan fungsi Numpy *concat()*. Penggabungan kontur area hitam dan putih akan menghasilkan garis batas area yang baru yang merepresentasikan suatu daerah aktif. Selanjutnya dilakukan pengecekan apakah ada daerah aktif yang berada di dalam garis batas daerah aktif lainnya. Jika ada, kedua informasi daerah aktif tersebut digabungkan. Proses terakhir adalah ekstraksi dan menyimpan parameter ke dalam fail teks.

Ekstraksi parameter, seperti luas dan posisi daerah aktif dalam koordinat Kartesian, diperoleh dari daerah aktif yang berhasil teridentifikasi. Setiap daerah aktif yang terdeteksi diberikan suatu identitas berupa nomor untuk memudahkan peneliti atau pengguna dalam mencerna informasi.

Luas kontur area daerah aktif dihitung menggunakan fungsi *cv.contourArea()* yang dimiliki oleh OpenCV Python, akan tetapi fungsi tersebut masih dalam satuan luas piksel. Persamaan (4) dapat mengonversikan luas tersebut menjadi satuan *Solar Millionth Hemisphere* (SMH) yang sudah termasuk koreksi *foreshortening* (Smart, 1971; Duffet-

Smith P, 1988; Meadows, 2020). Persamaan (4) digunakan untuk menghitung luas area grup bintang Matahari dengan faktor koreksi *foreshortening*.

$$A_M = \frac{A_s 10^6}{2\pi R^2(\rho)} \quad (4)$$

dengan  $A_M$  adalah luas dalam SMH,  $\rho$  adalah jarak sudut dari permukaan Matahari di tengah piringan ke grup bintang yang diperoleh dari Persamaan (5),  $A_s$  adalah area bintang Matahari yang terukur dalam piksel<sup>2</sup>, dan  $R$  adalah radius Matahari pada citra dalam piksel, dengan  $x$  dan  $y$  merupakan posisi *centroid* dari grup bintang dengan koordinat (0,0) berada di tengah piringan Matahari. Koordinat *default* (0,0) pada citra selalu berada di pojok kiri atas, tetapi untuk perhitungan luas area, kami menggeser koordinat (0,0) tersebut tepat berada di tengah piringan Matahari sesuai dengan syarat Persamaan (6). *appdiam* merupakan diameter semu Matahari (0,53°) dan *diskdiam* adalah diameter Matahari dalam citra (satuan sama dengan  $x$  dan  $y$ ).

$$\rho = (2\rho_1 / \text{appdiam}) - \rho_1 \quad (5)$$

$$\rho_1 = \frac{\text{appdiam}}{\text{diskdiam}} \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (6)$$

Seluruh parameter yang telah berhasil diekstraksi, disimpan ke dalam fail teks. Fail teks berisi sebuah tabel yang terdiri dari 6 kolom, yaitu penomoran daerah aktif, posisi *centroid* dalam arah horizontal  $C_x$ , posisi *centroid* dalam arah vertikal  $C_y$ , luas polaritas negatif (area hitam), luas polaritas positif (area putih), dan total area. Posisi *centroid* daerah aktif dalam nilai koordinat Kartesian dinormalisasi ke dalam sistem koordinat Matahari, dikenal sebagai *heliocentric cartesian position*  $(x,y)$ . Normalisasi tersebut berfungsi untuk memindahkan titik pusat koordinat  $(0,0)$  di pojok kiri atas ke titik tengah piringan Matahari.

**2.3. Metode Pengujian**

Matriks evaluasi untuk akurasi program dalam mendeteksi daerah aktif menggunakan persentase *correctness*, *completeness*, dan *quality*. Metode evaluasi ini telah digunakan untuk mengukur tingkat akurasi deteksi area pada aplikasi *Object-Based Image Analysis* (Cai et al., 2018).

*Correctness*,  $P_{AC}$ , merupakan rasio dari daerah aktif yang terdeteksi sesuai dengan rujukan data historis yang tercatat pada web <http://solarmonitor.org> yang dinotasikan sebagai  $AC$  dan keseluruhan daerah aktif yang terdeteksi oleh program ( $ADC$ ). Evaluasi *correctnes* mengukur akurasi program dalam mendeteksi daerah aktif.

$$P_{AC} = \frac{AC}{ADC} \tag{7}$$

*Completeness*,  $P_{AR}$ , merupakan perbandingan  $AC$  dengan keseluruhan daerah aktif  $ARC$  yang ada pada tabel jawaban atau data historis. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi kelengkapan daerah aktif yang terdeteksi oleh program.

$$P_{AR} = \frac{AC}{ARC} \tag{8}$$

*Quality*,  $P_{AL}$ , merupakan nilai tengah dari *correctness* dan *completeness* untuk mengukur kualitas hasil deteksi daerah aktif. Pada Persamaan (7), jika nilai  $ADC$  besar dapat berakibat pada kecilnya nilai *correctness*, sedangkan pada persamaan (8), jika nilai  $ARC$  kecil akan menghasilkan *completeness* yang tinggi. Oleh karena itu, persamaan (9) digunakan untuk menyeimbangkan nilai  $P_{AC}$  dan  $P_{AR}$ .

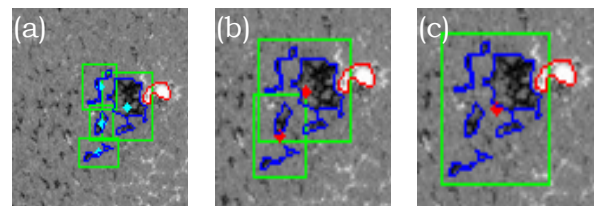
$$P_{AL} = \frac{AC}{ADC + ARC - AC} \tag{9}$$

Pada penelitian ini kami mengeliminasi nilai pada tabel jawaban jika daerah aktif yang terdeteksi lokasinya berada di pinggiran piringan Matahari.

**3. Hasil Pembahasan**

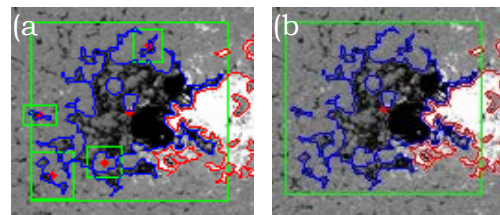
**3.1. Pencarian Kluster Lokal pada Area Hitam dan Putih**

Gambar 6 merupakan ilustrasi dari proses iterasi berdasarkan jarak *centroid*. Pada setiap iterasi, apabila jarak *centroid* kurang dari nilai batas maka kedua kontur tersebut akan dimasukkan ke dalam satu kluster. Kontur area keduanya digabungkan sehingga akan menghasilkan nilai *centroid* yang baru karena perubahan luas kontur. Proses ini dilakukan secara berulang sampai tidak ada jarak *centroid* yang kurang dari nilai batas  $T_d$ .

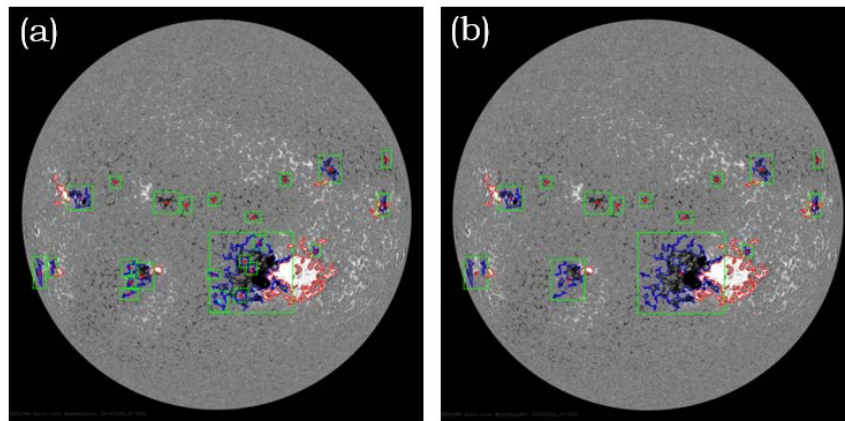


Gambar 6. (a) Iterasi ke-1, (b) iterasi ke-2 sampai (c) iterasi ke- $n$  menghasilkan 1 kluster. Proses berhenti apabila  $d$  lebih dari  $T_d$ .

Setelah dilakukan pengelompokan berdasarkan jarak *centroid*, masih terdapat penumpukan kontur yang berada pada kontur lainnya, seperti ditunjukkan oleh Gambar 7(a). Hal tersebut dikarenakan nilai  $d$  melebihi nilai batas. Oleh karena itu, algoritma perpotongan antara garis batas area akan mengatasi permasalahan tersebut, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7(a) dan (b).



Gambar 7. Cara kerja algoritma *intersection region*. (a) Keadaan awal dan (b) sesudah dilakukan pengelompokan menggunakan algoritma *intersection region*.



Gambar 8. (a) Keadaan awal dan (b) sesudah pengelompokan kluster lokal pada area hitam. Kotak hijau pada panel (a) dan (b) merupakan garis batas area pada setiap kontur dan titik merah merupakan *centroid* dari tiap kontur.

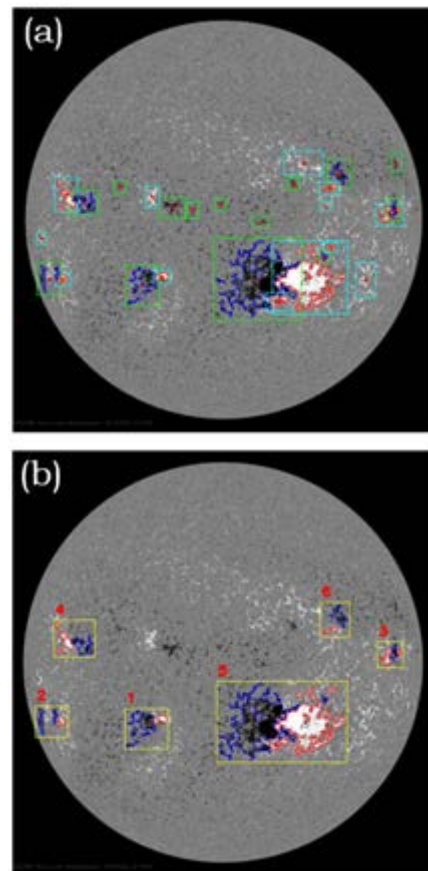
Untuk mengetahui garis batas kontur yang saling berpotongan, dicari nilai koordinat minimum ( $x_{min}, y_{min}$ ) dan maksimum ( $x_{max}, y_{max}$ ) dari setiap batas kontur. Selanjutnya, untuk setiap garis batas yang saling berpotongan, dilakukan penggabungan larik kontur kembali menggunakan fungsi Numpy *concat()*. Penggabungan kontur ini akan menghasilkan garis batas area yang baru sehingga proses algoritma berdasarkan perpotongan garis dilakukan secara berulang seperti yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 5. Seluruh tahapan pada pengelompokan kluster kontur area hitam dilakukan juga pada pengelompokan kontur area putih.

Gambar 8(a) merupakan hasil deteksi kontur area hitam sebelum dikelompokkan berdasarkan jarak terdekat dari *centroid* dan perpotongan garis batas area. Sementara itu, Gambar 8(b) merupakan hasil dari pengelompokan kluster area hitam dan kontur yang tervisualisasi lebih sedikit dibandingkan dengan Gambar 8(a) karena telah dilakukan penggabungan kontur area apabila area hitam/putih berada dalam kluster yang sama.

### 3.2. Pengelompokan Daerah Aktif

Pencarian daerah aktif dilakukan dengan memanfaatkan informasi dari kluster kontur area hitam dan putih yang berpasangan. Penentuan pasangan tersebut berdasarkan perpotongan garis batas kluster area hitam dan putih. Gambar 9(b) adalah hasil proses iterasi ke- $n$  pada pencarian daerah aktif yang ditandai oleh garis batas kontur berwarna kuning. Pada setiap proses, apabila ada garis batas kontur area putih dan hitam yang berpotongan maka kedua kontur tersebut digabungkan ke dalam satu kluster

yang merepresentasikan satu daerah aktif. Proses ini dilakukan secara berulang sampai tidak ada garis yang saling berpotongan. Gambar 9(b) adalah citra akhir setelah proses eliminasi kontur hitam dan putih yang tidak termasuk ke dalam daerah aktif atau tidak memiliki pasangan.



Gambar 9. (a) Kluster kontur lokal sebagai masukan pada algoritma pencarian daerah aktif. (b) Iterasi terakhir pengelompokan daerah aktif berdasarkan kontur lokal.

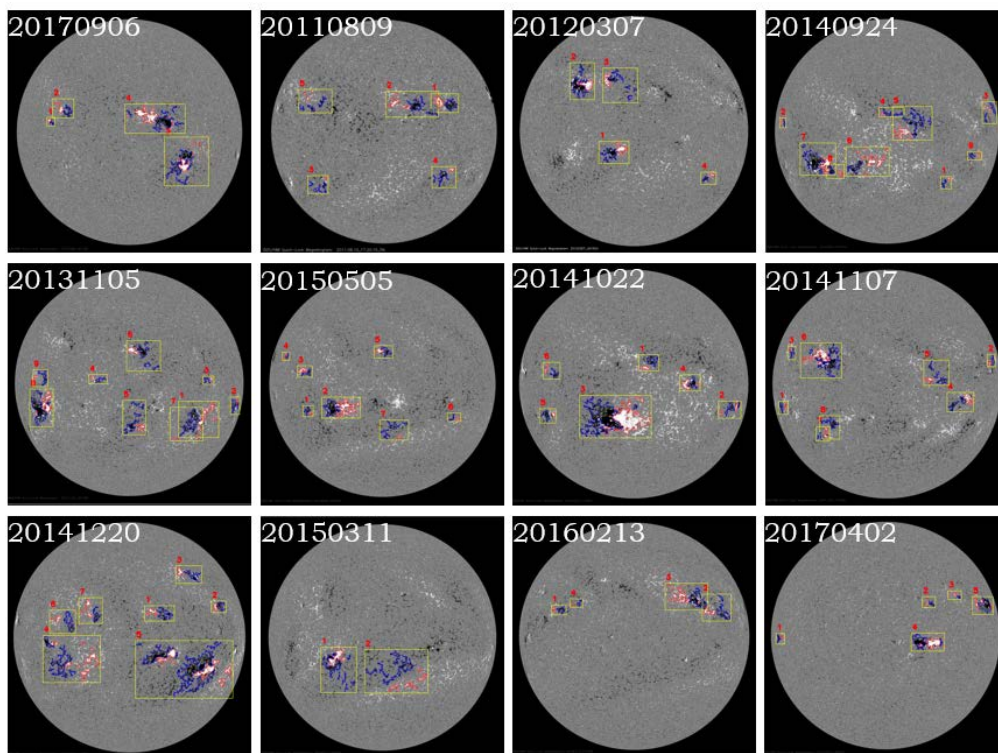
### 3.3. Pengujian Berdasarkan Matriks Evaluasi

Pengujian berdasarkan peristiwa *flare* menggunakan 12 citra HMI Magnetogram pada saat peristiwa *flare* kelas X dan M selama satelit SDO mengorbit atau setelah tahun 2010 dan peristiwa *flare* tersebut tidak terjadi di pinggiran piringan Matahari. Data historis peristiwa *flare* diperoleh dari <https://www.solarmonitor.org/>. Situs web tersebut menyediakan data historis daerah aktif berbasis penomoran NOAA dan kekuatan *flare* yang terjadi.

Tabel 1 merupakan hasil pengujian daerah aktif yang terdeteksi dan dievaluasi oleh matriks evaluasi *correctness*, *completeness*, dan *quality*. Persentase *correctness* menunjukkan ketepatan program dalam mendeteksi daerah aktif dibandingkan dengan jumlah yang terdeteksi, sedangkan *completeness* mengukur ketepatan program dalam mendeteksi daerah aktif berdasarkan data historis. Gambar 10 adalah hasil deteksi dan pengelompokan daerah aktif menggunakan algoritma ACC secara berturut-turut sesuai dengan urutan data pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil matriks evaluasi deteksi dan pengelompokan daerah aktif.

Tanggal (TTTTBBHH)	AC	ADC	ARC	Correctness	Completeness	Quality
20170906	4	4	4	100	100	100
20110809	3	5	3	60	100	60
20120307	4	4	4	100	100	100
20140924	7	9	7	78	100	78
20131105	7	9	7	78	100	78
20150505	5	7	5	72	100	72
20141022	4	6	5	67	80	57
20141107	4	8	6	50	80	45
20141220	5	7	8	71	63	50
20150311	1	2	2	50	50	33
20160213	4	4	4	100	100	100
20170402	4	5	4	80	100	80



Gambar 10. Hasil deteksi dan pengelompokan daerah aktif pada 12 citra HMI Magnetogram.

Program gagal mendeteksi 3 daerah aktif pada data 20141220. Selain itu, program hanya berhasil mendeteksi 1 dari 2 daerah aktif pada data 20150311. Hasil deteksi pada kedua data tersebut menyebabkan nilai perbandingan AC dan ADC yang kecil sehingga berpengaruh terhadap persentase *correctness*, *completeness*, dan *quality*, seperti yang terlihat pada Tabel 1.

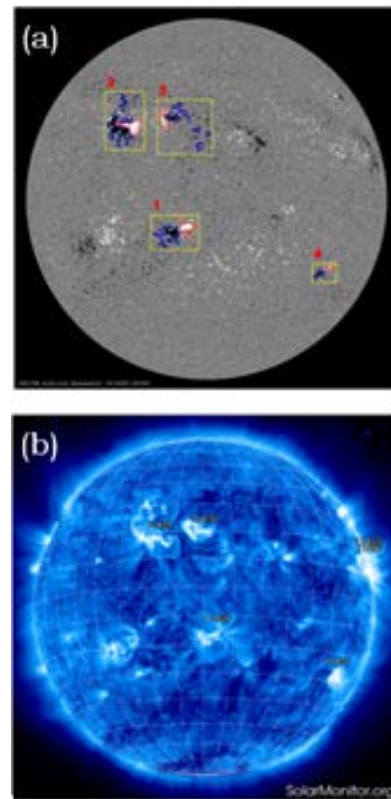
Pada data lainnya, program berhasil mendeteksi seluruh daerah aktif dengan tepat pada data 20170906, 20120307, dan 20160213 sehingga diperoleh persentase *correctness*, *completeness*, dan *quality* yang maksimal. Data 20140924, 20131105, 20150505, dan 20170402 memiliki tingkat *correctness* dan *quality* lebih dari 70%, dan tingkat *completeness* sebesar 100%.

Persentase *completeness* untuk data 20110809, 20141022, dan 20141107 di atas 80%, sedangkan untuk *correctness* dan *quality* masih di bawah 60%. Persentase *correctness* dan *quality* pada ketiga data tersebut dipengaruhi oleh perbandingan AC dan ADC yang timpang karena program mendeteksi daerah aktif lainnya yang tidak terdapat pada data historis atau yang dikenal dengan *over-specification*. *Over-specification* dari hasil program dapat dikatakan sebagai daerah dengan aktivitas magnetik rendah pada permukaan Matahari (*plage*) karena pasangan polaritas yang terdeteksi tidak tercatat sebagai daerah aktif pada penomoran NOAA.

### 3.4. Korelasi Peristiwa Flare dan Luas Daerah Aktif Pengujian Berdasarkan Matriks Evaluasi

Penelitian yang telah dilakukan oleh (Sulistiani, 2018) menjadikan luas daerah aktif sebagai masukan dalam memprediksi peristiwa *flare* menggunakan algoritma *random forest*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa luas daerah aktif memiliki korelasi dengan prakiraan daerah penghasil peristiwa *flare*. Hasil ekstraksi luas area terhadap 12 data pada penelitian ini akan dianalisis menggunakan korelasi sederhana (*bivariate correlation*) dengan kemunculan peristiwa *flare* pada daerah aktif. Gambar 11 merupakan contoh cara membandingkan hasil dengan data historis tanggal 20120307, dengan citra SWAP yang telah diberi keterangan penomoran daerah aktif NOAA

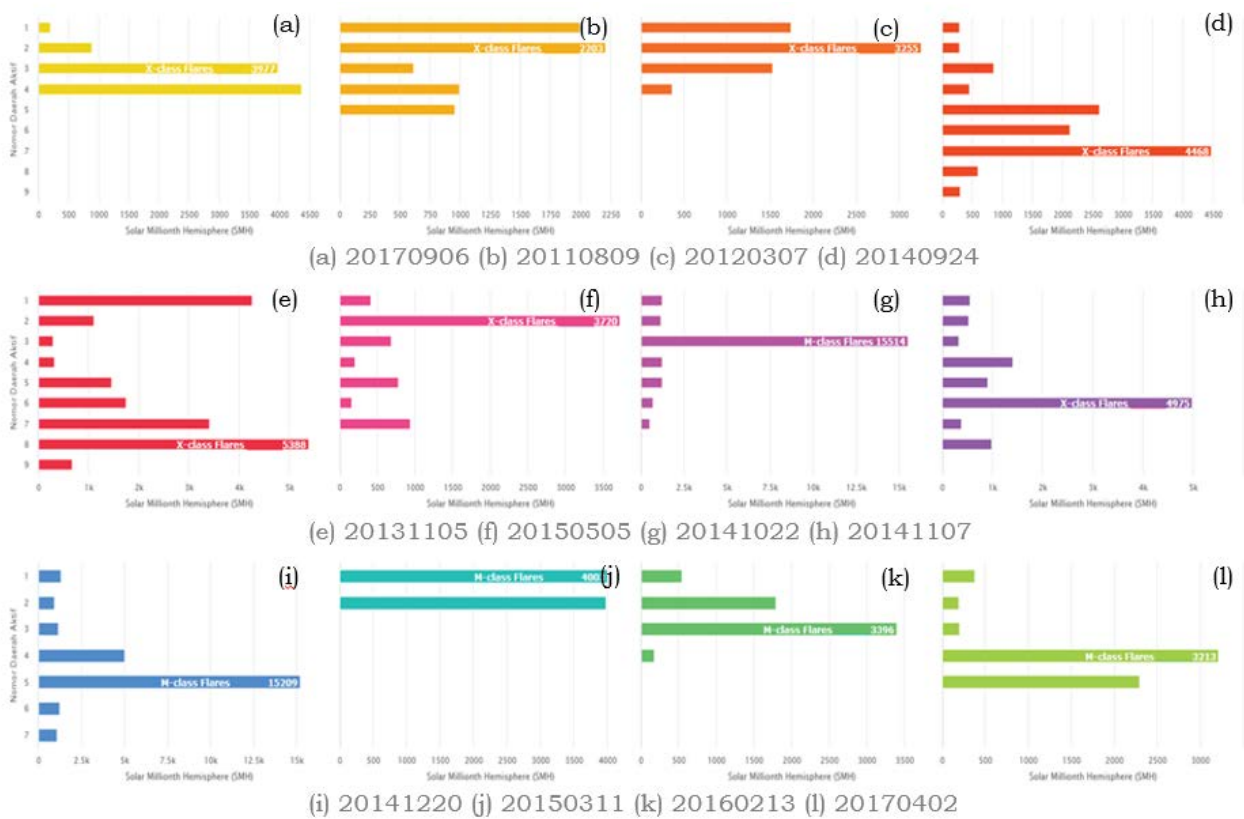
dan rekap peristiwa *flare* pada setiap daerah aktif.



