



## Analisis Dinamika Atmosfer di Benua Maritim Indonesia saat Fase Aktif CENS dan MJO Selama 30 Tahun (1994 - 2023)

Muhizzadin Abdul Adzan<sup>1</sup>, Rendy Syahril Amanu<sup>2</sup>, Panji Kuswanaji<sup>3</sup>, Sayful Amri<sup>4</sup>, dan Ogi Rahmawan Adi Saputro<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 5</sup> Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

<sup>4</sup> Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

e-mail: [sayful.amri@stmkg.ac.id](mailto:sayful.amri@stmkg.ac.id)

**ABSTRAK.** Beberapa variabilitas iklim di Benua Maritim Indonesia (BMI) dapat terjadi secara bersamaan dan memberikan dampak yang berbeda pada saat terjadi secara independen. Namun beberapa penelitian masih mengkajinya secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika atmosfer di BMI saat terjadi Cross-Equatorial Northerly Surge (CENS) dan Madden-Julian Oscillation (MJO) berdasarkan data anomali outgoing longwave radiation (OLR) dan curah hujan selama 30 tahun (1994 - 2023) dengan metode uji signifikansi statistik Monte-Carlo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MJO aktif memengaruhi dampak yang ditimbulkan oleh CENS di BMI. Pada saat terjadi CENS tanpa MJO, wilayah Laut Jawa dan Jabodetabek mengalami peningkatan tutupan awan konvektif dan memicu curah hujan ekstrem, sementara di wilayah Sumatra dan Kalimantan justru mengalami penurunan. Namun saat CENS dan MJO fase 3 aktif, sebagian besar wilayah tersebut mengalami peningkatan tutupan awan dan curah hujan, yakni sebesar 25 mm/hari. Pada saat CENS dan MJO fase 4 dan 5 aktif, terjadi peningkatan tutupan awan konvektif dan curah hujan sebesar 5 hingga > 25 mm/hari di sebagian besar wilayah Indonesia, kecuali pesisir timur Sumatra bagian utara, sebagian Jawa, Kalimantan, dan Papua. Pada fase 6 MJO, pola anomali positif curah hujan di BMI semakin bergeser ke timur, yaitu sebesar 2 hingga 8 mm/hari. Peningkatan curah hujan di pesisir utara Jawa bagian barat menunjukkan bahwa CENS berperan dalam menyediakan kelembapan serta menyeimbangkan suppressed convective MJO. Hasil yang sama juga terlihat pada fase 7 dan 8 MJO, wilayah perairan utara Jawa dan Nusa Tenggara yang masih mengalami peningkatan curah hujan, yaitu > 25 mm/hari.

**Kata kunci:** BMI, CENS, MJO, OLR, Curah Hujan

### PENDAHULUAN

Indonesia yang terletak di antara dua samudera (Pasifik dan Hindia) dan dua benua (Asia dan Australia) menyebabkan dinamika atmosfer baik lokal, regional, maupun global memengaruhi pola curah hujan di wilayah Indonesia (Madani, Hermawan, dan Faqih 2012). Pembahasan mengenai iklim dan cuaca terikat dengan hubungan antara atmosfer, lautan, dan daratan di suatu wilayahnya (Hermawan dkk. 2016). Benua maritim adalah salah satu wilayah yang memiliki aktivitas konvektif yang tinggi (Argüeso, Romero, dan Homar 2020). Benua Maritim Indonesia (BMI) memiliki kondisi iklim dan cuaca yang kompleks karena letaknya (Putra, Alfiandy, dan Haq 2020). Hal ini disebabkan oleh lokasinya yang mengakibatkan adanya berbagai fenomena variabilitas iklim yang mempengaruhi polanya. Contoh dari variabilitas iklim yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah *Cross-Equatorial Northerly Surge* (CENS) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO).

Selama periode *boreal winter*, aliran udara yang berasal dari utara atau bisa disebut Asian *winter monsoon* dapat bergerak menuju wilayah Asia Tenggara dan Asia bagian timur (Song dkk. 2016). Hal ini juga berkaitan dengan aliran udara dingin yang berasal dari perkembangan daerah tekanan tinggi di Siberia-Mongolia (*Siberia Mongolia High*) (Hattori, Mori, dan Matsumoto 2011). Aliran udara dingin ini biasa disebut sebagai *Cold Surge* (CS) atau *Notherly Cold Surge* (NCS). *Cold Surge* (CS) dapat

didefinisikan sebagai peningkatan aliran udara dingin yang bergerak dari utara menuju ke arah selatan (Wang dkk. 2006; Wu dan Chan 1995, 1997). Aliran udara ini terkadang melintasi garis Khatulistiwa dan berganti nama menjadi CENS (Wu dkk. 2007). Interaksi dari udara dingin akibat CENS dengan udara hangat di daerah tropis menyebabkan peningkatan aktivitas konvektif di BMI. Ketika CENS aktif, beberapa kota di Indonesia seperti Jakarta kerap kali terkena bencana banjir akibat peningkatan intensitas curah hujan.

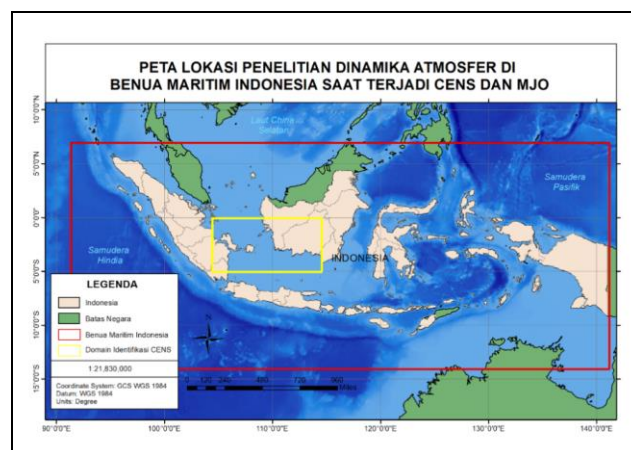
Selain CENS, penelitian ini juga membahas satu dinamika atmosfer yang kerap terjadi di BMI, yaitu MJO. Variabilitas iklim intraseasonal ini merupakan fenomena gelombang atmosfer tropis yang bergerak dari barat ke timur dengan pola siklus tertentu, serta memiliki pengaruh signifikan terhadap dinamika atmosfer di wilayah tropis, termasuk di BMI (Windayati dan Surinati 2016). Fenomena ini ditandai oleh propagasi wilayah *enhanced convective* dan *suppressed convective* di sepanjang ekuator dengan skala waktu sekitar 30-60 hari (Madden dan Julian 1972). Aktivitas MJO dapat memengaruhi pola cuaca di berbagai wilayah, termasuk BMI, melalui pengaruhnya pada aktivitas konvektif, curah hujan, dan pola angin. Sama seperti CENS, pada saat MJO aktif, wilayah Indonesia terutama bagian Barat dan Tengah kerap kali mengalami peningkatan curah hujan yang memicu terjadinya banjir.

Beberapa penelitian sebelumnya sebagian besar mengkaji variabilitas iklim tersebut secara terpisah. Namun MJO dan CENS merupakan variabilitas yang sering terjadi pada saat periode *boreal winter*. Oleh karena itu, kajian ini menganalisis dinamika atmosfer pada saat kedua variabilitas iklim terjadi secara bersamaan. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan pemahaman mengenai dinamika atmosfer di BMI saat terjadinya CENS dan MJO secara bersamaan, sehingga dapat memberikan referensi untuk *weather forecaster* dan *stakeholder* terkait mitigasi bencana hidrometeorologis di wilayah Indonesia.

## METODE

### Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fenomena MJO dan CENS saat kondisi aktif terhadap dinamika atmosfer di wilayah BMI. Wilayah penelitian ini mencakup rentang geografis antara 7°LU hingga 14°LS dan 92°BT hingga 141°BT, yang ditandai dengan kotak merah pada Gambar 1. Penelitian dilakukan dalam rentang waktu 1994 hingga 2023 yang mencakup hampir tiga dekade untuk melihat pengaruh MJO dan CENS saat kondisi aktif terhadap dinamika atmosfer di BMI.



Gambar 1. Lokasi penelitian (kotak merah) dan wilayah identifikasi CENS (kotak kuning)

## Data penelitian

Penelitian ini menggunakan data indeks harian *Real-time Multivariate MJO* (RMM) yang terdiri dari RMM1, RMM2, dan fase MJO. Data ini diperoleh dari *Bureau of Meteorology* (BoM) melalui situs IRI/LDEO *Climate Data Library* (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.BoM/.MJO/.RMM/>). Rentang waktu data yang digunakan yakni selama periode 1994 hingga 2023. Data RMM tersebut digunakan untuk identifikasi MJO aktif selama periode kajian.

Selanjutnya, penelitian ini juga menggunakan data angin meridional (*v wind*) harian pada lapisan atmosfer 925 hPa dengan wilayah 0° – 5° LS dan 105° BT – 115° BT (kotak kuning pada Gambar 1). Data tersebut digunakan untuk mengidentifikasi CENS aktif selama periode kajian. Data *v wind* diambil dari sumber *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) yang dapat diakses melalui *website* <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>. Data tersebut memiliki resolusi spasial 2,5° x 2,5°.

Penelitian ini juga menggunakan data harian curah hujan reanalisis dan *outgoing longwave radiation* (OLR) dari tahun 1994 hingga 2023. Data curah hujan reanalisis memiliki resolusi spasial 0,1° x 0,1°, sedangkan data OLR memiliki resolusi spasial 1° x 1°. Data curah hujan yang digunakan adalah data *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) yang diperoleh dari <https://www.gloh2o.org/mswep/>. Adapun data OLR dalam penelitian ini diperoleh dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), yaitu diperoleh dari [https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.blended\\_olr-1deg.html](https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.blended_olr-1deg.html). Adapun keterangan lengkap data yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Akuisisi data penelitian dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)**