Gambar 11. Perbandingan (a) citra tanggal 20120307 pada hasil program dan (b) citra yang telah diberikan penomoran daerah aktif NOAA dari solarmonitor.org.

Data solarmonitor.org mencatat bahwa peristiwa kelas *flare* C, M, dan X terjadi pada daerah aktif 11429 dan program berhasil mengidentifikasi daerah aktif tersebut sebagai daerah aktif nomor 2 pada Gambar 11(a). Daerah aktif tersebut memiliki luas daerah terbesar dibandingkan dengan daerah aktif lainnya, yaitu sebesar 3255 SMH.

Grafik pada Gambar 12 merupakan perbandingan luas daerah aktif pada setiap data. Penghasil peristiwa *flare* pada grafik ditunjukkan dengan keterangan tulisan kelas *flare*. Grafik menunjukkan luas daerah terbesar pada masing-masing data merupakan daerah penghasil *flare*, terkecuali untuk data pada tanggal 6 September 2017, dapat dilihat pada Gambar 12(a). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa algoritma ACC berhasil mendeteksi daerah aktif dan ekstraksi parameter luas daerah aktif terbesar pada 12 citra HMI Magnetogram dan 11 di antaranya merupakan penghasil peristiwa *flare*.



Gambar 12. Grafik luas daerah aktif pada 12 citra yang membandingkan luas yang terdeteksi pada satu citra.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan aplikasi menggunakan teknik pengolahan citra digital untuk mendeteksi dan mengelompokkan daerah aktif yang terdiri dari area positif dan negatif pada citra HMI Magnetogram. Algoritma ACC mengelompokkan daerah aktif menggunakan data *centroid* area hitam dan putih yang terdeteksi secara dinamis berdasarkan jarak minimal dan perpotongan garis batas kontur area. Data *centroid* diperoleh dari proses *preprocessing* dimulai dari membaca masukan citra HMI Magnetogram dan mengonversikan ke dalam satuan piksel, konversi citra berwarna ke dalam citra abu-abu, menghilangkan derau pada citra menggunakan *median filter*, klasifikasi jenis area berdasarkan nilai batas, dan mencari informasi kontur pada setiap area. Kontur area hitam dan putih yang terdeteksi dikelompokkan ke dalam klaster berdasarkan jarak *centroid* dan perpotongan garis batas kontur area. Klaster area hitam dan putih yang berpasangan merupakan representasi dari suatu daerah aktif. Penentuan pasangan dilakukan berdasarkan perpotongan garis batas klaster area hitam dan putih.

Pengujian akurasi pengelompokan daerah aktif menggunakan matriks evaluasi *area-based accuracy* yang terdiri dari *correctness*, *completeness*, dan *quality* terhadap 12 data historis peristiwa flare kelas X dan M. Berdasarkan matriks evaluasi, penelitian ini telah berhasil mendeteksi daerah aktif dengan persentase *correctness*, *completeness*, dan *quality* yang berbeda pada setiap data uji. Tujuh data uji menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi berdasarkan persentase *correctness*, *completeness* dan *quality*. Pada tiga data uji, algoritma ACC mendeteksi daerah aktif yang tidak tercatat sebagai daerah aktif berdasarkan penomoran NOAA atau yang biasa disebut *over-specification*.

Ekstraksi parameter luas daerah aktif pada penelitian ini menunjukkan bahwa luas daerah aktif terbesar pada satu citra merupakan daerah penghasil flare. Hasil ekstraksi luas daerah aktif pada penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh peneliti dengan bidang kepakaran terkait untuk memprediksi peristiwa flare ataupun menganalisis secara fisis.



## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada tim SDO GSFC NASA <https://sdo.gsfc.nasa.gov/> yang telah menyediakan data HMI Magnetogram, dan tim <https://www.solarmonitor.org/> yang telah memberikan informasi *flare* secara terperinci.

## Pernyataan Kontribusi

P. Pertama dan P. Kedua merupakan kontributor utama yang mengakusisi, mengolah data, melakukan analisis, merancang penelitian, dan menulis sebagian besar makalah ini.

## Rujukan

- Ashamari, O., Qahwaji, R., Ipson, S., Schöll, M., Nibouche, O., & Haberleiter, M. (2015). Identification of photospheric activity features from SOHO/MDI data using the ASAP tool. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5, A15.
- Bobra, M.G., Sun, X., Hoeksema, J.T., Turmon, M., Liu, Y., Hayashi, K., & Leka, K.D. (2014). The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) vector magnetic field pipeline: SHARPs—space-weather HMI active region patches. *Solar Physics*, 289(9), 3549-3578.
- Cai, L., Shi, W., Miao, Z., & Hao, M. (2018). Accuracy assessment measures for object extraction from remote sensing images. *Remote Sensing*, 10(2), 303.
- Duffet-Smith, P. (1988). *Practical astronomy with your calculator*, 3<sup>rd</sup> ed. Cambridge, Univ.Press.
- Georgoulis, M.K. (2008). Magnetic complexity in eruptive solar active regions and associated eruption parameters. *Geophysical research letters*, 35(6).
- Guglielmino, S.L., Pillet, V.M., Bonet, J.A., del Toro Iniesta, J.C., Rubio, L.B., & *et al.* (2012). The frontier between small-scale bipoles and ephemeral regions in the solar photosphere: emergence and decay of an intermediate-scale bipole observed with SUNRISE/IMaX. *The Astrophysical Journal*, 745(2), 160.
- Hidayatullah, P. (2017). *Pengolahan Citra Digital Teori dan Aplikasi Nyata*. Bandung, Informatika.
- Higgins, P.A., Gallagher, P.T., McAteer, R.J., & Bloomfield, D.S. (2011). Solar magnetic feature detection and tracking for space weather monitoring. *Advances in Space Research*, 47(12), 2105-2117.
- Howse, J. (2013). *OpenCV computer vision with python*, Packt Publishing Ltd.
- Kaushik, M. & Mathur, B. (2014). Comparative study of K-means and hierarchical clustering techniques. *International journal of software and hardware research in engineering*, 2(6), 93-98.
- Mackay, D.H., Green, L.M., & Van Ballegooijen, A. (2011). Modeling the dispersal of an active region: quantifying energy input into the corona. *The Astrophysical Journal*, 729(2), 97.
- Meadows, P.J. (2020). Remeasurement of Solar Observing Optical Network sunspot areas. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 497, Issue 1, pp.1110-1114, doi: 10.1093/mnras/staa2007.
- Schrijver, C.J., Kauristie, K., Aylward, A.D., Denardini, C.M., Gibson, & *et al.* (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745-2807.
- Smart W.M. (1971). *Text-book on Spherical Astronomy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Sreeja, V. (2016). Impact and mitigation of space weather effects on GNSS receiver performance. *Geoscience Letters*, 3(1), 24.
- Steward, G., Lobzin, V., Cairns, I.H., Li, B., & Neudegg, D. (2017). Automatic recognition of complex magnetic regions on the Sun in SDO magnetogram images and prediction of flares: Techniques and results for the revised flare prediction program Flarecast. *Space Weather*, 15(9), 1151-1164.
- Sulistiani, S. & Dani, T. (2019). Prakiraan Flare Sinar-X Matahari Berdasarkan Evolusi Daerah Aktif. *Jurnal Sains Dirgantara*, 16(1), 23-32.
- Suzuki, S. (1985). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer vision, graphics, and image processing*, 30(1), 32-46.



# Identifikasi dan Karakteristik *Co-rotating Interaction Region* Geoeftif (Identification and Characteristics of Geoeffective *Co-rotating Interaction Regions*)

A. Winarko dan F. Nuraeni

Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

## Riwayat naskah

Diterima: 27-12-2020

Direvisi: 09-03-2021

Disetujui: 10-03-2021

Korespondensi:

A. Winarko

anton.winarko@lapan.go.id

## ABSTRAK

*Co-rotating Interaction Region* (CIR) dipicu oleh interaksi angin matahari berkecepatan tinggi dengan angin Matahari yang lebih lambat. Diketahui bahwa CIR merupakan salah satu penyebab terjadinya badai geomagnet. Pada studi ini diidentifikasi dan dianalisis badai geomagnet yang dipicu CIR pada periode tahun 2008–2019 (*Solar Cycle*, SC 24). Diperoleh distribusi statistik badai geomagnet CIR dan parameter-parameter CIR pada angin Matahari. Analisis korelasi dilakukan untuk melihat hubungan antarparameter. Hasil studi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (sekitar 27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Kebanyakan badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah. Meskipun plasma cepat (*high speed streamer*, HSS) adalah pemicu utama CIR, parameter komponen selatan medan magnet antarplanet dan medan listrik memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

**Kata kunci:** CIR, badai geomagnet, siklus Matahari ke-24.

## ABSTRACT

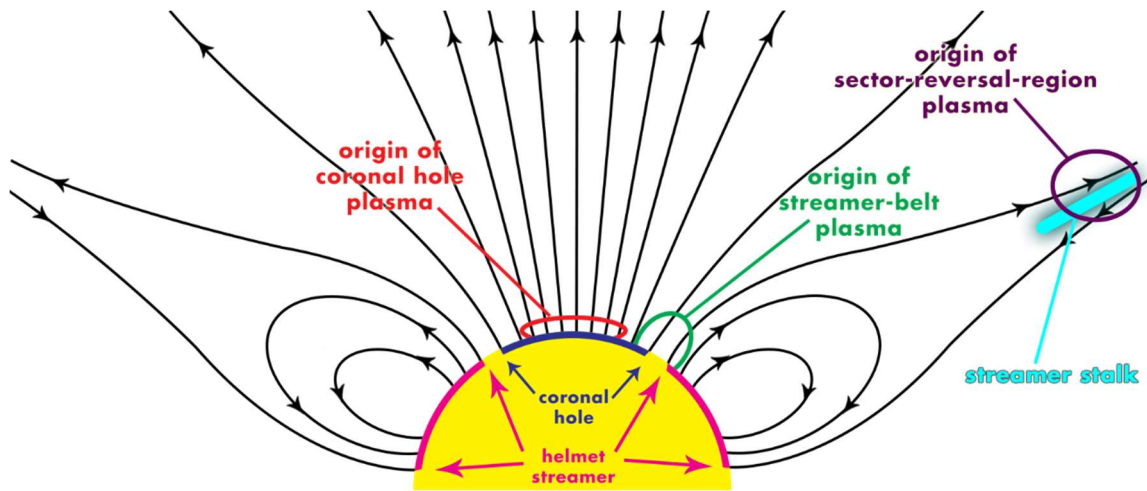
A *Co-rotating Interaction Region* (CIR) is formed by the interaction of high-speed solar wind with the preceding slower solar wind. It is well known that CIRs are one of the causes of geomagnetic storms. In this paper we have identified and analyzed geomagnetic storms triggered by CIR in the period 2008–2019 (*Solar Cycle* 24). Statistical distribution of CIR geomagnetic storm and CIR parameters in the solar wind are obtained. Correlation analysis of geomagnetic activity with solar wind parameters are conducted to inspect the relationship between parameters. Our results show that around 27% of the geomagnetic storms at *Solar Cycle* 24 are caused by CIRs. Most of these CIR geomagnetic storms are at minor storm levels. Although high speed streamer (HSS) is the main trigger for the CIRs, the parameters of the southern component of the interplanetary magnetic field and electric field play a more crucial role than the solar wind speed at the level of disturbance of the CIR geomagnetic storms.

**Keywords:** CIR, geomagnetic storm, solar cycle 24.

## 1. Pendahuluan

Angin Matahari adalah aliran plasma dan partikel berkecepatan supersonik yang timbul dari permukaan Matahari, yaitu pada lapisan korona yang berekspansi ke ruang antarplanet. Daerah pada Matahari dengan konfigurasi magnet yang berbeda akan menimbulkan jenis angin Matahari yang berbeda pula (Gambar 1). Angin Matahari yang berkecepatan rendah, berkepadatan sedang dan cenderung pada keadaan *steady*

*state* berasal dari tepi sabuk *streamer* dan atau dari tepi lubang korona dekat daerah sabuk *streamer*; angin Matahari lambat, berkepadatan tinggi dan sangat tidak homogen dihasilkan dari daerah *sector-reversal*, sedangkan Angin Matahari cepat (HSSWS/*High Speed Solar Wind Streams* atau biasa juga disingkat HSS/*High Speed Streams*) berasal dari lubang korona (Habbal *et al.*, 1997; Suess *et al.*, 2009; Borovsky, 2018).



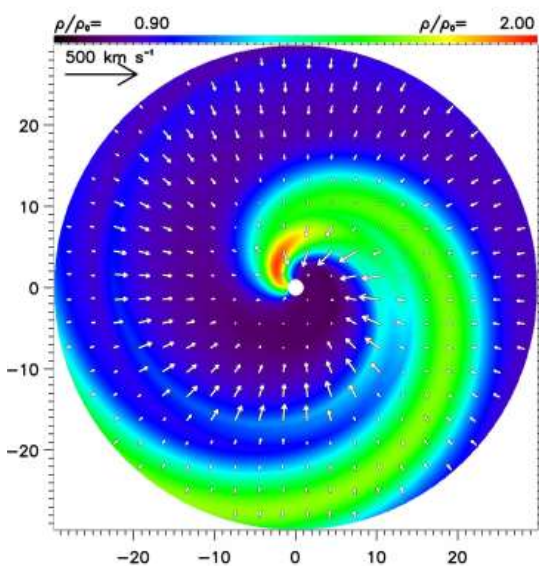
Gambar 1. Ilustrasi struktur magnetik Matahari sebagai sumber angin Matahari (Musafar & Winarko, 2020)

Angin Matahari ini menjalar dari permukaan Matahari dalam arah radial mendekati bentuk spiral Archimedes. Pada jarak tertentu plasma angin Matahari cepat akan menyusul plasma lambat yang arah medan magnetnya lebih melengkung dibandingkan dengan yang lebih cepat. Keduanya berinteraksi menghasilkan daerah terkompresi dan gelombang kejut sehingga membentuk suatu konfigurasi plasma yang tekanan dan kerapatannya lebih tinggi, disebut *solar wind Stream Interaction Region* (SIR, Richardson, 2018). Daerah yang terkompresi ini ikut berotasi dengan Matahari (*co-rotate*) sehingga lebih sering disebut sebagai *Co-rotating Interaction Region* (CIR, Gambar 2).

CIR menjalar di ruang antar planet dengan kecepatan tinggi, membawa partikel dan ion-ion berat dari Matahari serta medan magnet antarplanet (*Interplanetary Magnetic Field/IMF*) yang memengaruhi cuaca antariksa. Jika arah CIR menuju ke Bumi dan berinteraksi dengan magnetosfer Bumi saat IMF dominan ke arah selatan, maka terjadi transfer energi dari plasma angin Matahari ke magnetosfer Bumi yang dapat memicu gangguan medan magnet Bumi. Gangguan geomagnet inilah yang berpotensi menyebabkan gangguan teknologi manusia, baik yang berbasis antariksa seperti satelit, atau gangguan kelistrikan di permukaan Bumi seperti GIC (*Geomagnetically Induced Current*).

Pemicu utama CIR adalah aliran HSS. Studi analisis HSS telah dipaparkan dalam beberapa penelitian terdahulu dan didefinisikan dalam berbagai kriteria. Berdasarkan Bame *et al.*, (1976), HSS adalah variasi kecepatan angin Matahari dengan peningkatan lebih besar atau sama dengan 150 km/s pada interval 5 hari. HSS dari lubang korona lebih banyak terjadi di siklus minimum Matahari (Heinemann *et al.*, 2018), dengan laju plasma cepat rata-rata dalam 1 hari di atas 500 km/s (Broussard *et al.*, 1978). Lindblad & Lundstedt, (1981) mendefinisikan HSS sebagai kondisi saat selisih tiga jam-an terendah dan tiga jam-an tertinggi pada hari berikutnya lebih besar dari 100 km/detik, dalam waktu setidaknya dua hari, dan membangun katalog HSS pada kurun tahun 1964–1975 berdasarkan definisi tersebut.

Pada studi ini, HSS didefinisikan sebagai peningkatan kecepatan angin Matahari di atas 100 km/detik, dengan



Gambar 2. Visualisasi CIR berdasarkan model hidrodinamik. Spektrum warna menyatakan kerapatan relatif (Lobel, 2008).

kecepatan puncak/maksimum lebih dari 400 km/detik, pada durasi setidaknya dua hari (Mavromichalaki & Vassilaki, 1998). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi plasma cepat pemicu CIR dan mengetahui karakteristik parameter angin Matahari pada badai geomagnet yang terkait CIR pada siklus Matahari (*Solar Cycle*, SC) ke-24.

## 2. Metodologi

### 2.1. Data

Data parameter angin Matahari di titik L1 diperoleh dari arsip *Global Geospace Science* (GGS) WIND dan satelit ACE pada GSFC/SPDF-OMNIWeb (laman [omniweb.gsfc.nasa.gov/](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/)), dirata-ratakan dalam setiap jam. Parameter-parameter angin Matahari yang digunakan adalah kerapatan proton ( $n$ ) dalam partikel/cm<sup>3</sup>, komponen utara-selatan medan magnet antarplanet (IMF  $B_z$ ) pada koordinat GSM dalam nT, Temperatur plasma dalam K, kecepatan angin Matahari dalam km/detik, Tekanan ( $P$ ) dalam nPa. Medan listrik ( $E_y$ ) dihitung dari persamaan diferensial koreksi  $Dst^*$  (Burton *et al.*, 1975):

$$\frac{dDst}{dt} = Q(t) = \frac{Dst^*}{\tau} \quad (1)$$

Dengan  $\tau$  adalah waktu peluruhan partikel di arus cincin yang hilang ke atmosfer melalui presipitasi atau pertukaran muatan. Nilai  $Q$  sebagai fungsi waktu adalah laju energi injeksi ke arus cincin, sebanding medan listrik fajar-senja dan biasa dinotasikan dengan  $vB_z$ , dalam koordinat GSM.

Tabel 1. Konversi indeks k untuk wilayah indonesia (Juangsih, 2015).

Kondisi Geomagnet [indeks K]	Indeks Dst/ Gangguan $\Delta H$ (nT)
Tenang [1-3]	$\leq -25,4$
Aktif [4]	$-25,5 - (-44,9)$
Badai Lemah [5]	$-45 - (-79,2)$
Badai Sedang [6]	$-79,3 - (-139,6)$
Badai Kuat [7]	$-139,7 - (-245,9)$
Badai Sangat Kuat [ $\geq 8$ ]	$\geq 246$

Data CME diperoleh dari katalog SOHO-LASCO *Coordinated Data Analysis Workshop* (CDAW) *Data Center* ([cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/index.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html)). Data kecepatan (km/detik) digunakan untuk

perhitungan perkiraan waktu transit CME yang geoeftif, yaitu mengarah ke Bumi dan berpotensi memengaruhi medan geomagnet. Verifikasi data visual CME menggunakan arsip citra bergerak SDO-AIA/HMI ([sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/](http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/)).

Aktivitas geomagnet yang digunakan dalam studi ini adalah indeks Dst (nT) dari *World Data Center* (WDC) Kyoto ([wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html)), dengan klasifikasi tingkat gangguan berdasarkan konversi pada Tabel 1.

### 2.2. Metode Penelitian

HSS pada siklus Matahari ke-24 diidentifikasi dengan menggunakan kriteria Mavromichalaki & Vassilaki, (1998) dan Xystouris *et al.*, (2013). Ada beberapa pendekatan yang dilakukan jika terdapat gap data: Jika gap data terdapat pada awal HSS dengan kecepatan awal di atas 400 km/detik, kecepatan rata-rata sebelum peningkatan dianggap sebagai data pertama. Jika gap terjadi di puncak sehingga kecepatan maksimum tidak terlihat, maka kecepatan maksimum ditentukan berdasarkan nilai kecepatan tertinggi dari data yang tersedia. Sedangkan jika gap data terjadi di fase penurunan kecepatan, titik terakhir data yang tersedia dianggap sebagai akhir dari HSS. Jika HSS terjadi pada rentang kurang dari 3 jam dari HSS sebelumnya, maka dianggap hanya terjadi 1 kali HSS.