Parameter	Resolusi		Level	Waktu Akuisisi	Lokasi Akuisisi
	Spasial	Temporal			
<i>v wind</i> (m/s)	2,5° x 2,5°	Harian	925 hPa	1994-2023	0° - 5° LS dan 105° BT - 115° BT
<i>Precipitation</i> (mm/hari)	0,1 ° x 0,1 °	Harian	Permukaan	1994-2023	7° LS -14° LU dan 92 BT - 141 BT
<i>Outgoing Longwave Radiation</i> (W m <sup>-2</sup> )	1° x 1°	Harian	Permukaan	1994-2023	7° LS -14° LU dan 92° BT - 141° BT

## Pengolahan data

Identifikasi MJO menggunakan data indeks MJO, yaitu RMM1 dan RMM2, yang diperoleh dari *Bureau of Meteorology* (BoM) untuk periode 1994 hingga 2023. Amplitudo MJO dihitung menggunakan rumus pada Persamaan 1 (Wheeler dan Hendon 2004).

$$\text{Amplitudo} : \sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} \quad (1)$$

Dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan *Wheeler-Hendon MJO index* (Wheeler & Hendon, 2004) dengan menggunakan skenario 2 yang dijelaskan oleh *Climate Prediction Center - MJO Composites Information* dengan syarat amplitudo  $\geq 0,95$  dipilih sebagai indikator MJO aktif. Selanjutnya, fase MJO yang aktif diidentifikasi dengan memverifikasi MJO aktif tersebut minimal tiga fase (fase 1 hingga 8) dengan syarat berurutan sesuai dengan arah propagasi aktif MJO yaitu dari barat ke timur. Selain itu, total durasi fase aktif yang valid diverifikasi harus memiliki panjang minimal 25 hari.

Selanjutnya, identifikasi CENS dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan kriteria yang digunakan oleh Hattori dkk. (2011). Tahapan pengolahan data dimulai dengan menggunakan data kecepatan angin meridional (*v wind*) lapisan 925 hPa. CENS aktif jika rata-rata spasial kecepatan

angin meridional di region identifikasi CENS, yaitu kota kuning pada Gambar 1 kurang dari -5 m/s atau kecepatan angin utaranya lebih dari 5 m/s. Rata-rata spasial pada region tersebut dihitung atau diolah menggunakan perintah “*fldmean*” pada aplikasi *Climate Data Operator* (CDO).

Langkah selanjutnya adalah kejadian MJO dan CENS yang aktif secara bersamaan. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh setiap fase MJO saat kondisi CENS aktif. Setiap fase MJO (fase 1–8) yang terjadi bersamaan dengan CENS aktif diidentifikasi untuk menentukan hubungan antara MJO fase 1-8 dan CENS. Penelitian ini menggunakan data curah hujan dan *outgoing longwave radiation* (OLR). Kedua data tersebut digunakan sebagai indikator aktivitas konveksi atmosfer yang berperan penting dalam mengidentifikasi kondisi dinamika atmosfer (Purwaningsih dkk. 2020). Proses pengolahan data dilakukan untuk memperoleh data anomali yang merepresentasikan penyimpangan dari kondisi klimatologisnya. Anomali curah hujan dan OLR harian dihitung dengan mengurangi nilai aktual harian (tanpa 29 Februari) dari data klimatologi selama 30 tahun pada tanggal yang bersesuaian dengan berdasarkan Persamaan 2 dan 3 (World Meteorological Organization 1989).

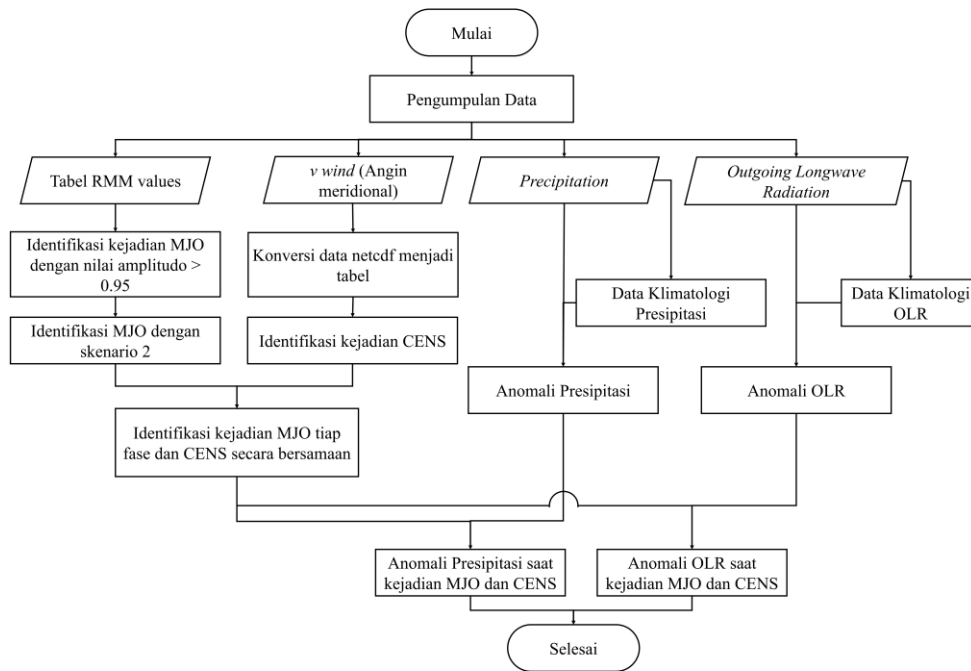
$$ACH = CH - CHmean \quad (2)$$

$$AOLR = OLR - OLRmean \quad (3)$$

Keterangan:

ACH	= anomali curah hujan harian
CH	= data curah hujan harian selama periode kajian
CHmean	= data klimatologis curah hujan harian selama 30 tahun (1991-2020)
AOLR	= anomali OLR harian
OLR	= data OLR harian selama periode kajian
OLRmean	= data klimatologis OLR harian selama 30 tahun (1991-2020).