Klasifikasi badai geomagnet ditampilkan pada Tabel 1. Studi difokuskan pada badai geomagnet yang dipicu hanya oleh CIR, oleh karena itu, kontribusi dari CME perlu dieliminasi. Kategori CME geoeftif berdasarkan Ravishankar & Michalek, (2019), dengan pendekatan perkiraan waktu transit diturunkan dari model empirik propagasi CME (Gopalswamy *et al.*, 2001):

$$a = 2,193 - 0,0054v_0 \quad (2)$$

dengan  $a$  adalah percepatan efektif (m/s<sup>2</sup>), diperoleh dari selisih antara kecepatan CME dan ICME dibagi waktu transit dari Matahari ke wahana pengamat, dan  $v_0$  adalah kecepatan awal. Jika percepatan efektif terhenti di jarak tertentu dari matahari ( $d_1$ ) dan kemudian dari titik tersebut mencapai jarak sekitar Bumi ( $d_2$ ) dengan kecepatan konstan, maka waktu transit dihitung menggunakan

$$t = t_1 + t_2; \text{ dengan}$$

$$t_1 = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2ad_1}}{a} \tag{3}$$

$$t_2 = \frac{d_2}{\sqrt{v_0^2 + 2ad_1}}$$

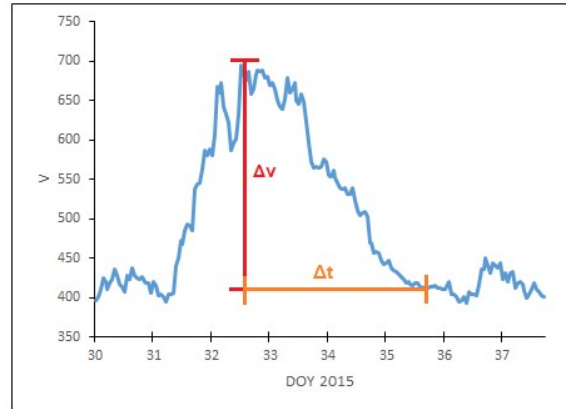
Kejadian badai geomagnet nonCME kemudian dianalisis untuk mengetahui karakteristik badai geomagnet yang dipicu CIR. Analisis korelasi silang dilakukan untuk melihat keterkaitan antarparameter. Seluruh data yang digunakan adalah data pada siklus Matahari ke-24, yaitu Desember 2008–Desember 2019.

### 3. Hasil dan Pembahasan

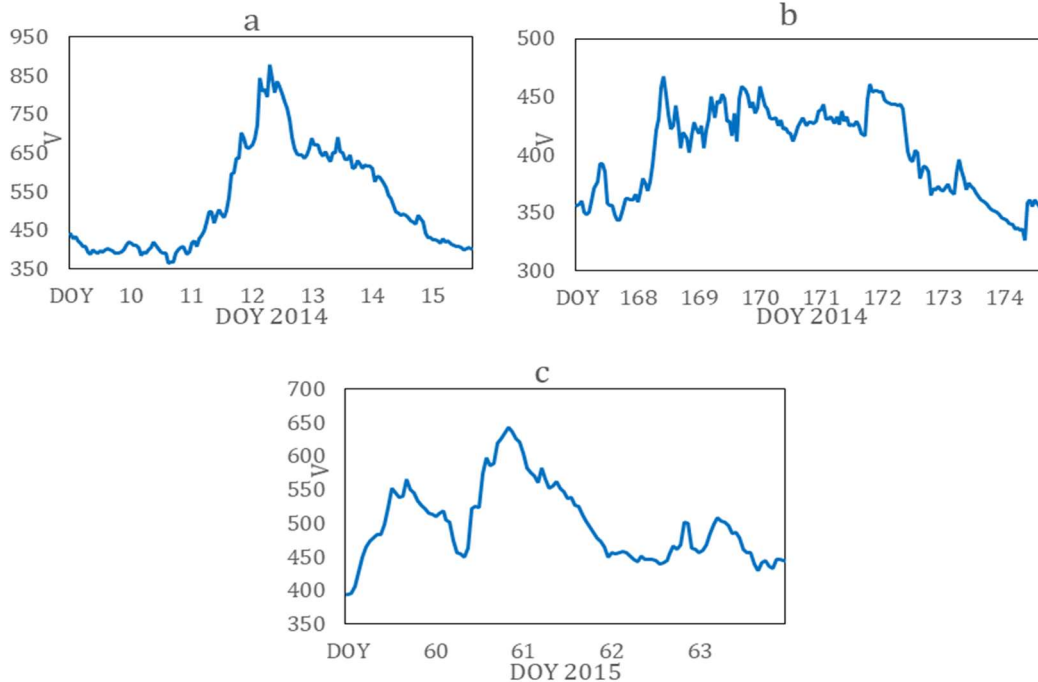
#### 3.1. Identifikasi HSS

HSS pada studi ini didefinisikan sebagai peningkatan kecepatan angin Matahari lebih dari 100 km/detik dengan durasi 2 hari atau lebih, dengan nilai maksimum > 400 km/detik. Contoh ilustrasi HSS yang terjadi pada 31 Januari–5 Februari 2015 sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3. Suatu HSS dapat memiliki puncak tunggal, rangkap, atau beruntun. HSS dengan puncak tunggal adalah kejadian HSS dengan 1 nilai maksimum, HSS

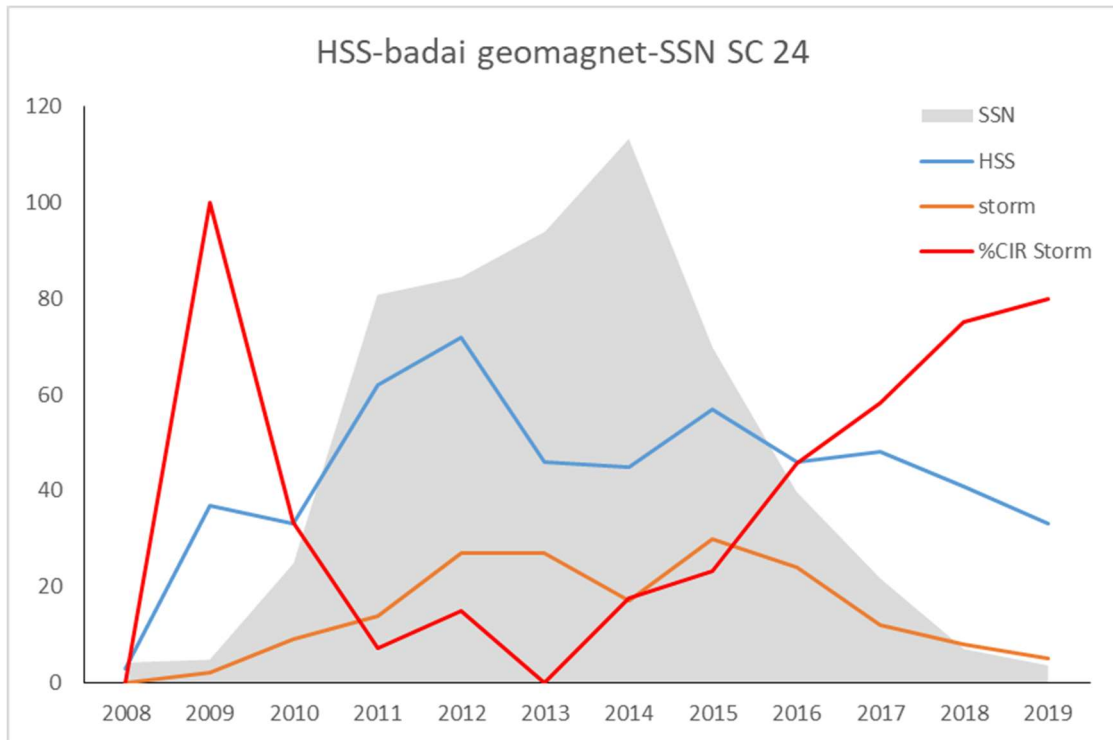
puncak rangkap adalah HSS dengan beberapa puncak dengan selisih <10 km/detik, sedangkan HSS dengan puncak beruntun adalah HSS yang disusul dengan HSS lain saat fase *recovery*-nya belum mencapai kecepatan rata-rata. Sketsa tipe-tipe HSS ini ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. HSS pada 31 Januari–5 Februari 2015. Garis merah menandakan perubahan kecepatan, sedangkan garis oranye menggambarkan durasi waktu. Absis adalah hari ke-n dalam tahun 2015, ordinat adalah kecepatan dalam km/detik.



Gambar 4. Tipe HSS pada SC 24: a) puncak tunggal, b) puncak rangkap dan c) puncak beruntun.



Gambar 5. Jumlah bilangan bintang Matahari (*Sunspot Number*, SSN), HSS, kejadian badai geomagnet, dan persentase badai geomagnet CIR pada SC 24

Gambar 5 menampilkan plot jumlah kejadian bilangan bintang Matahari (SSN), HSS dan badai geomagnet pada siklus Matahari ke-24. Berdasarkan data angin Matahari, total terdapat 523 kejadian HSS pada siklus Matahari ke-24. Tidak semua HSS yang teridentifikasi di L1 bersifat geoeftif. Dari plot jumlah HSS (biru) dan badai geomagnet (oranye) pada Gambar 5 tampak bahwa distribusi jumlah HSS dan badai geomagnet memiliki pola yang serupa dengan rata-rata tahunan jumlah bintang Matahari (area abu-abu). Hal ini dapat cukup dipahami dengan sederhana bahwa HSS dan badai geomagnet adalah kejadian yang sangat berkaitan erat dengan aktivitas matahari (koefisien korelasi,  $cc$  SSN-HSS  $\sim 0,63$ ; SSN-badai geomagnet  $\sim 0,75$  dan HSS-badai geomagnet  $\sim 0,73$ ).

Jumlah kejadian HSS terbanyak dalam 1 tahun terjadi pada tahun 2012, yakni sebanyak 72 kejadian, yang merupakan fase puncak siklus, dan 2015, saat fase siklus Matahari mulai mengalami penurunan, yaitu sebanyak 57 kejadian. Merujuk pada definisi HSS dengan durasi 2 hari atau lebih, pada tahun 2012 Bumi terpapar HSS setidaknya setara dengan 144 hari atau 4,8 bulan. Jumlah HSS pada awal siklus Matahari ke-24, tahun 2008, tercatat paling sedikit yaitu hanya 3 kejadian karena hanya mencakup satu

bulan, yaitu Desember. Peningkatan kecepatan tertinggi HSS pada SC ke-24 adalah 464 km/detik, terjadi pada HSS 13 Januari 2014. Tercatat kecepatan angin Matahari mencapai kecepatan maksimumnya yaitu 878 km/detik.

Jika diasumsikan seluruh badai geomagnet yang terjadi diakibatkan oleh HSS, maka rata-rata tahunan geoeftifitas HSS pada SC 24 adalah 29,5%. Dengan *range* data 58%, nilai rata-rata tahunan ini tentu kurang representatif karena banyaknya kejadian sangat bergantung pada fase siklus Matahari. HSS dapat bersumber dari lubang korona maupun *flare-CME* (Maris & Maris, 2005), dan dalam beberapa kejadian, badai geomagnet dapat dipicu oleh CME dan disertai pula akselerasi HSS dari lubang korona, terutama pada fase naik dan turun siklus Matahari, sehingga pola pada Gambar 5, terutama HSS-badai geomagnet, tampak bersesuaian.

### 3.2. Identifikasi Badai CIR

Pemicu badai geomagnet adalah CME, CIR, atau keduanya (Watari, 2017; Singh *et al.*, 2017). Total terdapat 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24. Untuk mengidentifikasi dan menganalisis badai geomagnet yang diakibatkan hanya oleh CIR,

maka kontribusi CME geoeftif harus dieliminasi. CME geoeftif sesuai kriteria Kim *et al.*, (2008) yaitu CME yang bersumber dari  $0 < L < 30$  untuk CME lambat (kecepatan awal  $< 800$  km/detik), dan  $30 < L < 60$  untuk CME cepat ( $\geq 800$  km/detik), dengan  $L$  adalah bujur Matahari. Hasil studi Ravishankar & Michalek (2019), waktu transit CME dengan kecepatan  $< 1000$  km/detik berada pada kisaran 50–140 jam, sedangkan untuk CME dengan kecepatan  $> 1000$  km/s umumnya adalah 40–60 jam. Untuk menentukan perkiraan waktu transit, digunakan model empirik propagasi CME pada persamaan (2), (Gopalswamy *et al.*, 2001). Berdasarkan kinematika gerak lurus berubah beraturan,

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as$$

Dengan  $v_t$  adalah kecepatan akhir, dan  $s$  adalah jarak. Pada nilai percepatan negatif (perlambatan), ketika  $v_0^2 = -2as$ , maka kecepatan akhir akan bernilai nol. Hal ini perlu dikoreksi karena kecepatan akhir CME akan selalu sama dengan kecepatan angin Matahari dan tidak bernilai nol. Sehingga untuk CME yang dilontarkan dengan kecepatan lebih tinggi dari angin Matahari, perlambatan terhenti pada  $v_0^2 - 2as = v_{sw}^2$ . Sebaliknya, untuk CME yang lebih lambat dari angin Matahari, percepatan terhenti pada  $v_0^2 + 2as = v_{sw}^2$ .

Menggunakan data kecepatan angin Matahari pada siklus Matahari ke-24, diperoleh nilai rata-rata kecepatan angin Matahari 412 km/detik. Dengan asumsi ketiadaan percepatan (percepatan bernilai nol) dan substitusi pada persamaan (2), maka diperoleh nilai kecepatan 406 km/detik, yang dianggap cukup mendekati nilai kecepatan rata-rata angin Matahari, sehingga model pada persamaan (2) dapat dianggap valid untuk diterapkan pada studi ini.

Dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (~27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Dengan nilai modus ~-47 nT, kebanyakan badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah. Sebanyak 38 kejadian badai geomagnet CIR adalah badai lemah, 9 kejadian badai menengah, dan 1 sisanya badai kuat. Plot garis merah pada Gambar 5 menunjukkan persentase badai geomagnet CIR tahunan yang tampak berbanding terbalik dengan grafik plot lainnya. Pada saat aktivitas Matahari minimum tahun 2019, persentase

badai CIR bahkan bernilai maksimal, 100%, karena kedua badai geomagnet yang terjadi pada tahun tersebut dipicu CIR tanpa disertai CME geoeftif. Pada tahun 2019 juga terjadi dominasi badai geomagnet CIR dengan nilai persentase 80%. Sebaliknya, pada sekitar puncak siklus Matahari ke-24—tahun 2011–2014, persentase badai CIR adalah yang terendah dibanding yang lainnya. Bahkan, sepanjang tahun 2013 terjadi 27 badai geomagnet yang tidak satupun disebabkan oleh CIR. Hal ini sesuai dengan hasil Bravo *et al.*, (1997) yang menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara SSN dengan luas lubang korona pemicu HSS pada SC ke 20, 21, dan 22.

### 3.3. Analisis Parameter CIR

Karakteristik umum CIR pada parameter plasma antarplanet adalah terjadi peningkatan drastis densitas proton ( $n$ ) melebihi *threshold* (~10 partikel/cm<sup>3</sup>) dan bertahan dalam jangka waktu 1 hari. Profil densitas cenderung berkebalikan dengan kecepatan ( $v$ ). Puncak medan magnet antarplanet di daerah kompresi umumnya proporsional terhadap kecepatan, dengan polaritas yang cenderung tetap (Tsurutani *et al.*, 1987). Selain itu temperatur proton ( $T$ ) bervariasi dengan pola yang mirip dengan kecepatan (Maromichalaki & Vassilaki, 1998). Diketahui pula bahwa medan magnet antarplanet memegang peranan penting dalam kejadian badai geomagnet, terutama komponen arah selatan (IMF  $B_z$ ) (Rostoker & Fälthammar, 1967). Studi lain oleh Burlaga & Lepping, (1977) dan Kikuchi *et al.*, (2008) menyebutkan pengaruh penting penetrasi medan listrik magnetosfer ke ionosfer pada badai geomagnet. Sebelumnya telah dibahas pada bab Pendahuluan bahwa CIR melibatkan daerah kompresi (tekanan) di medium antarplanet. Berdasarkan karakteristik umum parameter badai geomagnet dan CIR tersebut, parameter statistik untuk minimum Dst, IMF  $B_z$ , maksimum kecepatan, densitas proton, tekanan, medan listrik, medan total, dan medan listrik untuk badai geomagnet CIR ditampilkan pada Tabel 2. Adapun koreksi untuk medan listrik pada persamaan (1) dihitung menggunakan syarat kondisi persamaan O'Brien & McPherron, (2000):

$$Q(VB_z) = \begin{cases} |VB_z| & B_z < 0 \\ 0 & B_z \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$



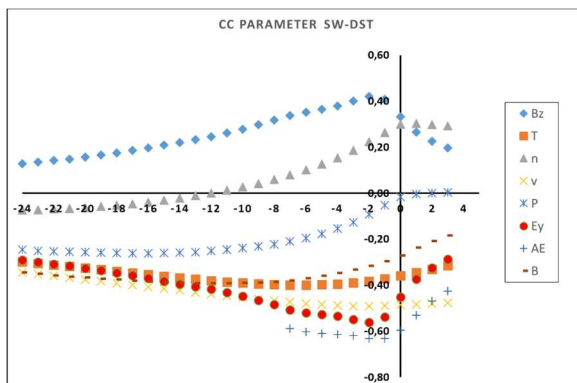
Tabel 2. Parameter statistik badai geomagnet CIR SC24

parameter	B	IMF Bz	T	n	v	P	Ey	Dst
rata-rata	13,27	-9,34	367600	25,10	594	8,12	4,34	-66,38
SD	4,39	3,61	219900	12,93	106	2,77	1,48	22,48
median	12,95	-8,15	349500	23,95	613	7,63	4,01	-59,50
min	4,80	-20,80	72900	4,70	362	3,50	2,29	-174,00
max	24,00	-4,50	1482000	61,60	761	14,75	8,28	-46,00
range	19,20	16,30	1409100	56,90	399	11,25	5,99	128,00
koef variasi (%)	33,07	38,58	59,81	51,50	17,87	34,15	34,01	33,87

Badai geomagnet yang dipicu CIR pada SC ke-24 berada pada rentang Dst minimum -46 nT (badai lemah) hingga -175 nT (badai kuat). Dengan *range* data 128 nT, nilai ini sedikit berbeda dibandingkan hasil Alves *et al.*, (2006) yang menyebutkan indeks Dst pada CIR geoeftif berada pada kisaran +9 sampai -131 nT. Hal ini dikarenakan studi tersebut menggunakan data Dst hingga 2 hari setelah CIR dan dapat mencakup fase *recovery* badai sehingga terdapat nilai Dst positif pada populasi data, sementara pada studi ini lebih difokuskan hanya saat kejadian badai terjadi. Nilai rata-rata minimum Dst berada pada -66 nT dengan nilai tengah -59,5 nT (badai sedang, Tabel 1). Kedua parameter ini tidak menunjukkan keterwakilan data karena pada kenyataannya, CIR cenderung lebih memicu badai lemah (~79%) dibanding badai sedang. Hal ini karena dengan nilai standar deviasi 22,48; koefisien variasi 33,86% dan jangkauan data 128 nT, populasi data Dst memiliki nilai yang ekstrim yaitu satu

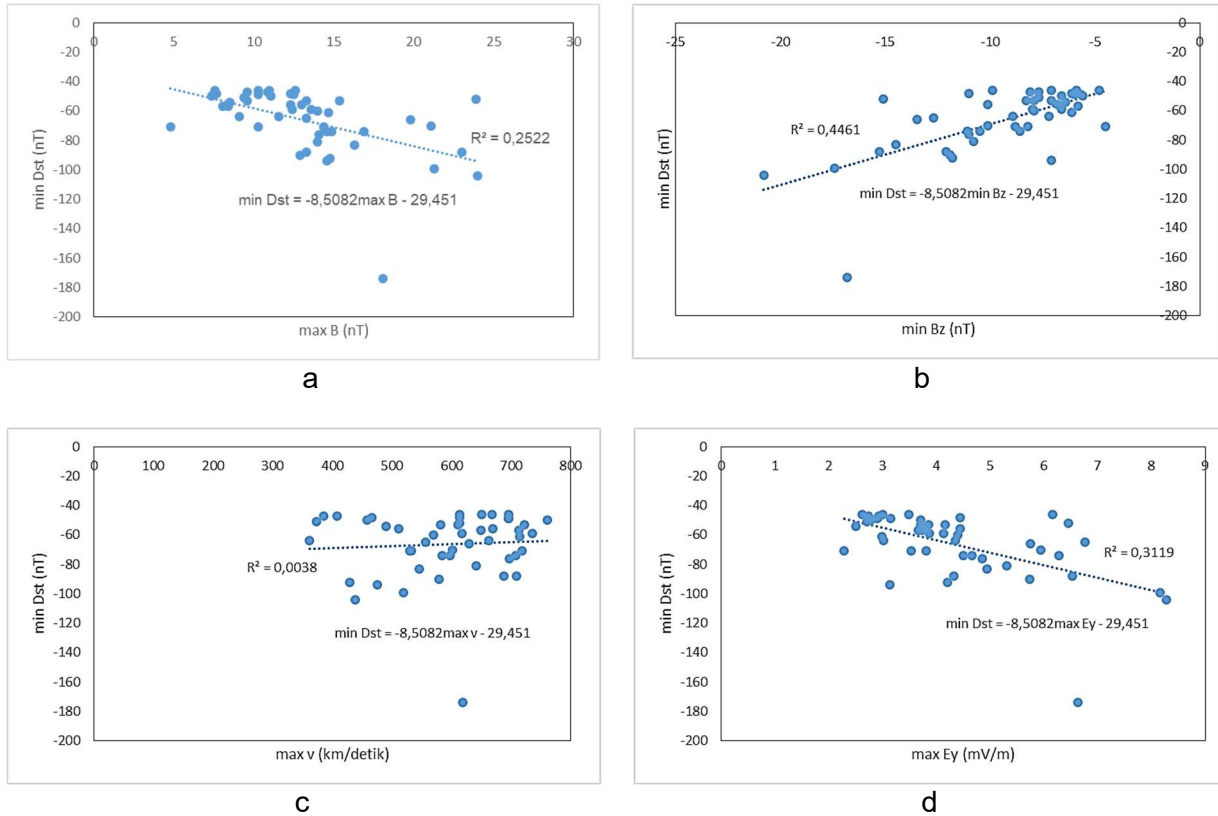
kejadian badai geomagnet kuat pada 26 Agustus 2018 (minimum Dst -174 nT).