Secara matematis, anomali didefinisikan sebagai selisih antara nilai aktual harian dan rata-rata klimatologis tahunan. Proses ini menghasilkan data anomali curah hujan dan OLR untuk setiap hari dalam periode penelitian. Anomali curah hujan dan OLR dianalisis selama periode MJO aktif pada masing-masing fasenya untuk mengidentifikasi pola dinamika atmosfer yang berhubungan dengan fase MJO. Analisis pola spasial anomali curah hujan dan anomali OLR pada setiap fase MJO aktif yang bersamaan dengan CENS aktif dibuat komposit dan diuji signifikansinya menggunakan metode *monte carlo* dengan teknik *bootstrap* (Booth dan Hall 1994). Metode *bootstrap* adalah pendekatan statistik nonparametrik untuk memperkirakan distribusi sampel dengan cara mengambil sampel ulang (*resampling*) secara acak dari data yang ada (Efron dan Tibshirani 1994) dengan sampling yang dilakukan adalah 1000 kali. Uji signifikansi tersebut bertujuan untuk menampilkan peningkatan atau penurunan tutupan awan dan curah hujan yang signifikan secara statistik pada saat terjadi MJO dan CENS aktif bersamaan. Tahapan dalam penelitian ini dijelaskan pada diagram alir (Gambar 2).

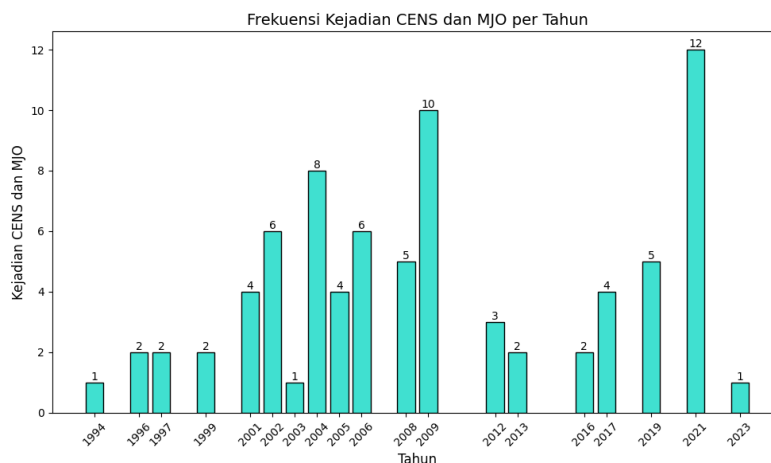


**Gambar 2. Diagram alir penelitian**

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Frekuensi kejadian CENS dan MJO Selama 1994-2023

Interaksi CENS dan MJO dapat memengaruhi intensitas curah hujan di wilayah BMI karena berperan dalam memengaruhi konvergensi tingkat rendah (Moteki 2024). Distribusi kejadian CENS aktif yang terjadi secara bersamaan dengan fase aktif MJO dari fase 1 hingga 8 selama 30 tahun (1994 - 2023) ditunjukkan pada Gambar 3. Kejadian CENS dan MJO yang terjadi bersamaan tidak terjadi di setiap tahunnya. Terdapat beberapa tahun yang mana kejadian CENS dan MJO tidak terjadi secara bersamaan yakni pada tahun 1995, 1998, 2000, 2007, 2010, 2011, 2014, 2015, 2018, 2020, dan 2022. Distribusi kejadian CENS dan MJO yang terjadi secara bersamaan memiliki frekuensi terbesar terjadi pada tahun 2021 dengan 12 kejadian, serta disusul tahun 2009 dengan 10 kejadian. Selain itu, pada tahun 2023, terdapat distribusi kejadian CENS dan MJO yang terjadi secara bersamaan sebanyak 1 kejadian. Distribusi kejadian CENS dan MJO secara bersamaan pada periode 1994 hingga 2023 menunjukkan distribusi yang berfluktuatif setiap tahunnya.