Nilai kecepatan angin Matahari maksimum pada badai geomagnet CIR siklus Matahari ke-24 adalah 761 km/detik, dengan rata-rata 593,7 km/detik. Tabel 2 juga menunjukkan koefisien variasi maksimum kecepatan angin Matahari adalah yang terkecil dibandingkan parameter lainnya, yang artinya dispersi datanya kecil sehingga rata-rata dan median bersifat representatif. Berdasarkan hasil tersebut, kriteria untuk HSS sebagai pemicu CIR yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, yaitu maksimal kecepatan > 400 km/detik dianggap telah sesuai untuk mendefinisikan HSS. Nilai maksimum medan listrik 8,28 mV/m pada Tabel 2 sesuai dengan kriteria Gonzalez & Tsurutani (1987), bahwa untuk badai geomagnet intens (Dst < -100 nT), medan listrik harus bernilai lebih besar dari 5 mV/m. Pada siklus Matahari ke-24, nilai maksimum medan listrik tersebut terjadi pada badai geomagnet dengan intensitas -104 nT.



parameter	cc opt	jeda
B-Dst	-0,39	-13
Bz-Dst	0,42	-2
n-Dst	0,30	1
V-Dst	-0,49	-2
P-Dst	-0,26	-17
T-Dst	-0,40	-6
Ey-Dst	-0,56	-2
AE-Dst	-0,63	-2

Gambar 6. Korelasi silang parameter angin Matahari-aktivitas geomagnet (Dst). Sumbu-x adalah jeda dalam jam, nilai indeks AE sebagai pembanding. *cc opt* adalah nilai korelasi terbaik.

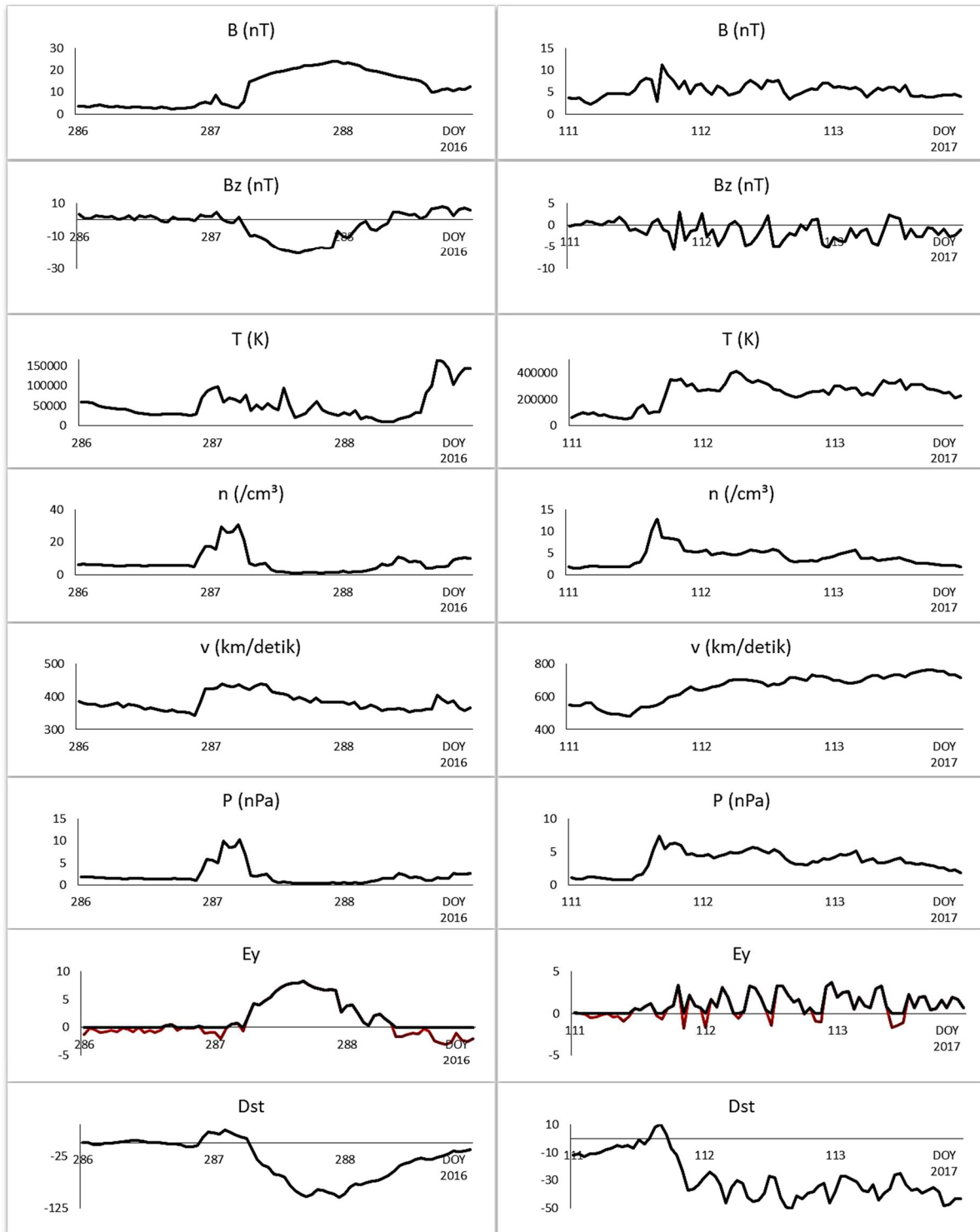


Gambar 7. Plot *scatter* distribusi parameter angin Matahari untuk badai geomagnet CIR: a) min Dst terhadap max medan total ( $R = -0,5$ ); b) min Dst terhadap min komponen selatan medan magnet antarplanet Bz ( $R = 0,67$ ); c) min Dst terhadap max kecepatan v ( $R = 0,06$ ); dan d) min Dst terhadap medan listrik Ey ( $R = -0,56$ ).

Gambar 6 menunjukkan ilustrasi korelasi silang antarparameter dan nilai terbaiknya. Dapat dilihat bahwa korelasi terbaik adalah pada kecepatan angin Matahari-Dst ( $cc = -0,49$ ), medan listrik-Dst ( $cc = -0,56$ ), dan komponen selatan medan magnet antarplanet-Dst (IMF Bz,  $cc = 0,42$ ). Dengan jeda 2 jam (tanda negatif mengandung makna parameter angin Matahari mendahului badai), artinya puncak badai geomagnet di lintang rendah pada SC ke-24 umumnya terjadi pada 2 jam setelah medan magnet antarplanet mengarah ke selatan disertai peningkatan kecepatan dan penguatan medan listrik. Sebagai perbandingan, indeks AE berkorelasi kuat dengan indeks Dst pada jeda 2 jam ( $cc -0,63$ ) yang dapat diartikan bahwa gangguan geomagnet memerlukan waktu 2 jam untuk berpropagasi dari daerah polar ke lintang rendah.

Nilai korelasi yang sedikit berbeda ditunjukkan pada hubungan medan total dengan Dst ( $cc 0,39$ ) namun dengan jeda

yang cukup jauh yaitu 13 jam. Dengan kata lain, pada SC ke-24 umumnya penguatan medan magnet total dapat terjadi 13 jam sebelum puncak badai geomagnet, dengan transfer energi pada 6 jam sebelum puncak badai namun memerlukan “pintu masuk” yaitu medan magnet antarplanet arah selatan pada 2 jam menjelang puncak badai, kemudian terjadi rekoneksi dengan medan magnet Bumi sehingga mengakibatkan injeksi partikel bermuatan ke magnetosfer, terjadi gangguan geomagnet yang berpropagasi dari daerah polar ke lintang yang lebih rendah. Bersamaan dengan penguatan arus cincin, indeks Dst terdepresi hingga tingkatan tertentu dan terdeteksi sebagai badai geomagnet. Hubungan antarparameter yang lebih kecil ditunjukkan pada korelasi antara tekanan dan densitas dengan aktivitas geomagnet ( $cc \sim 0,3$ ). Hal ini menandakan bahwa hanya sebagian kecil kejadian badai geomagnet yang disertai dengan gelombang kejut (*shock*).



Gambar 8. Badai geomagnet CIR pada: (a) minimum IMF  $B_z$ , 13 Oktober 2016 dan (b) maksimum kecepatan, 22 April 2017. Plot merah pada medan listrik ( $E_y$ ) adalah nilai non koreksi.

Untuk mengetahui keterkaitan antara nilai ekstrim masing-masing parameter  $B$ ,  $B_z$ ,  $v$ , dan  $E_y$  dengan magnitudo badai geomagnet CIR saat badai berlangsung, diplot distribusi masing-masing parameter pada tiap kejadian badai geomagnet CIR yang ditampilkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa maksimum kecepatan berkorelasi sangat lemah dengan

minimum Dst. Artinya, kecepatan maksimum tidak serta-merta memengaruhi kuat badai geomagnet CIR yang terjadi. Sebelumnya hasil serupa diperoleh pada kejadian badai geomagnet CIR tahun 1966–2004 (Richardson *et al.*, 2006). Untuk korelasi maksimum medan magnet total dengan minimum Dst, masih dalam kategori sedang namun lebih baik dibandingkan hasil pada

Gambar 5. Sedangkan untuk korelasi medan listrik-Dst menunjukkan hasil yang sama karena koreksi O'Brien-Mcpherron, (2000) pada persamaan (4). Meskipun secara umum berkorelasi sedang dengan indeks Dst, minimum komponen selatan medan magnet antarplanet berkorelasi kuat dengan minimum Dst. Artinya, saat badai, semakin kuat arah selatan medan magnet antarplanet, semakin kuat pula magnitudo badai geomagnet CIR yang terjadi. Sebagai ilustrasi, Gambar 7 menunjukkan perbandingan parameter-parameter pada saat badai geomagnet CIR dengan arah selatan terkuat (13 Oktober 2016, Gambar 7a) versus kecepatan tertinggi (22 April 2017, Gambar 7b). Karena diturunkan dari massa partikel, tekanan dan densitas memiliki profil yang serupa, demikian halnya dengan medan listrik yang diturunkan dari komponen selatan medan magnet antarplanet. Meskipun hanya dengan kecepatan maksimum sekitar 450 km/detik, intensitas badai geomagnet pada 13 Oktober 2016 mencapai hingga -104 nT, dibandingkan dengan badai geomagnet pada 22 April 2017 dengan kecepatan pada 700-800 km/detik, bahkan dengan durasi kecepatan tinggi yang lama. Meskipun HSS adalah pemicu utama badai geomagnet CIR, perbandingan kedua badai ini menunjukkan bahwa magnitudo dan durasi parameter komponen selatan medan magnet antarplanet, memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan studi yang telah dilakukan, total terdapat 523 kejadian HSS pada siklus Matahari ke-24. Jumlah kejadian HSS terbanyak dalam 1 tahun adalah pada tahun 2012, sebanyak 72 kejadian, yang merupakan fase puncak siklus Matahari. Peningkatan kecepatan tertinggi HSS pada SC ke-24 adalah 464 km/detik, terjadi pada HSS 13 Januari 2014 saat kecepatan angin Matahari mencapai kecepatan maksimumnya yaitu 878 km/detik. Dari 176 kejadian badai geomagnet pada SC ke-24, sebanyak 48 (sekitar 27%) badai geomagnet diakibatkan oleh CIR. Dengan nilai modus  $\sim -47$  nT, kebanyakan (38 kejadian) badai geomagnet yang dipicu CIR ini berada pada level badai lemah, 9 kejadian badai menengah, dan 1 sisanya badai kuat. Jumlah badai geomagnet tahunan CIR ini berbanding terbalik dengan SSN.

Korelasi terbaik parameter angin Matahari-aktivitas geomagnet adalah pada kecepatan angin Matahari-Dst ( $cc = -0,49$ ), medan listrik-Dst ( $cc = -0,56$ ), dan komponen selatan medan magnet antarplanet-Dst (IMF Bz,  $cc = 0,42$ ) dengan jeda 2 jam. Kecepatan maksimum tidak serta-merta memengaruhi kuat badai geomagnet CIR yang terjadi. Meskipun HSS adalah pemicu utama badai geomagnet CIR, parameter komponen selatan medan magnet antarplanet dan medan listrik memegang peranan yang lebih krusial dibandingkan kecepatan angin Matahari pada tingkat gangguan badai geomagnet CIR.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim *Geospace Science* (GGS) WIND dan ACE pada GSFC/SPDF yang menyediakan data parameter angin Matahari, tim WDC Geomagnet-Kyoto untuk data indeks Dst, Poklit Geomagnet Pusat Sains Antariksa, dan Mitra Bestari Jurnal Sains Dirgantara.

Makalah ini telah melewati proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Rhorom Priyatikanto sebagai editor.

#### Pernyataan Kontribusi

AW merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, menyusun metodologi, melakukan pengolahan data, dan menyusun naskah, FN adalah kontributor anggota yang berkontribusi dalam studi literatur dan analisis makalah ini.

#### Rujukan

- Alves, M.V., Echer, E., & Gonzalez, W.D. (2006). Geoeffectiveness of Corotating Interaction Regions as Measured by Dst Index. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Bame, S.J., Asbridge, J.R., Feldman, W.C., & Gosling, J.T. (1976). Solar Cycle Evolution of High-Speed Solar Wind Streams. *The Astrophysical Journal*, 207, 977-980.
- Burlaga, L. F., & Lepping, R. P. (1977). The causes of recurrent geomagnetic storms. *Planetary and Space Science*, 25(12), 1151-1160.
- Borovsky, J.E. (2018). On the Origins of the Intercorrelations between Solar Wind Variables. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(1), 20-29.

- Bravo, S., Cruz-Abeyro, J.A.L., & Rojas, D. (1997). The Spatial Relationship Between Active Regions and Coronal Holes And The Occurrence of Intense Geomagnetic Storms Throughout the Solar Activity Cycle. In *Annales Geophysicae* (Vol. 16, No. 1, pp. 49-54). Springer-Verlag.
- Burton, R.K., McPherron, R.L., & Russell, C.T. (1975). An Empirical Relationship between Interplanetary Conditions and Dst. *Journal of Geophysical Research* 80, 4204-4214.
- Broussard, R.M., Sheeley, N.R., Tousey, R., & Underwood, J.H. (1978). A Survey of Coronal Holes and their Solar Wind Associations throughout Sunspot Cycle 20. *Solar Physics*, 56(1), 161-183.
- Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Kaiser, M., & Howard, R.A. (2001). Predicting the 1-AU Arrival Times of Coronal Mass Ejections. *J. Geophys. Res.*, 106, 29,207–29,218.
- Gonzalez, W.D., & Tsurutani, B.T. (1987). Criteria of Interplanetary Parameters causing Intense Magnetic Storms (Dst < -100 nT). *Planetary and Space Science*, 35(9), 1101-1109.
- Habbal, S.R., Woo, R., Fineschi, S., O'Neal, R., Kohl, J., Noci, G., & Korendyke, C. (1997). Origins of the Slow and the Ubiquitous Fast Solar Wind. *The Astrophysical Journal Letters*, 489(1), L103.
- Heinemann, S.G., Temmer, M., Hofmeister, S.J., Veronig, A.M., & 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.
- Juangsih, M., 2015. Penentuan Indeks K Geomagnet Untuk Daerah Indonesia. *Tesis Magister Sains Kebumihan ITB*.
- Kikuchi, T., Hashimoto, K. K., & Nozaki, K. (2008). Penetration of Magnetospheric Electric Fields to the Equator during a Geomagnetic Storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A6).
- Kim, R.S., Cho, K.S., Kim, K.H., Park, Y.D., Moon, Y.J., Yi, Y., Lee, J., Wang, H. Song, H. & Dryer, M. (2008). CME Earthward Direction as an Important Geoeffectiveness Indicator. *The Astrophysical Journal*, 677(2), 1378.
- Lindblad, B.A., & Lundstedt, H. (1981). A Catalogue of High-Speed Plasma Streams in the Solar Wind. *Physics of Solar Variations* (pp. 197-206). Springer, Dordrecht.
- Lobel, A., (2008). Modeling DACs in UV Lines of Massive Hot Stars. *Clumping in Hot-Star Winds: International Workshop, Potsdam, Germany*.
- Maris, O. & Maris, G. (2005). *Specific Features of the High-Speed Plasma Stream Cycles*. *Advances in Space Research*, 35(12), 2129-2140.
- Mavromichalaki, H., & Vassilaki, G. (1998). Fast Plasma Streams Recorded Near the Earth during 1985–1996. *Solar Physics*, 183(1), 181-200.
- Musafar, L.M. & Winarko, A. (2020). Koping Angin Matahari dan Sistem Magnetosfer-Ionosfer Bumi: I. Sumber Angin Matahari dan Karakteristiknya. *Buletin Cuaca Antariksa*, 9(3).
- O'Brien, T.P., & McPherron, R.L. (2000). Forecasting the Ring Current Index Dst in Real Time. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(14), 1295-1299.
- Ravishankar, A., & Michalek, G. (2019). Estimation of Arrival Time of Coronal Mass Ejections in the Vicinity of the Earth Using SOLar and Heliospheric Observatory and Solar TERrestrial RELations Observatory Observations. *Solar Phys* 294:125.
- Richardson, I.G., Webb, D.F., Zhang, J., Berdichevsky, D.B., Biesecker, D.A., Kasper, J.C., Kataoka, R., Steinberg, J.T., Thomson, B.J., Wu, C.-C & Zhukov, A.N. (2006). Major geomagnetic storms (Dst ≤ -100 nT) generated by corotating interaction regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A7).
- Richardson, I. G. (2018). Solar Wind Stream Interaction Regions Throughout the Heliosphere. *Living reviews in solar physics*, 15(1), 1.
- Rostoker, G., & Fälthammar, C. G. (1967). Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface. *Journal of Geophysical Research*, 72(23), 5853-5863.
- Singh, A., Rathore, V.S., Singh, R.P., & Singh, A.K. (2017). Source Identification of Moderate (-100 nT < Dst < -50 nT) and Intense Geomagnetic Storms (Dst <

- 100 nT) during Ascending Phase of Solar Cycle 24. *Advances in Space Research*, 59(5), 1209-1222.
- Suess, S. T., Ko, Y. K., Von Steiger, R., & Moore, R. L. (2009). Quiescent Current Sheets in the Solar Wind and Origins of Slow Wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A4).
- Tsurutani, B.T., Burton, M.E., Smith, E.J., & Jones, D.E. (1987). Statistical Properties of Magnetic Field Fluctuations in the Distant Plasmasheet. *Planetary and space science*, 35(3), 289-293.
- Watari, S., (2017). Geomagnetic Storms of Cycle 24 and Their Solar Sources. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 1-8.
- Xystouris, G., Sigala, H., & Mavromichalaki, H. (2013). A Complete Catalogue of High-Speed Solar Wind Streams during Solar Cycle 23. *Sol Phys* 289:995-1012. DOI: 10.1007/s11207-013-0355-z.

# Evaluasi Skema Parameterisasi Model WRF untuk Pengamatan Kemunculan Awan dari Satelit Himawari-8 di atas Indonesia (Evaluation of WRF Model Parameterization Schemes for Observation of Cloud Occurrences from Himawari-8 Satellite over Indonesia)

F. Lasmono<sup>1</sup>, Risyanto<sup>1</sup>, I. Fathrio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset dan Teknologi Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 20-11-2019

Direvisi: 03-02-2021

Disetujui: 24-08-2021

## Korespondensi:

F. Lasmono

farid.lasmono@lapan.go.id

## ABSTRAK

Berbagai kombinasi skema parameterisasi kumululus dan mikrofisika telah diimplementasikan pada model WRF untuk menemukan skema terbaik kemunculan awan saat siang hari di atas Indonesia. Parameterisasi dilakukan dengan melakukan simulasi model ensemble resolusi tinggi selama sebulan menggunakan delapan skema kumululus dan empat skema mikrofisika. Selanjutnya hasil simulasi dibandingkan dengan data awan yang diturunkan satelit Himawari-8 pada tiga level ketinggian. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa kombinasi skema kumululus Kain-Fritsch dan skema tanpa kumululus/eksplisit, serta skema mikrofisika WSM3 menghasilkan korelasi yang cukup tinggi untuk kemunculan awan berdasarkan perhitungan nilai skill (*score skill*) dan analisa spasial. Secara umum, korelasi kemunculan awan luaran WRF dan Himawari-8 lebih baik pada awan tinggi daripada awan menengah atau rendah, dan hasil model cenderung overestimate di semua level ketinggian.

**Kata kunci:** WRF, Awan, Himawari-8, Model, Satelit

## ABSTRACT

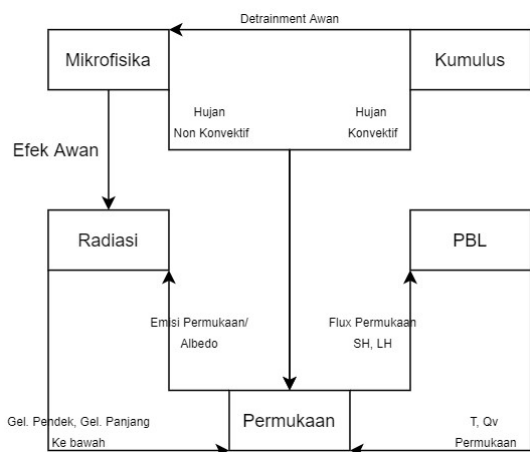
Various combinations of cumulus and microphysics parameterization schemes have been implemented in the WRF model to find the best scheme of cloud occurrences during the day over Indonesia. Parameterization was done by simulating a high-resolution ensemble model for a month using eight cumulus schemes and four microphysics schemes for three levels of height. The simulation results were then compared to cloud data derived from Himawari-8 satellite. The results of the comparison show that the combination of Kain-Fritsch and explicit cumulus scheme, and WSM3 microphysics scheme produced good correlations for cloud occurrences based on the calculation of skill scores and spatial analysis. In general, the cloud correlations of WRF output and Himawari-8 were better at high cloud levels than medium or low clouds, and the WRF model results tended to be over-estimated at all height levels.

**Keywords:** WRF, Cloud, Himawari-8, Model, Satellite

## 1. Pendahuluan

Awan merupakan salah satu elemen dan regulator penting untuk sistem cuaca. Simulasi awan dan evolusinya dapat membantu memahami terjadinya hujan, terutama di Indonesia. Hujan di Indonesia sangat sulit diprediksi karena dipengaruhi oleh berbagai kondisi topografis dan geografis kompleks, serta faktor-faktor fenomena variabilitas atmosfer seperti muson/*monsoon*, *Madden Julian Oscillation* (MJO), *Indian Ocean Dipole Mode* (IOD) dan *El-Nino Southern Oscillation* (ENSO) (Chang *et al.*,

2004; Hidayat & Kizu, 2010; Qian & Robertson, 2010; Rauniyar & Walsh, 2011; Lee, 2015). Prediksi cuaca operasional telah dilakukan Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) melalui aplikasi peringatan dini berbasis web dengan nama Sadewa (LAPAN. (2019). Dengan meningkatnya akurasi untuk simulasi awan, diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dan akurasi untuk prediksi cuaca operasional wilayah Indonesia pada Sadewa.



Gambar 1. Parameterisasi dan interaksinya dalam model NWP (diadopsi dari Dudhia, (2014).

*Weather and Research Forecasting* (WRF, Skamarock *et al.*, 2008) sebagai salah satu model *Numerical Weather Prediction* (NWP), menggunakan parameterisasi untuk simplifikasi proses fisika yang terjadi dalam setiap grid. Dari beberapa skema fisika di WRF yang terkait dengan simulasi awan adalah skema mikrofisika dan skema kumululus (Gambar 1). Skema mikrofisika menangani proses awan dan hujan non-konvektif termasuk proses evolusi dan interaksinya, sedangkan skema kumululus menangani updraft dan downdraft vertikal dalam proses konveksi, termasuk hujan konvektif (Dudhia, 2014). Kombinasi skema mikrofisika dan kumululus yang tepat diharapkan mampu meningkatkan tingkat realisme simulasi awan di wilayah Indonesia.

Untuk memvalidasi simulasi awan dari model global atau regional, penggunaan data observasi awan dari satelit polar atau geostasioner sangatlah penting (Otkin *et al.*, 2008). Produk observasi awan satelit Himawari-8 (Bessho *et al.*, 2016) digunakan karena resolusi kanal visible yang digunakan dalam penelitian ini beresolusi tinggi, yaitu 1 km, dengan pembagian level ketinggian dan jenis awan sebagai fitur produk. Walaupun secara umum akurasi untuk data satelit terlalu rendah untuk pengukuran absolut properti awan (Zhang *et al.*, 2005), namun dataset observasi awan dari Himawari-8 ini berguna untuk mengevaluasi hasil simulasi awan.

Penelitian ini melakukan simulasi awan dengan kombinasi parameterisasi yaitu skema mikrofisika dan skema kumululus yang dibandingkan dengan observasi awan dari satelit pada siang hari selama bulan Maret 2017. Beberapa penelitian sebelumnya

tentang akurasi simulasi awan (Westphal *et al.*, 1996; Yu *et al.*, 1996; Garand & Nadon, 1998; Klein & Jakob, 1998; Mathieu *et al.*, 1999; Chaboureau *et al.*, 2000; Norris & Weaver, 2001) menunjukkan bahwa properti awan hasil simulasi sangat sensitif terhadap perubahan di skema mikrofisika. Penelitian ini akan mengkaji kemampuan kombinasi skema kumululus dan mikrofisika berbeda untuk mensimulasikan kemunculan awan. Algoritma untuk menghasilkan variabel awan yang dibedakan berdasarkan ketinggian dijelaskan pada Bab 2 termasuk kombinasi skema yang digunakan, sedangkan hasil dan pembahasan pada Bab 3, serta kesimpulan pada Bab 4.

## 2. Metodologi

### 2.1. Lokasi dan Data

Lokasi penelitian pada studi ini adalah wilayah Indonesia (90° - 140° BT, 10° LS - 10° LU) dengan periode penelitian 1-31 Maret 2017, pukul 05.00, 06.00 dan 07.00 UTC (11.00, 12.00 dan 13.00 WIB). Pemilihan waktu siang hari dengan mempertimbangkan bahwa produk pengamatan ini merupakan keluaran dari kanal VIS (*visible*) yang lebih optimal di siang hari dibandingkan pagi atau sore hari (JAXA, 2019).

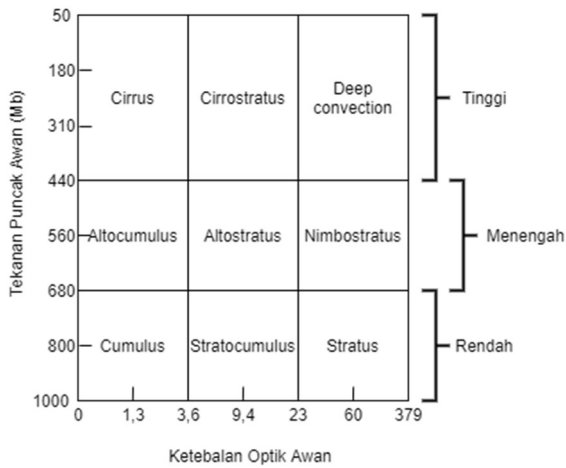
Data yang digunakan adalah data per-jam luaran model WRF Versi 3.7 dengan 32 level vertikal dan resolusi spasial 5 km. Data initial condition model menggunakan *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) FNL (Final) *Operational Global Analysis Data* 0.1° diunduh dari situs *Research Data Archive University Corporation for Atmospheric Research* (RDA UCAR). Sedangkan data observasi awan menggunakan produk tipe awan (*cloud type*) Himawari-8 luaran *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) yang didasarkan pada klasifikasi awan *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) (Rossow & Schiffer, 1991).

### 2.2. Metode Penelitian

Pembagian ketinggian awan pada model WRF menggunakan metode *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) (Fita *et al.*, 2019). Variabel luaran WRF yang digunakan untuk mendapatkan awan tinggi, menengah, dan rendah adalah fraksi awan/*cloud fraction* (CLDFRA) dan tekanan/*pressure* (p, PB). Kriteria penentuan level ketinggian awan tersebut adalah sebagai berikut:

- Awan Tinggi :  $p < 440$  hPa
- Awan Menengah :  $660 > p > 440$  hPa
- Awan Rendah :  $p > 660$  hPa





Gambar 2. Klasifikasi awan ISCCP yang selanjutnya dikelompokkan menjadi awan tinggi, menengah dan rendah. (ISCCP. (2019).

Pembagian ketinggian awan pada observasi satelit Himawari-8 diperoleh dengan mengelompokkan produk tipe awan ISCCP ke awan tinggi (*high*), menengah (*middle*) dan rendah (*low*) (Gambar 2).

Parameterisasi pada model WRF untuk kajian kemunculan awan tinggi, menengah dan rendah pada penelitian ini menggunakan 17 kombinasi dari skema kumulat dan skema mikrofisika sebagai berikut:

- Skema kumulat (cu):
  - Kain-Fritsch (cu1) (Kain, 2004)
  - Betts-Miller-Janjic (cu2) (Janjic, 1994)
  - Grell-Freitas (cu3) (Grell & Freitas, 2014)
  - Old Simplified Arakawa-Schubert (cu4) (Pan & Wu, 1995)
  - Grell-3D (cu5) (Grell, 1993; Grell & Devenyi, 2002)
  - Tiedtke (cu6) (Tiedtke, 1989; Zhang *et al.*, 2011)
  - New Tiedtke (cu16) (Zhang & Wang, 2017)
  - Tanpa kumulat/eksplisit (nocu).
- Skema mikrofisika (mp):
  - WSM3 (mp3) (Hong *et al.*, 2004)
  - WSM6 (mp6) (Hong & Lim, 2006)
  - Thompson (mp8) (Thompson *et al.*, 2008)
  - Morrison 2-moment (mp10) (Morrison *et al.*, 2009)

Selanjutnya, performa kombinasi skema parameterisasi WRF untuk kemunculan awan tinggi, menengah dan rendah dievaluasi dan dibandingkan dengan produk pengamatan awan Himawari-8 menggunakan analisis spasial dan berdasarkan nilai *skill* statistik, yang meliputi: *Probability of Detection* (POD), *Probability of False Detection* (POFD), *False Alarm Ratio* (FAR) dan *Critical Score Index*

(CSI). Formula perhitungan nilai *skill* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{POD} &= H / (H + M) \dots\dots\dots(1) \\
 \text{POFD} &= F / (F + C) \dots\dots\dots(2) \\
 \text{FAR} &= F / (H + F) \dots\dots\dots(3) \\
 \text{CSI} &= H / (H + M + F) \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

Metode simulasi WRF yang dilakukan menggunakan konfigurasi serupa dengan prediksi operasional yang digunakan oleh Sadewa, yang saat ini menerapkan skema kumulat Kain-Fritsch dan skema mikrofisika WSM3. Skema dan konfigurasi model WRF yang digunakan dalam penelitian ini tersaji pada Tabel 2.

Tabel 1. Tabel kontingensi nilai *skill*.

Model	Observasi	
	Awan	Bukan Awan
Awan	Hits (H)	False Alarm (F)
Bukan Awan	Misses (M)	Correct Negative (C)

Tabel 2 Skema dan konfigurasi model WRF yang digunakan dalam penelitian ini.

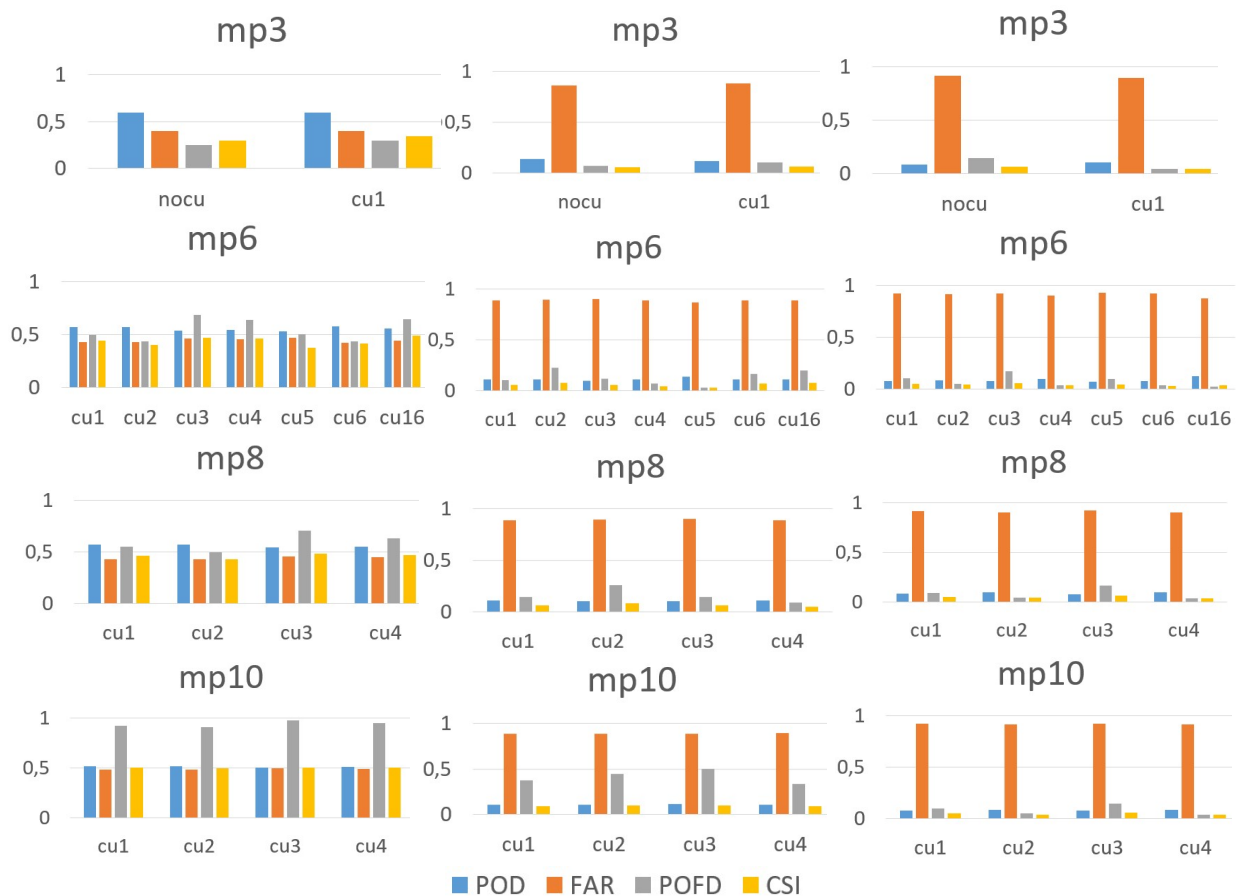
Parameter	Keterangan
Domain	Indonesia (90-140E 10S-10N), 400x1000 grids
Resolusi	5 km <sup>2</sup> , 31 level vertical
Resolusi temporal	1 jam
Input	Global Forecasting System (GFS) 0.25° x 0.25°
Variabel	CLDFRA, P, PB
Skema kumulat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kain-Fritsch (cu1)</li> <li>• Betts-Miller-Janjic (cu2)</li> <li>• Grell-Freitas (cu3)</li> <li>• Old Simplified Arakawa-Schubert (cu4)</li> <li>• Grell-3D (cu5)</li> <li>• Tiedtke (cu6)</li> <li>• New Tiedtke (cu16)</li> <li>• Tanpa kumulat/eksplisit (nocu)</li> </ul>
Skema mikrofisika	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WSM3 (mp3)</li> <li>• WSM6 (mp6)</li> <li>• Thompson (mp8)</li> <li>• Morrison 2-moment (mp10)</li> </ul>
Boundary layer	Yonsei University (YSU)
Skema radiasi	Longwave (LW): RRTM; Shortwave (SW): Dudhia
Surface kayer	MM5 Similarity
Land Surface	Noah Land Surface Model

### 3. Hasil dan Pembahasan

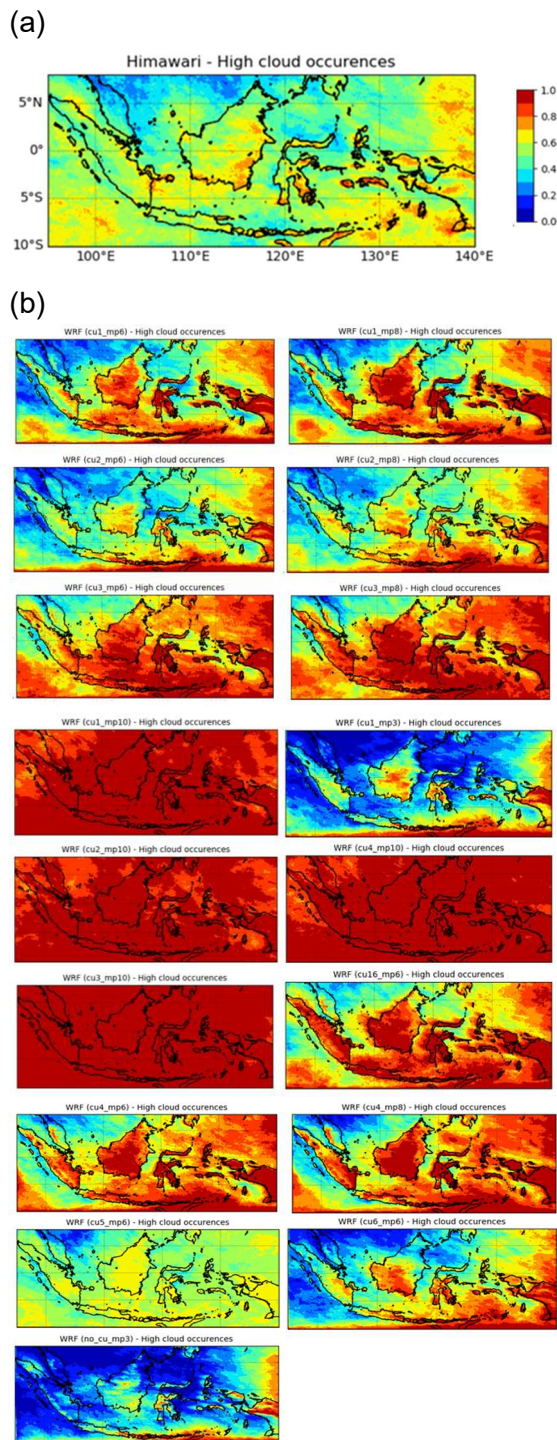
Nilai *skill* perbandingan hasil simulasi kemunculan awan selama bulan Maret 2017 pada pukul 11.00, 12.00 dan 13.00 WIB dengan produk observasi Himawari-8 ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai POD menunjukkan seberapa banyak piksel kemunculan awan yang berhasil diprediksi dengan tepat sesuai dengan kemunculan awan observasi Himawari-8. Hampir serupa dengan POD, CSI menunjukkan seberapa banyak piksel kemunculan awan yang diprediksi secara tepat namun juga memperhatikan nilai *False Alarm*. Rentang nilai POD dan CSI adalah 0-1 dengan nilai terbaik adalah 1. POFD menunjukkan seberapa banyak piksel yang menunjukkan prediksi kemunculan awan namun pada observasi tidak ada. Hampir serupa dengan POFD, FAR menunjukkan nilai yang sama dengan memperhatikan nilai *Hits*. Jarak nilai FAR dan POFD adalah 0-1 dengan nilai terbaik adalah 0.

Perbandingan kemunculan awan WRF dengan observasi Himawari-8 secara spasial ditunjukkan pada Gambar 4 hingga 5. Pada

awan menengah dan rendah (Gambar 3), nilai FAR mendekati 1 (sekitar 0,9) menunjukkan hampir seluruh prediksi kemunculan awan menengah dan rendah tidak ada dalam observasi (*false alarm*). Di sisi lain, nilai POFD yang rendah (antara 0,1 – 0,2) hanya menunjukkan sekitar 10 – 20% prediksi yang salah untuk ketidakmunculan awan menengah dan rendah. Kecuali pada awan menengah, skema mikrofisika mp10 memiliki nilai POFD lebih tinggi yaitu antara 0,3 – 0,5. Sementara nilai POD dan CSI yang mendekati 0 di simulasi awan menengah dan rendah menunjukkan bahwa hampir semua skema tidak mampu memprediksi kemunculan awan menengah dan rendah. Sebaliknya, pada nilai *skill* kemunculan awan tinggi, nilai POD pada semua kombinasi skema sekitar 0,5 – 0,6 mengindikasikan bahwa semua skema mampu memprediksi kemunculan awan tinggi 50% – 60%. Nilai POD paling tinggi ditunjukkan oleh kombinasi skema cu1\_mp3 dan nocu\_mp3, yaitu kombinasi skema kumululus Kain-Fritsch dan eksplisit, dengan skema mikrofisika WSM3. Demikian juga untuk nilai FAR dan POFD



Gambar 3. Nilai *skill* perbandingan kemunculan awan WRF dengan observasi Himawari-8 untuk awan tinggi (kiri), awan menengah (tengah) dan awan rendah (kanan).



Gambar 4. Kemunculan awan tinggi observasi Himawari-8 (a) dan 17 kombinasi simulasi WRF (b) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

kecil ditunjukkan oleh kombinasi skema kumululus dan mikrofisika yang sama, yaitu antara 0,2 – 0,4. Sedangkan nilai CSI, untuk ketiga skema terbaik tersebut memperoleh nilai terkecil diantara kombinasi skema lainnya, yaitu 0,3 dibandingkan 0,4 – 0,5 di kombinasi skema selain mp3 (WSM3).

Hal ini disebabkan karena frekuensi kemunculan awan pada kedua kombinasi skema tersebut relatif pendek dibandingkan yang lain. Mengingat bahwa CSI merupakan nilai yang biasanya tergantung frekuensi kejadian yang diprediksi atau disimulasikan (Schaefer, 1990).

Pembahasan perbandingan spasial observasi dan prediksi kemunculan awan akan dibagi menjadi wilayah lautan, pegunungan dan daratan untuk mengetahui performa masing-masing kombinasi skema.

Hasil observasi kemunculan awan tinggi pada bulan Maret 2017 (Gambar 4) menunjukkan sekitar 40% – 80% kejadian di daratan dan lautan Indonesia, dan sekitar 10% – 30% kejadian di lautan bagian utara Indonesia. Sementara, hasil simulasi dengan nilai *skill* terbaik yaitu skema cu1\_mp3 menunjukkan 10% – 20% kemunculan awan tinggi di hampir seluruh lautan, kecuali di bagian tenggara dengan kemunculan lebih banyak yaitu 60% – 100%. Di atas daratan, kemunculan awan tinggi 100% ditunjukkan di wilayah selatan Indonesia, Papua, Sulawesi dan sekitar Kalimantan Tengah dari hasil observasi Himawari-8. Sedangkan hasil simulasi kemunculan awan tinggi dengan nilai terbaik berikutnya, yaitu skema nocu\_mp3, menunjukkan area 10% – 20% yang lebih besar dan menutupi hampir seluruh Pulau Sumatera. Namun untuk kemunculan 60% – 100% masih serupa dengan skema cu1\_mp3 yaitu di selatan dan timur Indonesia. Dibandingkan dengan observasi, hasil simulasi kemunculan awan tinggi kedua skema dengan nilai *skill* terbaik menunjukkan *underestimate* di sebagian besar perairan Indonesia dan *overestimate* di sebagian besar daratan Indonesia.

Hasil observasi kemunculan awan menengah pada bulan Maret 2017 (Gambar 5) menunjukkan sekitar 10% – 20% kejadian di lautan Indonesia, dan sekitar 30% – 40% di daratan. Pola kemunculan awan menengah dari observasi Himawari-8 menunjukkan bentuk pegunungan di semua pulau di Indonesia, yang berarti sebagian besar awan menengah terjadi di atas pegunungan dari proses orografis. Hasil simulasi kemunculan awan menengah dengan nilai *skill* terbaik yaitu skema nocu\_mp3 menunjukkan pola serupa dengan observasi, dengan frekuensi kemunculan awan menengah sebesar 60% – 100%.