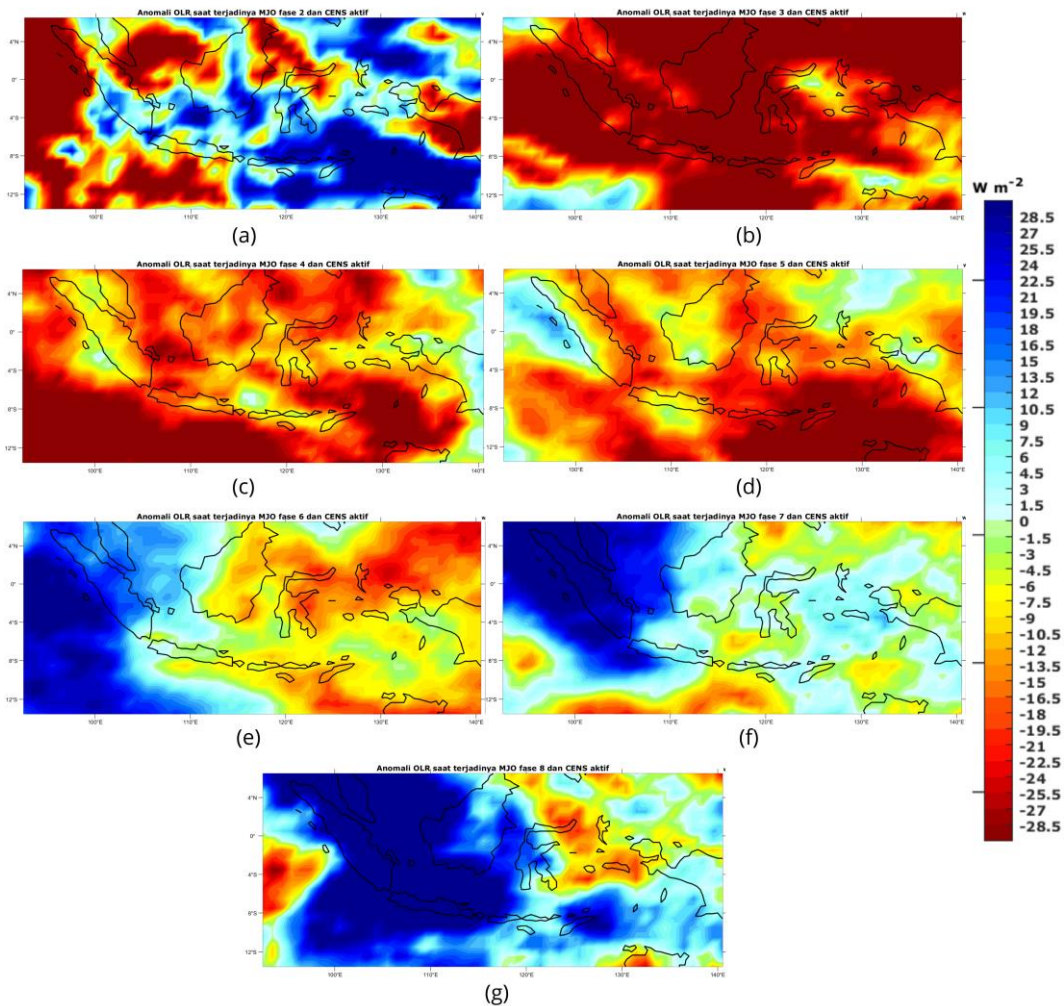




Gambar 3. Grafik kejadian fase aktif CENS dan MJO selama 30 tahun (1994-2023)

### Anomali OLR saat kejadian CENS dan MJO

CENS dan MJO menjadi salah satu fenomena yang dapat terjadi di BMI serta turut memengaruhi dinamika atmosfer di wilayah tersebut (Maulana dkk. 2023; Worku, Mekonnen, dan Schreck III 2020). Fenomena CENS dapat memberikan dampak yang intens dalam meningkatkan pembentukan awan-awan konvektif serta peningkatan curah hujan di wilayah BMI, khususnya wilayah barat Indonesia (Dewi dkk. 2023; Hattori dkk. 2011). Selain itu, MJO juga dapat memberikan dampak berupa peningkatan curah hujan (*monsoon burst*) dan penurunan curah hujan (*monsoon break*) pada periode *boreal winter* di BMI (Worku dkk. 2020).



Gambar 4. Distribusi Anomali OLR saat kejadian fase aktif CENS dan MJO selama 30 tahun (1994-2023) pada MJO (a) fase 2, (b) fase 3, (c) fase 4, (d) fase 5, (e) fase 6, (f) fase 7, dan (g) fase 8

Gambar 4 merupakan anomali OLR saat kejadian fase aktif CENS dan fase aktif MJO (fase 2 hingga 8) selama 30 tahun (1994 - 2023) di BMI. Nilai anomali OLR bernilai positif menunjukkan peningkatan OLR dari bumi, yang berarti kurangnya tutupan awan atau aktivitas konvektif dalam menyerap OLR saat meninggalkan bumi sehingga dapat diartikan tutupan awan konvektifnya lebih sedikit daripada klimatologis. Sebaliknya, jika anomali OLR-nya negatif, artinya tutupan awannya konvektifnya lebih banyak dibandingkan klimatologisnya (Hidayat dan Kizu 2010). Hasil identifikasi selama periode kajian tidak ditemukan kejadian MJO aktif fase 1 yang terjadi bersamaan dengan CENS aktif, sehingga pada Gambar 4 tidak ditampilkan anomali OLR pada saat terjadi MJO fase 1 dan CENS.