Hasil observasi kemunculan awan rendah pada bulan Maret 2017 (Gambar 6)

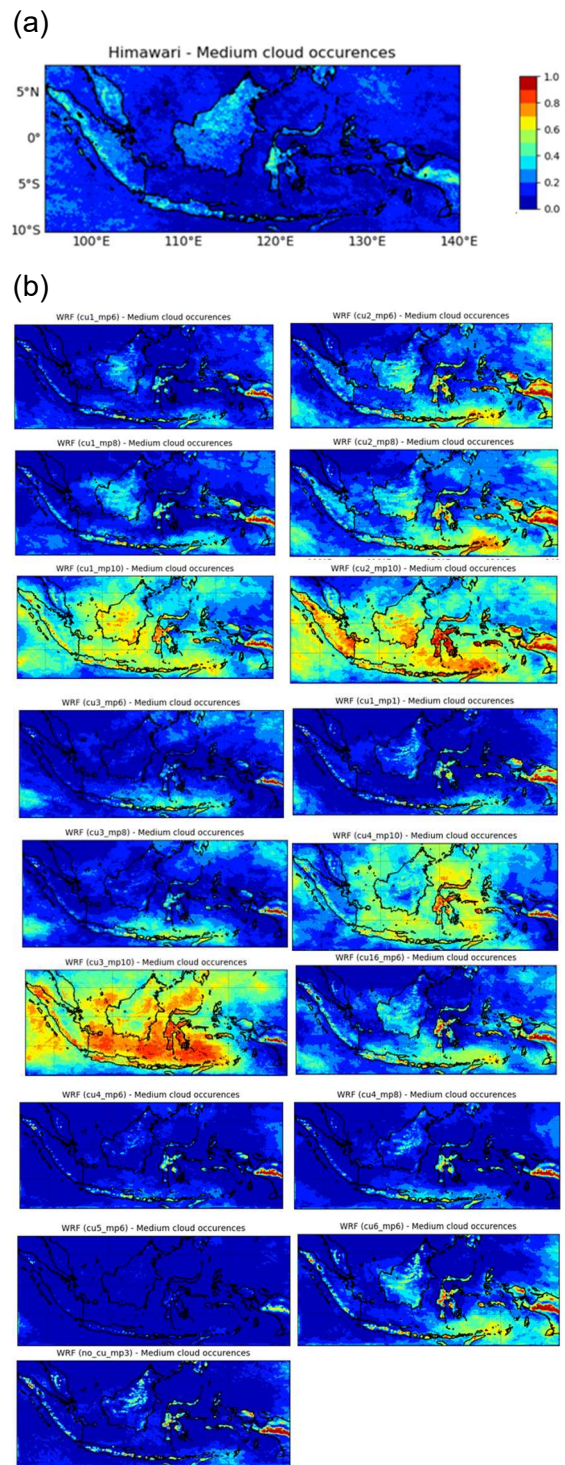
menunjukkan sekitar 10% – 20% kemunculan awan terjadi di lautan Indonesia, dan sekitar 30% – 40% di daratan. Pola kemunculan awan menengah menunjukkan bentuk pegunungan di semua pulau di Indonesia namun tidak mendetail, sedangkan hampir semua skema simulasi pada awan rendah menunjukkan detail pegunungan di Indonesia.

Secara umum hasil perbandingan spasial simulasi awan dan observasi satelit menunjukkan perbandingan terbaik terjadi pada kemunculan awan tinggi dibandingkan awan menengah dan rendah. Pada perbandingan kemunculan awan tinggi, untuk skema terbaik menurut perhitungan nilai *skill* yaitu skema *cu1\_mp3* (Kain-Fritsch dan WSM3) dan *nocu\_mp3* (eksplisit dan WSM3), secara spasial terlihat lebih didominasi oleh kemunculan awan dengan persentase kejadian 0% – 20% (biru-ungu) dibandingkan kemunculan awan dengan persentase kejadian 60% (kuning-merah). Ini menunjukkan bahwa nilai *skill* yang tinggi pada kedua kombinasi skema tersebut kemungkinan didapatkan dari banyaknya nilai 0 (tidak memprediksi) dibandingkan kesalahan memprediksi.

Secara spasial, kemunculan awan tinggi pada skema *cu5\_mp6* (Grell-3D dan WSM6) paling mendekati observasi, dengan rata-rata frekuensi kemunculan awan sebesar 60%. Namun demikian, skema ini tidak menghasilkan pola yang serupa dengan observasi pada awan menengah dan rendah. Kemunculan awan menengah dan awan rendah hasil simulasi pada sebagian besar skema menunjukkan pola kemunculan awan di sepanjang pegunungan di Indonesia. Sementara pada hasil observasi, awan di pegunungan hanya ditemui pada awan menengah. Awan rendah pada hasil observasi tidak menunjukkan pola pegunungan, kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan satelit yang hanya dapat mendeteksi permukaan bumi dan awan secara 2-dimensi saja. Skema yang mendekati kemunculan awan menengah observasi adalah *cu2\_mp6* (Betts-Miller-Janjic dan WSM6) dan *cu2\_mp8* (Betts-Miller-Janjic dan Thomson) dengan rata-rata frekuensi kemunculan sebesar 60% di daratan yang masih overestimate.

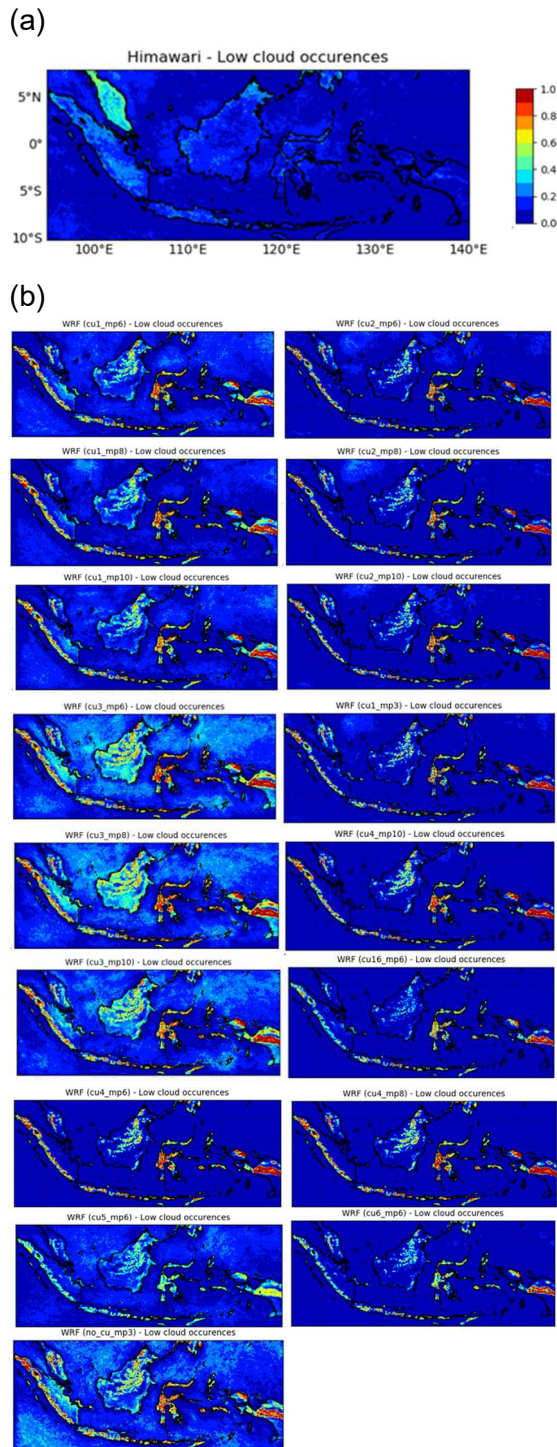
#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan nilai *skill* dan analisa spasial dapat disimpulkan bahwa kemunculan awan tinggi hasil simulasi lebih dapat



Gambar 5. Kemunculan awan menengah observasi Himawari-8 (atas) dan 17 kombinasi simulasi WRF (bawah) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

dibandingkan dengan observasi Himawari-8 daripada kemunculan awan menengah dan awan rendah. Dengan nilai FAR dan POFD paling rendah, dan nilai POD tertinggi diantara kombinasi skema kumululus dan mikrofisika, pasangan skema kumululus Kain-Fritsch dan



Gambar 6. Kemunculan awan rendah observasi Himawari-8 (a) dan 17 kombinasi simulasi WRF (b) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

eksplisit dengan skema mikrofisika WSM3 merupakan opsi terbaik dari 17 kombinasi yang dilakukan pada penelitian ini. Analisa spasial juga menunjukkan skema kumululus Grell-3D dan skema mikrofisika WSM6 pada kemunculan awan tinggi memiliki pola yang hampir sama dengan observasi dibandingkan

skema lainnya termasuk kedua skema dengan nilai skill tertinggi. Sementara pada awan menengah, skema kumululus Betts-Miller-Janjic dan skema mikrofisika WSM6 dan Thomson lebih mendekati pola yang sama dengan observasi dibanding kombinasi skema lainnya.

Hasil simulasi cenderung menghasilkan kemunculan awan yang overestimate di semua ketinggian (tinggi, menengah dan rendah), namun perbedaan pola spasial yang jauh dan nilai FAR yang tinggi pada ketinggian menengah dan rendah mengindikasikan bahwa performa WRF masih sulit dievaluasi untuk kemunculan awan menengah dan rendah yang dibandingkan dengan observasi Himawari-8 di tingkat ketinggian yang sama. Hal ini perlu diteliti lebih lanjut dengan periode data pengamatan dan simulasi yang lebih lama sehingga dapat merepresentasikan perbedaan akurasi di musim basah dan musim kering, termasuk juga pola diurnal awan yang perlu dikaji kesamaan karakteristiknya dengan pola diurnal hujan model WRF di Indonesia yang pernah diteliti sebelumnya (Suaydhi, 2016).

Selain itu hasil simulasi ini menunjukkan bahwa konfigurasi prediksi operasional Sadewa saat ini merupakan opsi terbaik dari beberapa opsi yang dikaji di penelitian ini. Namun mengingat bahwa penelitian ini masih berfokus ke parameter awan saja dengan resolusi waktu yang masih singkat, masih diperlukan evaluasi lanjutan dengan parameter-parameter berbeda dengan resolusi waktu yang lebih panjang.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis pertama sebagai kontributor utama tulisan ini mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu penulisan KTI ini, yaitu Dr. Teguh Harjana dan Dr. Didi Satiadi atas saran dan masukannya sebagai pembimbing, instansi JAXA dan NASA sebagai penyedia data observasi, serta Mitra Bestari.

Makalah ini telah melewati proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Noersomadi selaku *section editor*.

## Rujukan

Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M.

- Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, R. Yoshida. (2016). An Introduction to Himawari-8/9 — Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(2), 151-183.
- Chaboureaud, J.P., J. -P. Cammas, P. Mascart, J. -P. Pinty. (2000). Evaluation of a cloud system lifecycle simulated by Meso-NH during FASTEX using METEOSAT radiances and TOVS-3I cloud retrievals. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 126, 1735–1750.
- Chang, C.-P., Z. Wang, J. Ju, T., Li. (2004). On the Relationship between Western Maritime Continent Monsoon Rainfall and ENSO during Northern Winter. *Journal of Climate*, 17, 665–672.
- Dudhia, J. (2014). A History of Mesoscale Model Development. Asia-Pac. *Journal of Atmospheric Science*, 50(1), 121-131.
- Fita, L., J. Polcher, T. M. Giannaros, T. Lorenz, J. Milovac, G. Sofiadis, E. Katragkou, S. Bastin. (2019). CORDEX-WRF v1.3). development of a module for the Weather Research and Forecasting (WRF) model to support the CORDEX community. *Geoscience Model Development*, 12, 1029–1066.
- Garand, L., S. Nadon. (1998). High-Resolution Satellite Analysis and Model Evaluation of Clouds and Radiation over the Mackenzie Basin Using AVHRR Data. *American Meteorological Society*, 11, 1976-1996.
- Grell, George A. (1993). Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764–787.
- Grell, G. A, D. Devenyi. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letter*, 29, 1693.
- Grell, G. A. Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233-5250.
- Hidayat, R., S., Kizu. (2010). Influence of the Madden-Julian Oscillation on Indonesian Rainfall Variability in Austral Summer. *International Journal of Climatology*, 30, 1816–1825.
- Hong, S. -Y, J. Dudhia, S. -H. Chen. (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.
- Hong, S. -Y., J. -O. J. Lim. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.
- ISCCP. (2019, November 11). International Satellite Cloud Climatology Project. <https://isccp.giss.nasa.gov/cloudtypes.html>.
- Janjic, Zavisla I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 927–945.
- JAXA (2019, November 11). JAXA Himawari Monitor. <https://www.eorc.jaxa.jp/tree/userguide.html>.
- Kain, John S. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170–181.
- Klein, S.A., C. Jakob. (1998). Validation and Sensitivities of Frontal Clouds Simulated by the ECMWF Model. *Monthly Weather Review*, 127, 2514-2531.
- Lee, H. S. (2015). General Rainfall Patterns in Indonesia and the Potential Impacts of Local Seas on Rainfall Intensity. *Water*, 7, 1751–1768.
- Mathieu, A., G. Seze, C. Guerin, H. Dupuis, A. Weill. (1999). Mesoscale boundary layer cloud structures as observed during the SEMAPHORE campaign. *Physics and Chemistry of Earth*, 8B, 933–938.
- Morrison, H., G. Thompson, V. Tatarskii. (2009). Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Monthly Weather Review*, 137, 991–1007.
- Norris, J. R., C. P. Weaver. (2001). Improved Techniques for Evaluating GCM Cloudiness Applied to the NCAR CCM3. *Journal of Climate*, 14, 2540-2550.
- Otkin, J. A., T. J. Greenwald. (2008). Comparison of WRF Model-Simulated and MODIS-Derived Cloud Data. *American Meteorological Society*, 136, 1957-1970.

- Pan, H. L., W. S. Wu. (1995). Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium range forecast model. NMC office note, 409.40, 20–233.
- Qian, J.-H., A. W., Robertson. (2010). Interactions Among ENSO, the Monsoon, and Diurnal Cycle in Rainfall Variability Over Java, Indonesia. *Journal of Atmospheric Science*, 67, 3509–3524.
- Rauniyar, S. P., K. J. E. Walsh. (2011). Scale Interaction of the Diurnal Cycle of Rainfall over the Maritime Continent and Australia : Influence of the MJO. *Journal of Climate*, 24, 325–348.
- Rossow, W. B., R. A. Schiffer. (1991). ISCCP Cloud Data Products. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72:1-20.
- LAPAN (2019, November 11). Satellite-based Disaster Early Warning System. <https://sadewa.sains.lapan.go.id>.
- Schaefer, J. T. (1990). The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *American Meteorological Society*, 5, 570-575.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, W. Wang, J. G. Powers. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note TN-475+STR, 125 pp.
- Suaydhi. (2016). Kemampuan Model WRF Dalam Memprediksi Curah Hujan Diurnal di Pulau Jawa. *Jurnal Sains Dirgantara*, 14(1), 57-70.
- Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 117, 1779–1800.
- Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, W. D. Hall. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136, 5095–5115.
- Westphal, D. L., S. Kinne, P. Pilewskie, J. M. Alvarez, P. Minnis, D. F. Young, S. G. Benjamin, W. L. Eberhard, R. A. Kropfli, S. Y. Matrosov, J. B. Snider, T. A. Uttal, A. J. Heymsfield, G. G. Mace, S. H. Melfi, D. O. C. Starr, J. J. Soden. (1996). Initialization and validation of a simulation of cirrus using FIRE-II data. *Journal of Atmospheric Science*, 53, 3397–3429.
- Yu, W., M. Doutriaux, G. Seze, H. L. Treut, M. Desbois. (1996). A methodology study of the validation of clouds in GCMs using ISCCP satellite
- Zhang, M. H., W. Y. Lin, S. A. Klein, J. T. Bacmeister, S. Bony, R. T. Cederwall, A. D. Del Genio, J. J. Hack, N. G. Loeb, U. Lohmann, P. Minnis, I. Musat, R. Pincus, P. Stier, M. J. Suarez, M. J. Webb, J. B. Wu, S. C. Xie, M. S. Yao, J. H. Zhang. (2005). Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 110, D15S02 (1-18).
- Zhang, C., Y. Wang, K. Hamilton. (2011). Improved representation of boundary layer clouds over the southeast pacific in ARW–WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. *Monthly Weather Review*, 139, 3489–3513.
- Zhang, C., Y. Wang. (2017). Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model. *Journal of Climate*, 30, 5923-5941.





# Perubahan Karakteristik Curah Hujan Jangka Panjang di Provinsi Jawa Barat Tahun 1921-2010 (Long-Term Changes in Rainfall Characteristics in West Java Province)

Muhammad Fikri Sigid<sup>1</sup>, Muhammad Rais Abdillah<sup>2</sup>, Zadrach Leudofij Dupe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Meteorologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Bandung

<sup>2</sup>Kelompok Keahlian Sains Atmosfer, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 03-03-2021  
Direvisi: 18-06-2021  
Disetujui: 14-07-2021

## Korespondensi:

M. F. Sigid  
Sigid.fikri29@gmail.com

## ABSTRAK

Fenomena perubahan iklim berdampak besar pada sistem iklim di Bumi yang salah satunya ditunjukkan pada perubahan karakteristik curah hujan. Berbeda dengan respons temperatur yang cenderung homogen, respons curah hujan terhadap perubahan iklim lebih kompleks karena presipitasi sangat dipengaruhi oleh karakter sirkulasi dan topografi regional. Di sisi lain, variabilitas iklim jangka panjang seperti *Interdecadal Pacific Oscillation* (IPO) juga dapat menyebabkan perubahan karakteristik curah hujan global. Namun, dampak perubahan iklim dan IPO terhadap hujan di Indonesia, khususnya Jawa Barat, belum terdokumentasi dengan baik. Penelitian ini menganalisis perubahan karakteristik curah hujan jangka panjang di Provinsi Jawa Barat pada periode 1921-2010 dengan mempertimbangkan faktor perubahan iklim dan variabilitas *interdecadal*. Berdasarkan tren linier, curah hujan di Provinsi Jawa Barat meningkat sebesar 1,61 mm/dekade. Semua periode baik DJF, MAM, JJA, maupun SON, menunjukkan peningkatan curah hujan, namun peningkatan yang signifikan secara statistik hanya terjadi pada musim pra-monsoon (SON) yaitu sebesar 3,70 mm/dekade. Penyebab lemahnya tren tersebut adalah curah hujan di Jawa Barat bervariasi kuat secara *interdecadal* (standar deviasi 10,38 mm). Variabilitas ini berkorelasi positif secara signifikan dengan indeks IPO; menunjukkan bahwa telekoneksi akibat variabilitas internal dari Samudra Pasifik berpengaruh besar terhadap tren hujan di Jawa Barat. Anomali suhu muka laut dan pola sirkulasi angin permukaan terlihat menyebabkan perubahan hujan tersebut sebagai akibat dari sinyal-sinyal IPO yang bervariasi secara spasial. Dalam studi perubahan iklim terhadap curah hujan di Indonesia, diperlukan perhatian khusus pada variabilitas-variabilitas *interdecadal* agar tren dan proyeksi iklim yang muncul dapat dijelaskan dengan baik.

**Kata kunci:** Perubahan iklim, variabilitas antardekade, IPO, curah hujan

## ABSTRACT

The climate change phenomenon has a major impact on the Earth's climate system including the changes in rainfall characteristics. In contrast to the temperature response which tends to be homogeneous, the response of rainfall to climate change is more complex because it is strongly influenced by circulation characteristics and regional topography. On the other hand, long-term climate variability such as the *Interdecadal Pacific Oscillation* (IPO) can also lead to changes in global rainfall characteristics. However, the impacts of climate change and IPO on rain in Indonesia, particularly West Java, have not been documented well. This study analyzed the changes in long-term rainfall characteristics in West Java Province for the period of 1921-2010 by considering the factors of climate change and interdecadal variability. Based on the linear trend, the rainfall in West Java Province increases by 1.61 mm/decade. In general, rainfall has increased in all periods (DJF, MAM, JJA, and SON), but a statistically significant increase only occurred in the pre-monsoon season (SON) which was

3.70 mm/decade. The cause of this weak trend is that the rainfall in West Java varies strongly in interdecadal terms (standard deviation of 10.38 mm). This variability had a significant positive correlation with the IPO index; it showed that the teleconnection due to internal variability of the Pacific Ocean had a major effect on the rain trend in West Java. Sea surface temperature anomalies and surface wind circulation patterns were seen to cause these rainfall changes as a result of spatially varying IPO signals. In the study of climate change on rainfall in Indonesia, further consideration of the interdecadal variabilities is needed so that the emerging climate trends and projections can be well explained.

**Keywords:** Climate change, interdecadal variability, IPO, rainfall

## 1. Pendahuluan

Perubahan iklim adalah perubahan pada kondisi iklim di atmosfer yang signifikan secara statistik dan dapat diidentifikasi menggunakan uji statistik dengan adanya perubahan rata-rata dan/atau variabilitas parameter iklim (IPCC, 2014). Perubahan dari variabel iklim tersebut bertahan selama beberapa dekade atau lebih lama (WMO, 2018). Perubahan iklim yang terjadi saat ini merupakan keadaan ketika temperatur Bumi meningkat. Akibatnya, Bumi akan mengalami perubahan dalam berbagai aspek, khususnya pada komposisi di atmosfer yang kemudian dapat berdampak pada kehidupan di Bumi (IPCC, 2014; Bappenas, 2011).

Analisis yang dilakukan oleh Hansen *et al.* (2010) serta *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) menunjukkan rata-rata suhu global di Bumi telah meningkat sekitar 0,8 °C sejak tahun 1880 hingga tahun 2010. Sebagian besar peningkatan suhu global sejak pertengahan abad ke-20 disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca dari aktivitas manusia, seperti deforestasi serta pembakaran bahan bakar fosil (Leggett, 2000; Houghton, 1997; UNFCCC, 2011). Gas rumah kaca yang makin banyak di atmosfer mengakibatkan makin banyaknya panas dari radiasi matahari yang terperangkap di Bumi akibat efek rumah kaca (UNFCCC, 2011). Konsentrasi gas rumah kaca yang terus meningkat sejak puluhan tahun lalu menjadi ancaman di abad 21 dan makin berpotensi merubah sistem iklim global yang salah satunya dapat berdampak pada perubahan pola curah hujan (Gettelman & Rood, 2016).

Dalam rentang klimatologi, perubahan karakteristik curah hujan tidak hanya disebabkan oleh perubahan iklim, tetapi dapat juga dipengaruhi oleh fluktuasi dari variabilitas *interdecadal*, seperti *Interdecadal Pacific Oscillation* (IPO) dan *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) (Dong & Dai, 2015). IPO

adalah osilasi jangka panjang di Samudra Pasifik yang memengaruhi variabilitas iklim pada skala *multi-decadal* dengan fase bertahan sekitar 20 hingga 30 tahun (Dong & Dai, 2015). Menurut Deser *et al.* (2004) serta Dong & Dai (2015), IPO merupakan variabilitas *interdecadal* dengan mekanisme yang sama dengan PDO, hanya saja PDO didefinisikan di wilayah Pasifik Utara, sementara IPO didefinisikan di seluruh wilayah Pasifik.

Siklus IPO ditandai oleh adanya anomali suhu permukaan laut di wilayah Samudra Pasifik dalam skala waktu beberapa dekade. Sejak tahun 1920, terdapat masing-masing dua fase IPO positif (1924–1944 dan 1977–1998) dan dua fase IPO negatif (1945–1976 dan 1999–sekarang) (Dai, 2012; Henley *et al.*, 2015). Fase positif IPO ditandai oleh anomali suhu permukaan laut di Pasifik Tropis yang lebih hangat dengan anomali angin baratan yang menguat dan anomali suhu permukaan laut di Pasifik Utara yang lebih dingin. Sebaliknya fase negatif ditandai oleh anomali suhu permukaan laut di Pasifik Tropis yang lebih dingin dengan angin timuran yang menguat dan anomali suhu permukaan laut di Pasifik Utara yang lebih hangat. Fase negatif dari IPO juga ditandai dengan anomali tekanan negatif dan peningkatan konvergensi angin di wilayah Indonesia dan Pasifik Barat (Dong & Dai, 2015).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ditemukan adanya tren perubahan curah hujan di wilayah Indonesia. Analisis curah hujan tahunan pada periode 1931–1960 dan 1961–1990 yang dilakukan oleh Boer & Faqih (2004) menunjukkan adanya tren penurunan curah hujan untuk beberapa daerah seperti Jawa, Lampung, Sumatra Selatan, Sulawesi Selatan, dan Nusa Tenggara. Selain itu, sebuah studi mengenai osilasi variabilitas *interdecadal* di Pasifik yang diteliti oleh Faqih *et al.* (2008) menunjukkan bahwa IPO memiliki keterkaitan dengan

variabilitas curah hujan di wilayah Indonesia-Australia yang ditunjukkan dengan adanya hubungan yang signifikan antara anomali suhu permukaan laut *interdecadal* dan variabilitas curah hujan.

Jawa Barat merupakan salah satu wilayah dengan produsen padi terbesar di Indonesia. Penurunan jumlah curah hujan atau meningkatnya kejadian bencana banjir dapat mengakibatkan pengurangan produktivitas padi yang dihasilkan (Anwar *et al.*, 2015; Ruminta, 2016). Selain itu, penurunan curah hujan juga dapat mengurangi ketersediaan air, bahkan dapat mengakibatkan kekeringan di Jawa Barat (Bappenas, 2010). Sementara air merupakan komponen yang sangat penting untuk kehidupan manusia. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui bagaimana pengaruh dari fenomena perubahan iklim serta variabilitas *interdecadal* terhadap perubahan karakteristik curah hujan di Provinsi Jawa Barat. Dengan demikian, pemerintah serta masyarakat di Provinsi Jawa Barat dapat lebih siap menghadapi perubahan tersebut di masa yang akan datang, mengingat penelitian yang telah dilakukan tidak terfokus pada wilayah yang lebih kecil, seperti Jawa Barat. Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik perubahan curah hujan di Provinsi Jawa Barat selama periode 1921-2010 dan kaitannya dengan perubahan iklim dan variabilitas *interdecadal*.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan data meteorologi berupa curah hujan dari *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC) dan data reanalisis ERA-20C berupa suhu permukaan laut dan angin zonal serta meridional di level tekanan 925 hPa dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Selain itu, digunakan indeks IPO dari *Hadley Centre Global Sea Ice and Sea Surface Temperature* (HadISST) berdasarkan penelitian Henley *et al.* (2015), yaitu data *IPO Tripole Index* (TPI) yang didasarkan pada anomali suhu permukaan laut di wilayah Pasifik Tropis, Pasifik Barat Laut, dan Pasifik Barat Daya.

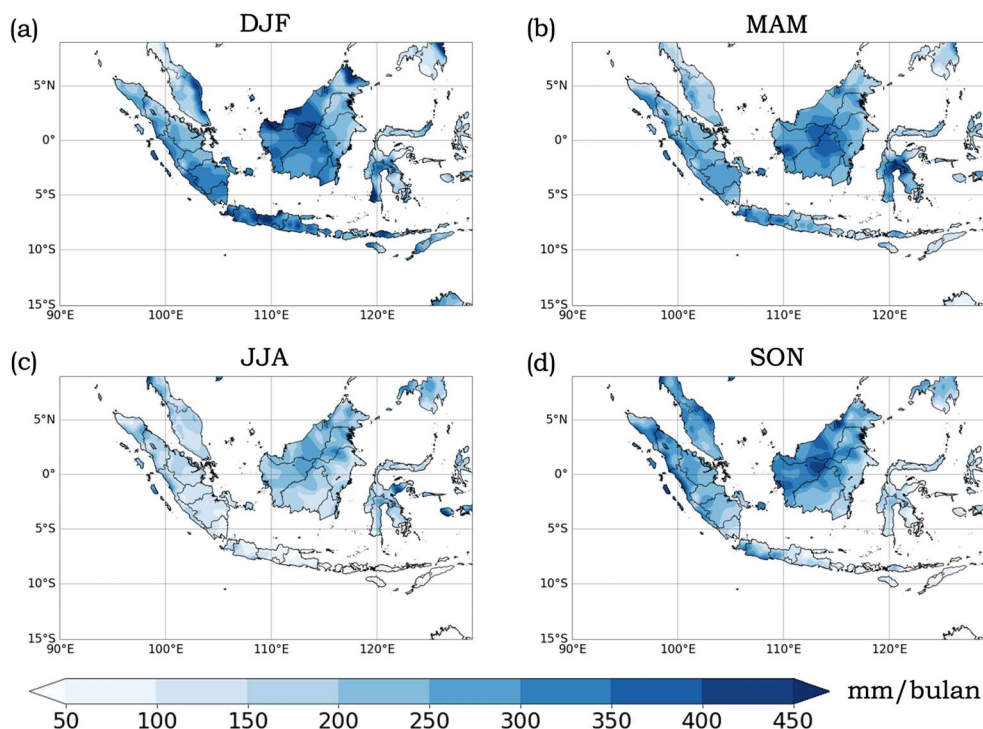
Pembahasan dari penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu analisis perubahan iklim dan analisis variabilitas *interdecadal*. Analisis perubahan iklim diterapkan dengan membagi terlebih dahulu data rentang tahun 1921 hingga tahun 2010 ke dalam tujuh periode. Setiap

periode terdiri dari 30 tahun, sesuai dengan definisi iklim menurut WMO (2015), dengan interval 10 tahun untuk mengetahui nilai tren per dekade dari parameter meteorologi akibat perubahan iklim. Berikut adalah pembagian data untuk analisis perubahan iklim:

- Periode 1: data tahun 1921-1950,
- Periode 2: data tahun 1931-1960,
- Periode 3: data tahun 1941-1970,
- Periode 4: data tahun 1951-1980,
- Periode 5: data tahun 1961-1990,
- Periode 6: data tahun 1971-2000,
- Periode 7: data tahun 1981-2010.

Dalam menganalisis perubahan iklim, prosedur yang dilakukan adalah menghitung nilai rata-rata dari variabel meteorologi di setiap periode. Nilai rata-rata di setiap periode tersebut kemudian dikalkulasikan untuk menghitung nilai tren dari parameter meteorologi. Prosedur yang sama diterapkan untuk musim Desember-Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA), dan September-Oktober-November (SON). Perhitungan tren juga dihasilkan secara spasial, dengan klimatologi curah hujan dan angin dari tahun 1921-2010 digunakan sebagai acuan untuk analisis tren spasial ini (Gambar 1). Selain itu, dilakukan uji signifikansi dari tren yang diperoleh untuk mengetahui apakah nilai tren tersebut signifikan secara statistik atau tidak. Nilai signifikansi dicari melalui perhitungan *p-value* menggunakan student *t-test* dengan tingkat kepercayaan 95%. Nilai tren dikatakan signifikan secara statistik jika *p-value* lebih kecil dari tingkat signifikansi 5%, sementara tren dikatakan tidak signifikan secara statistik jika *p-value* tidak lebih kecil dari tingkat signifikansi 5%.

Analisis variabilitas *interdecadal* dilakukan untuk mengetahui mekanisme dari IPO yang dapat memengaruhi curah hujan di Provinsi Jawa Barat. Pada bagian ini, data dilakukan running mean terlebih dahulu selama 10 tahun menggunakan Moving Average berdasarkan Chang *et al.* (2016) agar osilasi *interdecadal*, yaitu IPO dapat lebih terepresentasikan. Selanjutnya, dilakukan perhitungan korelasi antara curah hujan dengan indeks IPO untuk melihat pola dari variabilitas *interdecadal* curah hujan pada periode IPO di Jawa Barat. Sama seperti perhitungan tren pada analisis perubahan iklim, perhitungan signifikansi juga diterapkan terhadap nilai korelasi antara curah hujan



Gambar 1. Klimatologi jangka panjang curah hujan (mm/bulan) dan angin di 925 hPa (vektor) di wilayah Indonesia periode tahun 1921-2010 pada musim (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, dan (d) SON.

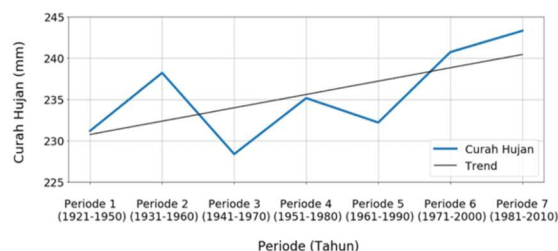
dengan indeks IPO. Di samping itu, analisis juga dilakukan melalui komposit anomali curah hujan pada fase positif dan fase negatif dari IPO. Menurut Hoerling *et al.* (1997), metode komposit dapat didefinisikan sebagai penjumlahan dari anomali fase positif dan negatif dari suatu fenomena untuk mengidentifikasi karakter non-linear melalui asimetri antara dua fase tersebut.

Analisis variabilitas *interdecadal* dilanjutkan dengan menghasilkan peta regresi dari anomali suhu permukaan laut, curah hujan, vektor angin, dan *velocity potential* terhadap indeks IPO untuk menjelaskan struktur anomali dari parameter meteorologi, khususnya curah hujan di Provinsi Jawa Barat terkait dengan variabilitas IPO. Analisis regresi merupakan metode untuk melihat respons *dependent variable* berdasarkan fluktuasi *independent variable*. Dalam kasus ini, digunakan regresi linier berdasarkan satu prediktor dengan asumsi hubungan yang linier. Pendekatan yang digunakan adalah anomali parameter meteorologi diregresikan terhadap indeks IPO yang sudah dibakukan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Analisis Perubahan Iklim

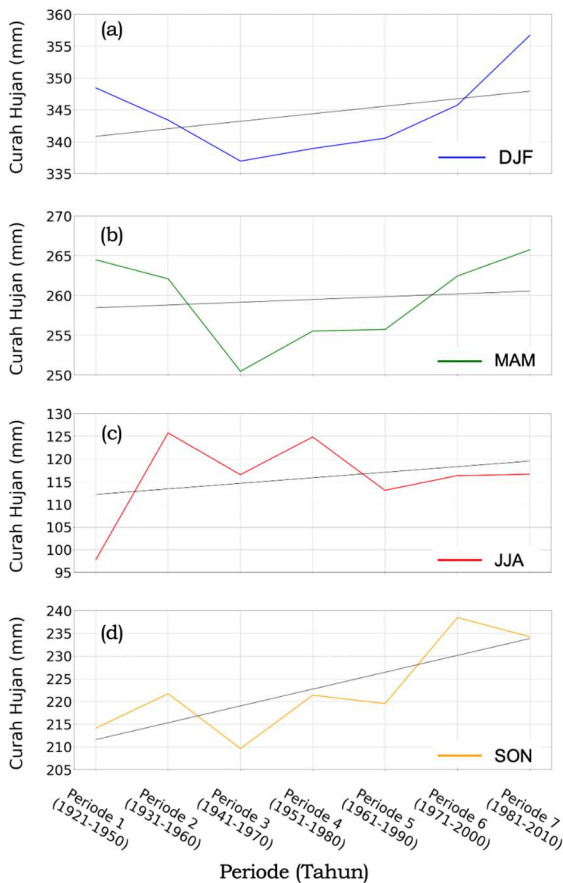
Analisis perubahan iklim dapat ditunjukkan melalui nilai tren dari parameter



Gambar 2. Rata-rata curah hujan bulanan selama 7 periode iklim di Provinsi Jawa Barat (garis biru) tren liniernya (garis hitam).

meteorologi, salah satunya adalah curah hujan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Curah hujan bulanan di Provinsi Jawa Barat memiliki tren positif sebesar 1,61 mm/dekade. Secara statistik, nilai tren tersebut menunjukkan peningkatan yang tidak signifikan berdasarkan uji signifikansi. Berdasarkan grafik di atas, curah hujan di Jawa Barat sebenarnya cenderung berfluktuasi. Terdapat penurunan yang cukup tinggi dari periode 2 (1931-1960) menuju periode 3 (1941-1970). Hal ini dapat disebabkan oleh adanya pengaruh dari variabilitas *interdecadal* terhadap curah hujan di Jawa Barat.



Gambar 3. Rata-rata curah hujan bulanan pada musim (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, dan (d) SON di Provinsi Jawa Barat.

Tabel 1. Tren curah hujan bulanan di Provinsi Jawa Barat.

Musim	Tren (mm/dekade)
DJF	1,18
MAM	0,35
JJA	1,22
SON	3,70*

\*signifikan secara statistik

Berdasarkan grafik pada Gambar 3, terlihat bahwa curah hujan rata-rata pada musim DJF dan MAM cenderung menurun pada periode 1 (1921-1950) sampai periode 3 (1941-1970) yang kemudian meningkat hingga periode 7 (1981-2010). Sementara pada musim JJA dan SON, curah hujan cenderung berfluktuasi. Nilai tren curah hujan bulanan di Provinsi Jawa Barat pada Tabel 1 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan curah hujan di setiap musim. Peningkatan curah hujan pada musim SON secara statistik signifikan, berdasarkan uji signifikansi, yaitu sebesar 3,70 mm/dekade. Di sisi lain,

peningkatan curah hujan pada musim DJF, MAM, dan JJA tidak signifikan secara statistik.

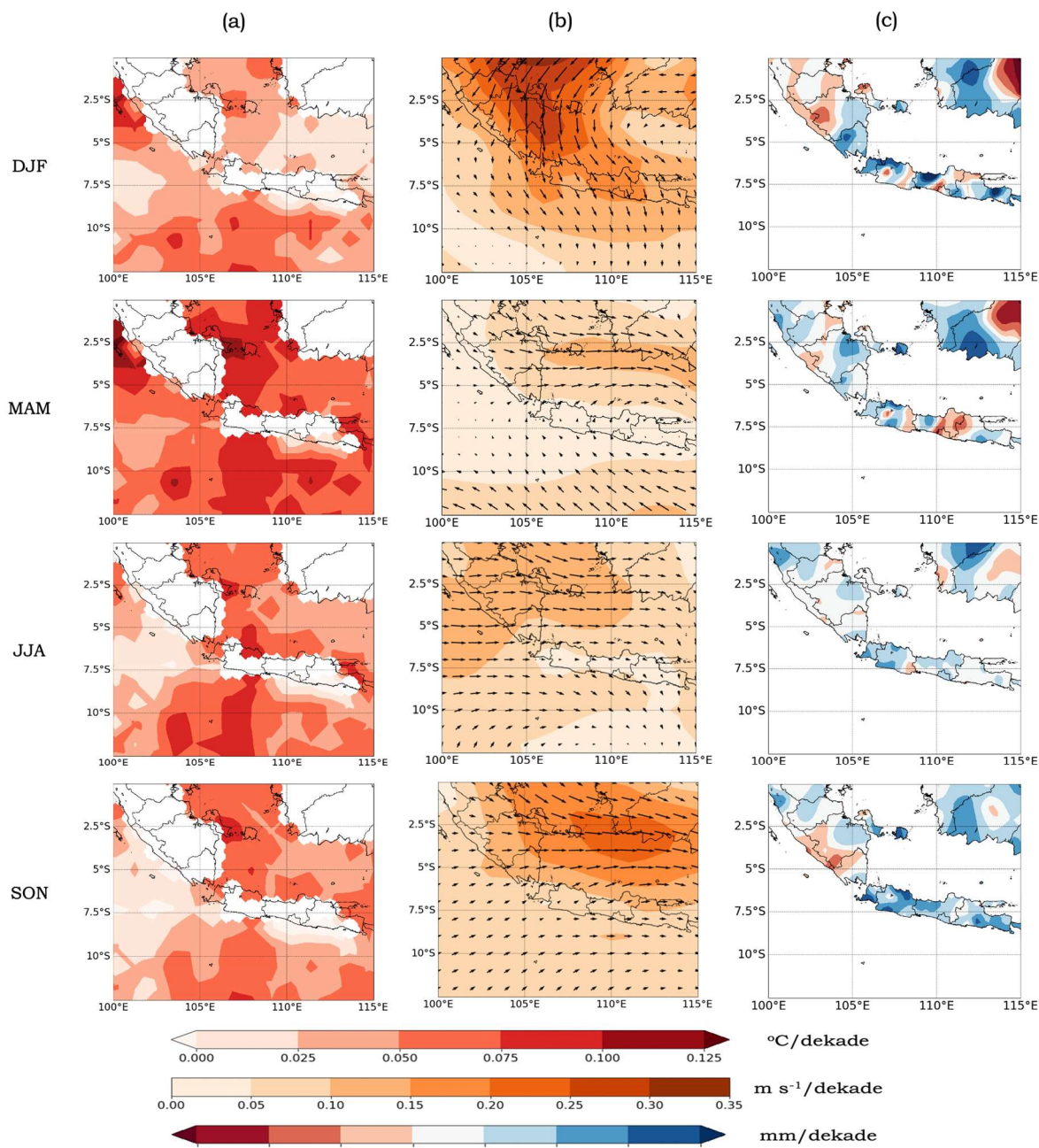
Untuk mengetahui bagaimana tren curah hujan di Provinsi Jawa Barat dapat meningkat, maka dilakukan analisis tren spasial dari suhu permukaan laut, arah angin, dan curah hujan seperti terlihat pada Gambar 4. Secara keseluruhan tren suhu permukaan laut di wilayah Indonesia meningkat setiap musimnya. Suhu permukaan laut yang meningkat ini dapat mengindikasikan semakin banyak uap air yang dihasilkan untuk terjadinya hujan.

Curah hujan yang meningkat pada DJF dapat disebabkan oleh menguatnya angin monsun yang berasal dari arah utara Pulau Jawa ke wilayah Jawa Barat. Angin yang datang dari arah utara ini memungkinkan makin banyaknya uap air yang terbawa dari monsun sehingga terjadi peningkatan curah hujan di bagian utara Jawa Barat yang berhadapan langsung dengan angin monsun (Gambar 4, baris pertama). Secara rata-rata tren hujan di Jawa Barat saat DJF memang tidak signifikan (Gambar 3a) karena terdapat pola tren positif dan negatif yang bercampur di Jawa Barat. Pada SON, anomali angin dari arah utara wilayah Indonesia juga muncul tetapi peningkatan curah hujan di Jawa Barat pada musim tampaknya lebih berkaitan dengan anomali angin yang berasal dari Samudra Hindia dan efek lokal.

Pada MAM dan JJA, tren curah hujan di Jawa Barat tidak sebesar musim lainnya karena vektor angin menuju Jawa Barat tidak begitu menguat sehingga tidak banyak uap air yang terbawa menuju wilayah ini meskipun kenaikan suhu permukaan laut di sekitar Pulau Jawa pada musim MAM lebih tinggi dibandingkan musim DJF. Sementara pada musim JJA, kenaikan suhu permukaan laut juga lebih berperan dalam meningkatnya curah hujan di Jawa Barat. Hal ini memungkinkan makin banyaknya uap air yang terbawa melalui monsun dari Australia ke Jawa Barat pada musim JJA walaupun terdapat anomali angin dari Samudra Hindia menuju wilayah Indonesia.

### 3.2. Hubungan Antara Curah Hujan dengan IPO

Dalam rentang klimatologi, perubahan variabel iklim termasuk curah hujan tidak hanya disebabkan oleh perubahan iklim, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh variabilitas *interdecadal*, salah satunya adalah IPO. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan,

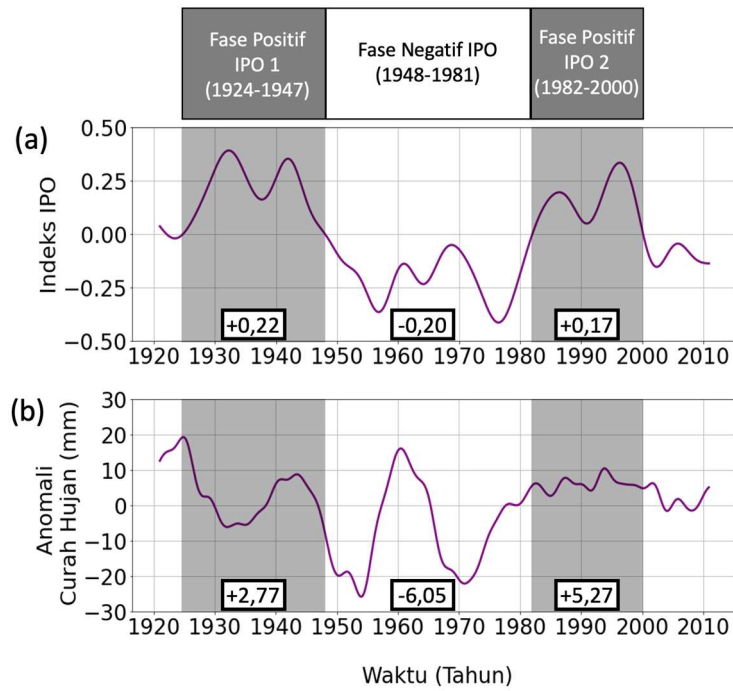


Gambar 4. Tren spasial variabel (a) suhu permukaan laut ( $^{\circ}\text{C}/\text{dekade}$ ), (b) angin ( $\text{m/s}/\text{dekade}$ ), dan (c) curah hujan bulanan ( $\text{mm}/\text{dekade}$ ).