Pada saat MJO aktif fase 2 (Gambar 4a) dimana konvektif MJO berada di Samudra Hindia bagian barat dan bersamaan dengan CENS aktif menunjukkan bahwa beberapa wilayah seperti Laut Banda, Laut Arafura, Nusa Tenggara, Maluku, Laut Jawa, sebagian Pulau Jawa, dan Sumatra didominasi dengan anomali OLR yang bernilai positif sekitar  $3 \text{ W/m}^2$  hingga lebih dari  $28,5 \text{ W/m}^2$ . Hasil ini menunjukkan bahwa wilayah-wilayah tersebut mengalami penurunan tutupan awan pada saat MJO fase 2 dan CENS aktif yang terjadi bersamaan. Sebaliknya, beberapa wilayah seperti Papua, Kepulauan Riau, dan Samudra Hindia didominasi dengan anomali OLR negatif sekitar  $-6 \text{ W/m}^2$  hingga lebih kecil dari  $-28,5 \text{ W/m}^2$  yang mengindikasikan adanya peningkatan jumlah tutupan awan terhadap klimatologisnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya MJO aktif pada fase 2, mengubah dampak yang ditimbulkan CENS di pesisir utara Jawa bagian barat, dimana pada saat terjadi CENS saja, wilayah seperti Laut Jawa dan Jabodetabek mengalami peningkatan tutupan awan konvektif (Dewi dkk. 2023). Sebaliknya, pada saat terjadi CENS aktif, wilayah Sumatra dan Kalimantan mengalami penurunan tutupan awan konvektifnya (Dewi dkk. 2023), namun pada saat terjadi bersamaan dengan MJO aktif fase 2, untuk Sumatra bagian selatan dan Kalimantan bagian barat mengalami peningkatan tutupan awan. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh adanya MJO pada fase 2 yang merubah pola transpor kelembapan pada saat terjadi penguatan monsun dingin Asia tepatnya saat terjadi CENS.

Pada saat CENS terjadi bersamaan dengan MJO aktif pada fase 3 (Gambar 4b) yang artinya konvektif MJO Samudra Hindia bagian timur dan Sumatra bagian utara, wilayah BMI seluruhnya didominasi oleh anomali negatif OLR, yaitu sebesar  $-6 \text{ W/m}^2$  hingga kurang dari  $-28,5 \text{ W/m}^2$ . Hasil ini menunjukkan bahwa dengan adanya MJO aktif di wilayah BMI bagian barat, sebagian besar wilayah BMI mengalami peningkatan tutupan awan konvektif. Hasil ini juga menunjukkan bahwa dengan aktifnya MJO fase 3, beberapa wilayah seperti Sumatra dan Kalimantan yang sebelumnya kondisinya cerah pada saat terjadi CENS (Dewi dkk. 2023) mengalami peningkatan tutupan awan konvektif karena konvektif MJO berada di BMI bagian barat.

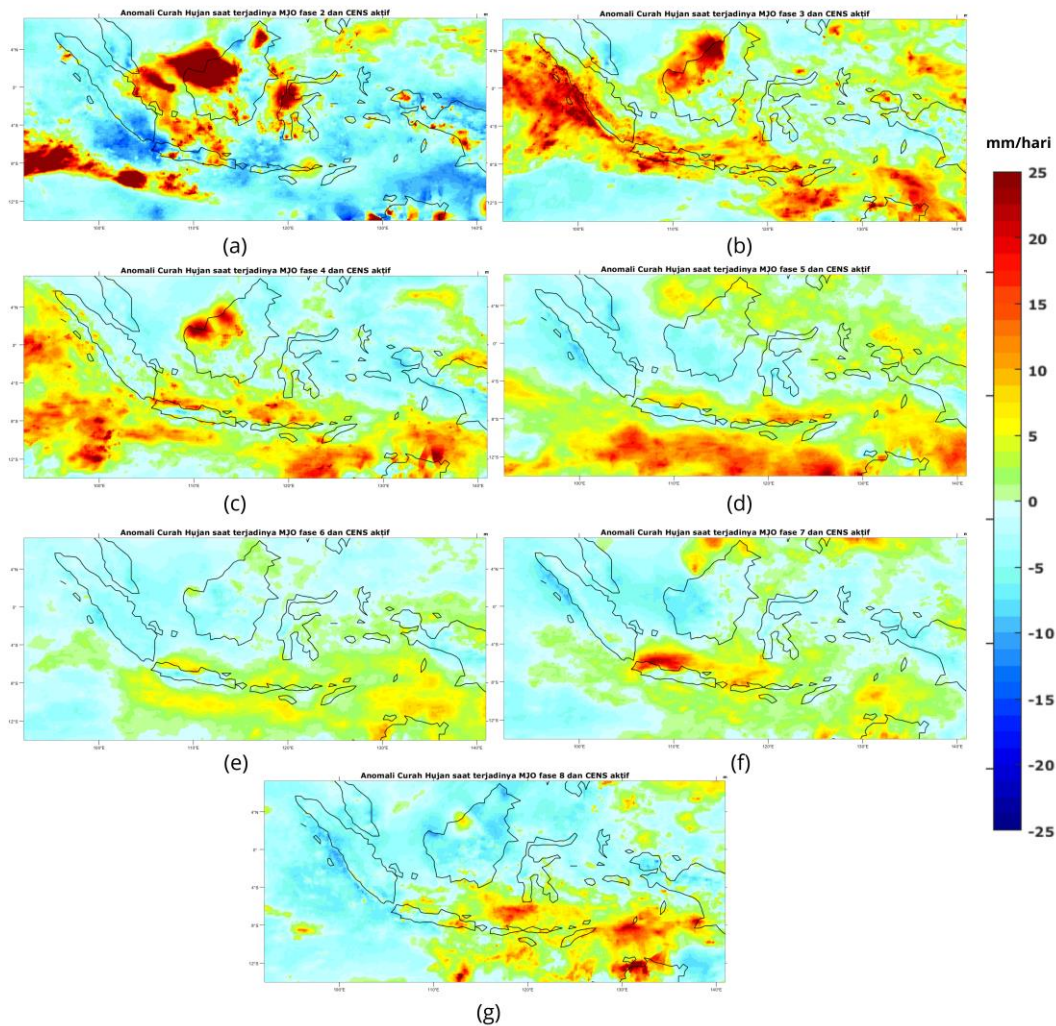
Adapun pada saat CENS aktif bersamaan dengan MJO aktif pada fase 4 (Gambar 4c) yang artinya konvektif MJO berada sepenuhnya di Indonesia bagian barat, nilai anomali OLR di sebagian besar wilayah BMI juga masih didominasi dengan nilai negatif terutama di wilayah barat, tengah, dan sebagian timur Indonesia dengan nilai  $-1,5$  hingga kurang dari  $-28,5 \text{ W/m}^2$ . Hal ini menunjukkan peningkatan tutupan awan pada periode tersebut jika dibandingkan dengan klimatologisnya. Pada saat CENS aktif bersamaan dengan MJO fase 5 (Gambar 4d) yang artinya konvektif MJO berada pada Wilayah Indonesia timur, nilai anomali OLR masih didominasi dengan nilai negatif, terutama timur BMI bagian selatan (sekitar Laut Arafura, Banda, dan Timor), Samudra Hindia, dan tengah BMI (Jawa, Kalimantan, dan sebagai Sumatra) dengan nilai  $-1,5$  hingga kurang dari  $-28,5 \text{ W/m}^2$ .