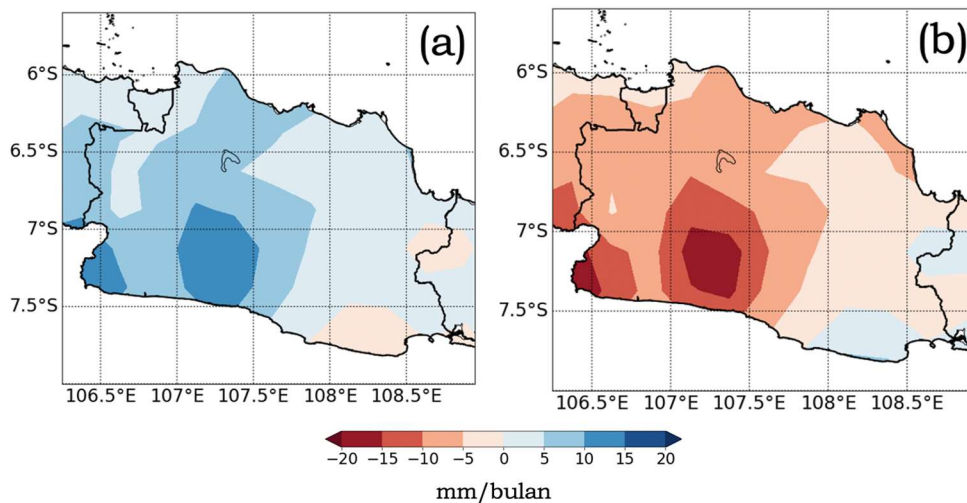
variabilitas IPO ini memiliki keterkaitan dengan fenomena perubahan iklim, yaitu fase IPO positif berkontribusi terhadap peningkatan temperatur Bumi. Sementara itu, peralihan fase IPO menjadi fase negatif sekitar tahun 1999 juga ditemukan menjadi penyebab penurunan tingkat pemanasan global (Dai *et al.*, 2015; England *et al.*, 2014; Kosaka & Xie, 2013; Trenberth & Fasullo, 2013).

Berdasarkan grafik indeks IPO pada Gambar 5, terlihat fase positif IPO terjadi pada rentang tahun 1924-1947 dan 1982-2000, dan fase negatif IPO terjadi pada tahun 1948-

1981. Periode IPO seperti yang terlihat pada Gambar 5 secara garis besar masih konsisten dengan penelitian yang dilakukan oleh Dai (2012), bahwa fase IPO positif terjadi pada tahun 1924–1944 dan 1977–1998, sementara fase IPO negatif terjadi pada rentang tahun 1945-1976. Sedikit perbedaan ini disebabkan karena data indeks IPO yang digunakan pada penelitian ini berbeda dengan data indeks IPO yang digunakan Dai (2012). Dalam penelitian ini digunakan data *IPO Tripole Index (TPI)*, sedangkan Dai (2012) menggunakan data indeks IPO berbasis *Principal Component (PC)*. Evaluasi data TPI dengan



Gambar 5. Grafik *running mean* selama 10 tahun untuk data (a) indeks IPO dan (b) anomali curah hujan bulanan di Provinsi Jawa Barat. Angka dalam grafik menunjukkan nilai rata-rata dari indeks IPO dan anomali curah hujan pada setiap periode fase IPO.



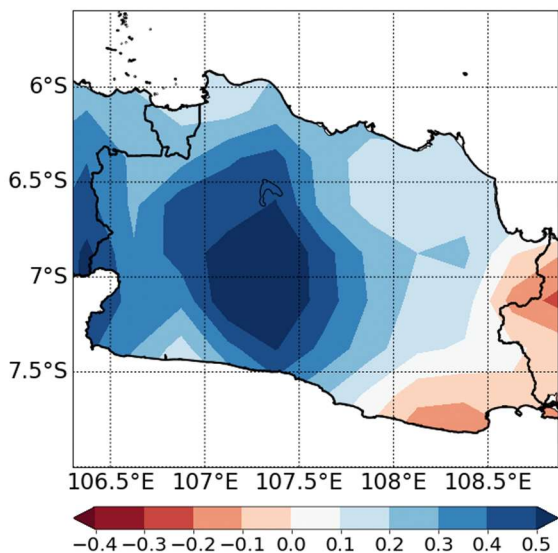
Gambar 6. Komposit anomali curah hujan bulanan di Provinsi Jawa Barat pada (a) fase positif IPO (1924-1947 dan 1982-2000) dan (b) fase negatif IPO (1948-1981).

membandingkan data TPI terhadap indeks IPO berbasis PC seperti yang dihasilkan Dai (2012) telah dilakukan oleh Henley *et al.* (2015). Meskipun rentang tahun periode IPO antara TPI dengan indeks IPO berbasis PC sedikit berbeda, tetapi TPI merupakan alternatif yang bagus untuk indeks IPO (Henley *et al.*, 2015).

Dari dua grafik pada Gambar 5, nilai rata-rata anomali curah hujan pada setiap periode fase IPO cenderung menunjukkan tanda anomali yang sama dengan fase IPO tersebut. Ketika IPO fase positif (negatif), nilai

rata-rata anomali curah hujan pada periode fase tersebut juga bernilai positif (negatif). Meskipun demikian, terlihat adanya anomali curah hujan bernilai positif yang cukup tinggi saat fase negatif IPO. Hal tersebut dapat menunjukkan adanya fenomena variabilitas *interdecadal* lainnya yang memengaruhi curah hujan di Provinsi Jawa Barat.

Berdasarkan perhitungan korelasi antara indeks IPO dan anomali curah hujan di Provinsi Jawa Barat, diperoleh nilai korelasi sebesar 0,3. Walaupun terlihat lemah, korelasi ini masih signifikan secara statistik



Gambar 7. Korelasi antara curah hujan di Provinsi Jawa Barat dan indeks IPO.

dengan tingkat kepercayaan 95%. Korelasi positif ini mengandung arti bahwa Provinsi Jawa Barat cenderung mengalami anomali basah saat fase IPO positif dan mengalami anomali kering saat fase IPO negatif.

Gambar 6 menunjukkan komposit anomali curah hujan dari semua periode IPO positif (1924-1947 dan 1982-2000) dan periode IPO negatif (1948-1981). Berdasarkan komposit tersebut, anomali curah hujan di Provinsi Jawa Barat pada fase IPO positif dan negatif menunjukkan pola yang cukup simetris. Hal ini ditunjukkan pada anomali curah hujan di Jawa Barat yang meningkat (menurun) ketika fase IPO positif (negatif) dengan puncak-puncak anomali yang sama. Begitu juga dengan anomali yang sebaliknya terjadi di Jawa Barat bagian tenggara. Meskipun begitu, karakter non-linear tetap terlihat dari dua fase tersebut yang tidak persis simetris. Nilai anomali hujan pada periode IPO negatif lebih tinggi dibandingkan periode IPO positif, khususnya di Jawa Barat bagian selatan.

Korelasi antara indeks IPO dengan anomali curah hujan di Provinsi Jawa Barat secara spasial ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan nilai korelasi pada gambar tersebut, tidak seluruh wilayah di Provinsi Jawa Barat memiliki pola yang seragam. Korelasi antara indeks IPO dengan anomali curah hujan di Provinsi Jawa Barat secara keseluruhan didominasi oleh korelasi positif. Korelasi positif yang cukup tinggi terdapat di bagian tengah Provinsi Jawa Barat, yaitu di wilayah cekungan Bandung dengan nilai koefisien korelasi melebihi 0,5.

Sementara itu, kondisi sebaliknya terjadi di Jawa Barat bagian tenggara, yaitu bahwa korelasi antara anomali curah hujan dengan indeks IPO bernilai negatif. Hal tersebut juga ditunjukkan pada Gambar 6 bahwa curah hujan di Provinsi Jawa Barat bagian tenggara ini terlihat menurun (meningkat) pada fase IPO positif (negatif). Koefisien korelasi antara indeks IPO dan anomali curah hujan di Jawa Barat bagian tenggara ini memiliki nilai tidak kurang dari -0,3.

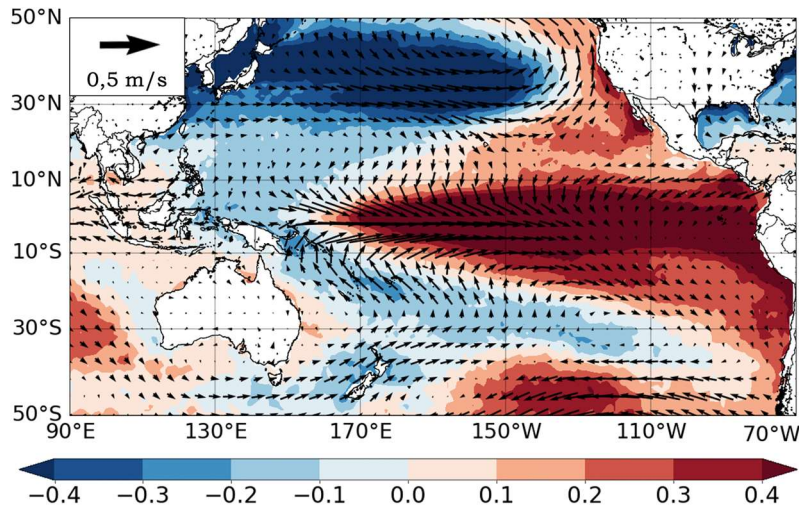
### 3.3. Analisis Variabilitas *Interdecadal*

Analisis selanjutnya dijelaskan melalui peta regresi dari anomali suhu permukaan laut, curah hujan, vektor angin, dan *velocity potential* terhadap indeks IPO. Peta regresi anomali suhu permukaan laut dan arah angin terhadap indeks IPO (Gambar 8) menampilkan fase positif dari IPO yang ditandai dengan anomali suhu permukaan laut yang lebih hangat di Pasifik Tropis dan anomali negatif suhu permukaan laut di Pasifik Utara. Sementara untuk variabel angin, terdapat anomali angin dari arah barat menuju timur di sekitar Pasifik Tropis yang mengindikasikan melemahnya angin timuran ketika fase positif IPO.

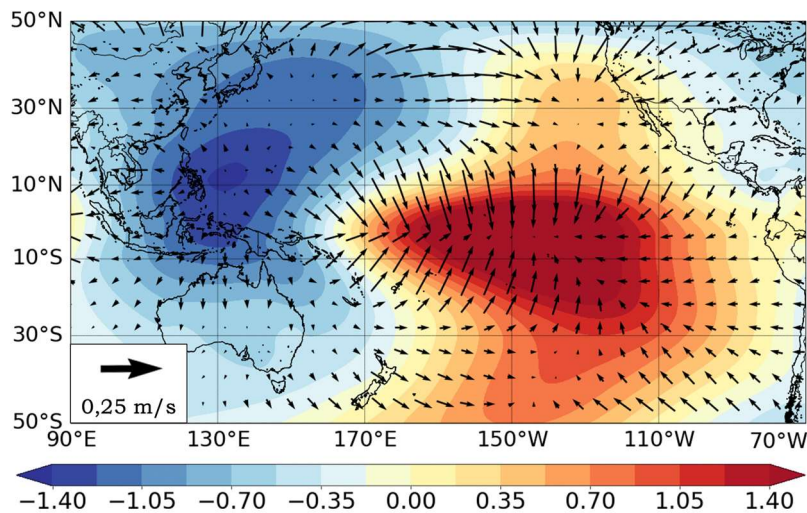
Sementara fase negatif dari IPO dapat divisualisasikan dengan membalik tanda anomali pada peta regresi. Fase negatif IPO dikaitkan dengan anomali negatif suhu permukaan laut di Pasifik Tropis dan anomali positif suhu permukaan laut di Pasifik Utara. Jika dibandingkan dengan *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), fase positif (negatif) IPO memiliki kemiripan dengan *El Niño (La Niña)*, hanya saja IPO memiliki periode multi-decadal.

Penelitian oleh Dong dan Dai (2015) menunjukkan bahwa anomali *Sea Level Pressure* (SLP) di wilayah Indonesia cenderung positif (negatif) selama fase IPO positif (negatif), sedangkan di Pasifik Tropis sebaliknya, khususnya di bagian timur. Anomali SLP yang lebih rendah (tinggi) di Pasifik Tropis selama fase IPO positif (negatif) tersebut merupakan respons terhadap kenaikan (penurunan) suhu permukaan laut tropis yang kemudian melemahkan (meningkatkan) Sirkulasi Walker, mirip dengan fenomena *El Niño (La Niña)*. Penjelasan anomali SLP tersebut umumnya serupa dengan peta regresi dari *velocity potential* dan *divergent wind* di level tekanan





Gambar 8. Regresi anomali suhu permukaan laut (diarsir) ( $^{\circ}\text{C}$  per perubahan nilai standar deviasi dari indeks IPO) dan arah angin di 925 hPa (vektor) terhadap indeks IPO.



Gambar 9. Regresi anomali *velocity potential* (diarsir) ( $10^6 \text{ m}^2/\text{s}$  per standar deviasi) dan *divergent wind* (vektor) pada 925 hPa terhadap indeks IPO.

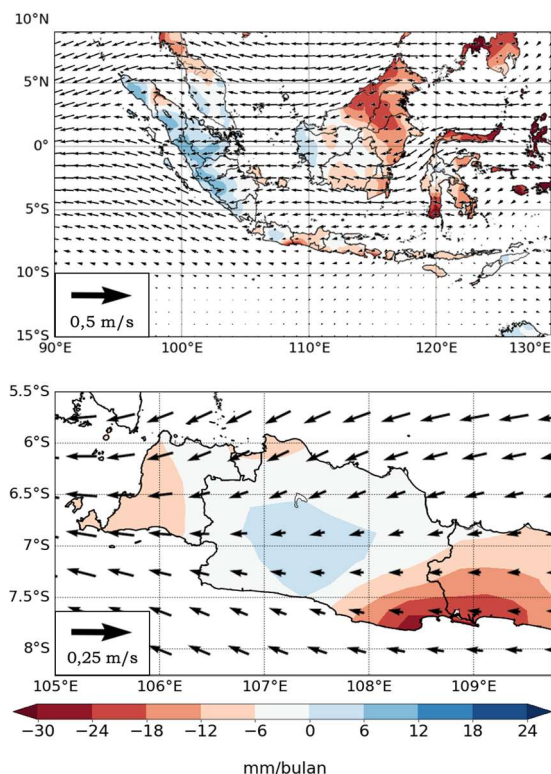
925 hPa (Gambar 9), yaitu adanya daerah konvergensi dan divergensi yang mengindikasikan anomali tekanan di Pasifik Tropis dan wilayah Indonesia. Pada IPO fase positif (negatif), anomali tekanan yang lebih rendah (tinggi) di Pasifik Tropis ini melemahkan (meningkatkan) Sirkulasi Walker di Pasifik dan konveksi atmosfer di sekitar Indonesia sehingga menyebabkan anomali curah hujan di benua maritim.

Pada peta regresi tersebut, dapat dilihat terdapat daerah konvergensi di Samudra Pasifik Tropis bagian tengah yang menandakan adanya tekanan rendah di Pasifik Tropis Tengah ketika fase IPO positif. Sementara itu, daerah divergensi terdapat di sekitar Laut Filipina yang menandakan adanya tekanan tinggi di wilayah tersebut. Pada saat yang sama, divergensi tersebut

juga menyebabkan konveksi di sekitar Laut Filipina melemah karena *subsidence*. *Subsidence* serta efek divergensi ini yang menyebabkan wilayah timur Indonesia cenderung lebih kering ketika fase IPO positif. Selain itu, angin yang menguat dari arah timur laut di wilayah Indonesia juga dikarenakan adanya tekanan tinggi di Laut Filipina.

Gambar 10 menampilkan peta regresi anomali curah hujan dan arah angin terhadap indeks IPO saat fase positif IPO. Berdasarkan peta regresi tersebut, arah angin yang melalui wilayah Indonesia menguat dari arah timur. Lebih tepatnya, angin menguat dari arah timur laut dan bergerak menuju barat karena suhu permukaan laut di Indonesia bagian barat yang lebih hangat. Pola angin ini sesuai dengan angin divergen akibat tekanan tinggi di Laut Filipina. Di bagian timur Indonesia

anomali kering terlihat dan ini konsisten dengan pusat divergensi yang berada di timur



Gambar 10. Regresi anomali curah hujan (shaded) (mm/bulan per standar deviasi) dan arah angin pada 925 hPa (vektor) terhadap indeks IPO di wilayah Indonesia (atas) dan Jawa Barat (bawah).

Indonesia. Namun di sisi barat Indonesia, termasuk wilayah Jawa bagian barat, anomali hujan cenderung positif. Pola *dipole* curah hujan di Indonesia ini kemungkinan besar diakibatkan oleh pola suhu permukaan laut yang memanas di barat Indonesia (Gambar 8). Selain itu pola angin horizontal menunjukkan adanya konvergensi antara anomali angin timuran dan angin tenggara yang mendukung anomali basah di sebelah barat Indonesia.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis perubahan iklim, curah hujan di Provinsi Jawa Barat meningkat dari tahun 1921 hingga tahun 2010 dengan nilai tren curah hujan bulanan meningkat sebesar 1,61 mm/dekade. Secara statistik, tren peningkatan curah hujan pada musim SON merupakan nilai yang signifikan, yaitu sebesar 3,70 mm/dekade. Pada musim DJF dari pola spasial menunjukkan tren yang bercampur, namun terdapat tren yang signifikan di bagian utara Jawa Barat.

Kenaikan curah hujan bulanan sebesar 1,61 mm/dekade ini tidak begitu kuat karena tingginya variabilitas internal yang dikendalikan oleh IPO. Dalam periode multi-dekadal, terdapat korelasi positif yang signifikan secara statistik antara variabilitas IPO dan curah hujan di Provinsi Jawa Barat. Peningkatan konveksi di Provinsi Jawa Barat terjadi ketika fase IPO positif akibat pola anomali angin yang ditimbulkan oleh IPO. Dibandingkan dengan ENSO, pola anomali hujan Indonesia akibat IPO lebih kompleks, yaitu bahwa anomali hujan akibat ENSO cenderung seragam (kecuali DJF).

Fenomena perubahan iklim yang terus terjadi serta diikuti dengan IPO pada fase positif berpotensi mengakibatkan curah hujan yang lebih ekstrem di Provinsi Jawa Barat di masa yang akan datang.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada reviewer dan editor atas saran serta kritik terhadap tulisan ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para dosen Program Studi Meteorologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia atas masukan serta diskusi pada penelitian ini.

Makalah ini telah melewati proses *blind review* yang dimoderasi oleh Tiin Sinatra sebagai editor.

#### Rujukan

Anwar, M. R., Liu, D. L., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., Wang, B., Ramilan, T. (2015). Climate Change Impacts on Phenology and Yields of Five Broadacre Crops at Four Climatologically Distinct Locations in Australia. *Agricultural Systems*, 132, 133-144.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas). (2010). *Indonesia Climate Change Sectoral Roadmap, ICCSR*. Scientific Basis: Analysis and Projection of Temperature and Rainfall. Bappenas: Indonesia.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas). 2011. *Indonesia Adaptation Strategy: Improving Capacity to Adapt*. Bappenas: Indonesia.

Boer, R., Faqih, A.. (2004). Current and Future Rainfall Variability in Indonesia. Dalam *An Integrated Assessment of Climate Change Impacts, Adaptation*

- and Vulnerability in Watershed Areas and Communities in Southeast Asia. *Report from AIACC Project No. AS21*. International START Secretariat.
- Chang, C.-P., Michael, G. M. L., Wallace, J. M. (2016). *Climate Change Multidecadal and Beyond*. World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate.
- Dai, A. (2012). *The Influence of The Interdecadal Pacific Oscillation on US Precipitation during 1923-2010*. National Center for Atmospheric Research.
- Dai, A., Fyfe, J. C., Xie, S. P., Dai., X. (2015). Decadal Modulation of Global Surface Temperature by Internal Climate Variability. *Nature Climate Change*, 5, 555-559.
- Deser, C., Phillips, A. S., Hurrell, J. W. (2004). Pacific Interdecadal Climate Variability: Linkages between the Tropics and the North Pacific during Boreal Winter since 1900. *The American Meteorological Society*, 17, 3109-3124
- Dong, B., Dai, A. (2015). *The Influence of The Interdecadal Pacific Oscillation on Temperature and Precipitation over The Globe*. New York.
- England, M. H., Mcgregor, S., Spence, P., Meehl, G., Timmermann, A., Cai, W., Gupta, A., McPhaden, M., Purich, A., Santoso, A. (2014). Recent Intensification of Wind-Driven Circulation in The Pacific and The Ongoing Warming Hiatus. *Nature Climate Change*, 4, 222-227.
- Faqih, A., Ribbe, J., Meinke, H. (2008). *Interdecadal Variability of Regional Sea Surface Temperature and Rainfall in the Austral-Indonesian Region*. Australia: University of Southern Queensland.
- Gottelman, A., Rood, R. B. (2016). *Demystifying Climate Models, Earth Systems Data and Models*. University of Michigan.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Review in Geophysics*, 48, RG4004.
- Henley, B.J., Gergis, J., Karoly, D. J., Power, S. B., Kennedy, J., Folland, C. K. (2015). A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation. *Climate Dynamics*, 45(11-12), 3077-3090.
- Hoerling, M. P., Kumar, A., Zhong, M. (1997). El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections. *Journal of Climate*, 10, 1769– 1786.
- Houghton, J. (1997). *Global Warming: The Complete Briefing*. New York: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kosaka, Y., Xie, S.-P. (2013). Recent Global-Warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling. *Nature*, 501, 403-407.
- Leggett, J. K. (2000). *The Carbon War: Global Warming and the End of the Oil Era*. London.
- Ruminta. (2016). Analisis Penurunan Produksi Tanaman Padi Akibat Perubahan Iklim di Kabupaten Bandung Jawa Barat. *Jurnal Kultivasi*, 15, 37-45.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. (2013). An Apparent Hiatus in Global Warming? *Earth's Future*, 1, 19-32.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2011). *Fact Sheet: Climate change Science - the Status of Climate Change Science Today*.
- World Meteorological Organization (WMO). (2015). *Technical Regulations*. Switzerland.
- World Meteorological Organization (WMO). (2018). *Guide to Climatological Practices*. Switzerland.