Pada saat konvektif MJO mulai bergeser di Samudra Pasifik bagian barat, yaitu fase 6 MJO (Gambar 4e), anomali OLR di BMI didominasi dengan nilai positif di bagian barat Indonesia dengan nilai  $1,5$  hingga  $> 28,5 \text{ W/m}^2$ . Hasil ini menunjukkan bahwa di wilayah tersebut mulai mengalami penurunan tutupan awan. Adapun beberapa wilayah Indonesia bagian timur dan sebagian Indonesia bagian tengah masih didominasi dengan anomali OLR yang negatif, yang artinya masih terjadi peningkatan tutupan awan konvektif di wilayah tersebut.

Adapun pada saat konvektif MJO sudah sepenuhnya meninggalkan BMI, yaitu berada di Samudra Pasifik, yaitu fase 7 dan 8 (Gambar 4f dan 4g), anomali OLR di BMI didominasi dengan nilai positif  $1,5$  hingga  $> 28,5 \text{ W/m}^2$  yang artinya terjadi penurunan tutupan awan konvektif. Hal ini menunjukkan bahwa transpor kelembapan yang besar oleh adanya penguatan monsun dingin Asia karena CENS yang sebelumnya dapat meningkatkan tutupan awan konvektif di pesisir utara Jawa bagian barat (Dewi dkk. 2023) kalah dominan dari *suppressed convective* MJO, sehingga di sebagian besar wilayah Indonesia cuacanya cerah. Jika kondisi ini berlangsung pada periode musim hujan di Jawa, maka periode ini dikenal sebagai *monsoon break*.

## Anomali Curah Hujan saat kejadian CENS dan MJO

Selain memengaruhi tutupan awan, CENS dan MJO juga dapat berperan dalam memengaruhi curah hujan di wilayah *maritime continent* terutama Indonesia bagian barat (Lu, Li, dan Wang 2019; Saufina dkk. 2021). CENS dan MJO yang terjadi secara bersamaan dapat menciptakan peningkatan maupun penurunan curah hujan di BMI (Yulihastin dan Fathrio 2014). Anomali curah hujan pada saat terjadi MJO dan CENS secara bersamaan dapat digunakan dalam menganalisis peningkatan atau penurunan curah hujan di BMI dibandingkan klimatologisnya.



**Gambar 5.** Distribusi anomali curah hujan saat kejadian fase aktif CENS dan MJO selama 30 tahun (1994-2023) pada MJO (a) fase 2, (b) fase 3, (c) fase 4, (d) fase 5, (e) fase 6, (f) fase 7, dan (g) fase 8

Gambar 5 tersebut merupakan distribusi anomali curah hujan saat kejadian fase aktif CENS dan fase aktif MJO (fase 2 hingga 8) selama 30 tahun (1994 - 2023) di BMI. Anomali curah hujan yang bernilai positif mengidentifikasi adanya peningkatan curah hujan terhadap klimatologisnya, sedangkan ketika anomali curah hujan bernilai negatif menunjukkan terjadinya penurunan curah hujan dibandingkan klimatologisnya (Xu dkk. 2023). Hasil identifikasi selama periode kajian tidak ditemukan kejadian MJO aktif fase 1 yang terjadi bersamaan dengan CENS aktif, sehingga pada Gambar 5 juga tidak ditampilkan anomali curah hujan pada saat terjadi MJO fase 1 dan CENS.

Pada saat MJO aktif fase 2 (Gambar 5a) dimana konvektif MJO berada di Samudra Hindia bagian barat dan bersamaan dengan CENS aktif menunjukkan bahwa nilai anomali curah hujan di beberapa wilayah Indonesia, seperti Kalimantan Barat, Laut Jawa bagian tengah, Laut Cina Selatan (LCS), dan Sulawesi didominasi nilai positif sekitar 10 hingga lebih dari 25 mm/hari. Sebaliknya, anomali curah hujan negatif sekitar -2 hingga -20 mm/hari terjadi di pesisir utara Jawa bagian barat,



Sumatra, dan Papua. Pada saat identifikasi kasus ini, terdapat gangguan sinoptik lainnya, berupa *borneo vortex* (BV). Hasil tersebut menunjukkan bahwa dengan adanya MJO aktif pada fase 2 dan BV, mengubah dampak yang ditimbulkan CENS di pesisir utara Jawa bagian barat, dimana pada saat terjadi CENS saja, wilayah seperti Laut Jawa dan Jabodetabek mengalami peningkatan tutupan awan konvektif yang memicu terjadinya hujan ekstrim dan menimbulkan banjir di sebagian besar wilayah Jabodetabek (Dewi dkk. 2023). Sebaliknya, wilayah Sumatra mengalami penurunan tutupan awan konvektifnya dan penurunan curah hujannya (Dewi dkk. 2023). Namun, hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa pada saat terjadi bersamaan dengan MJO aktif fase 2 disertai dengan BV, Kalimantan bagian barat menjadi bertambah curah hujan, sedangkan pesisir utara Jawa bagian barat mengalami pengurangan tutupan awan dan curah hujan yang lebih rendah dibandingkan klimatologisnya. Kondisi ini disebabkan oleh adanya MJO pada fase 2 dan BV yang mengurangi transpor kelembapan ke wilayah tersebut karena terpusat oleh siklonik dari BV tersebut.

Pada saat CENS terjadi bersamaan dengan MJO aktif pada fase 3 (Gambar 5b) yang artinya konvektif MJO Samudra Hindia bagian timur dan Sumatra bagian utara, pola anomali curah hujannya sedikit berbeda dengan pada saat MJO aktif di fase 2. Beberapa wilayah BMI, seperti pesisir utara Jawa bagian barat, Sumatra dan Kalimantan Barat, Bali, dan Nusa Tenggara masih didominasi dengan nilai positif sekitar 0 hingga lebih dari 25 mm/hari, serta terdapat nilai anomali negatif sekitar -2 hingga -10 mm/hari di sekitar Kalimantan Timur. Hasil ini juga menunjukkan bahwa dengan aktifnya MJO fase 3, beberapa wilayah seperti Sumatra yang sebelumnya kondisinya cerah pada saat terjadi CENS (Dewi dkk. 2023) berubah menjadi bertambah tutupan awan konvektifnya dan curah hujannya karena konvektif MJO berada di BMI bagian barat.

Pada saat CENS aktif bersamaan dengan MJO aktif pada fase 4 (Gambar 5c) yang artinya konvektif MJO berada sepenuhnya di Indonesia bagian barat, nilai anomali OLR di sebagian besar wilayah BMI didominasi dengan nilai negatif (Gambar 4c) dan meningkatkan curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia, kecuali pesisir timur Sumatra bagian utara (Sumbagut), sebagian Jawa Tengah, Kalimantan bagian timur dan sebagian Papua. Nilai anomali curah hujan positif berkisar antara 0 hingga lebih dari 25 mm/hari dengan nilai tertinggi berada di sekitar Kalimantan Barat, Samudra Hindia, dan pesisir utara Jawa bagian barat. Adapun anomali negatif curah hujannya sebesar -2 hingga -12 mm/hari.

Pada saat CENS aktif bersamaan dengan MJO fase 5 (Gambar 5d) yang artinya konvektif MJO berada pada wilayah Indonesia timur, anomali positif curah hujan mulai bergeser ke Indonesia bagian timur. Nilai anomali positifnya berkisar antara 0 hingga lebih dari 25 mm/hari dengan nilai tertinggi berada di perairan selatan Jawa, Laut Jawa, Bali, Nusa Tenggara, dan Papua. Adapun penurunan curah hujan pada periode ini terjadi di Indonesia bagian barat, seperti di wilayah Sumatra, yaitu sebesar -2 hingga -10 mm/hari. Pola spasial dampak pada fase ini mirip dengan dampak yang ditimbulkan oleh CENS (Dewi dkk. 2023), meskipun anomali di pesisir utara Jawa bagian barat tidak sebesar pada saat CENS saja yang aktif.

Pada fase 6 MJO (Gambar 5e) yang konvektifnya berada di Samudra Pasifik bagian barat, pola anomali positif curah hujan di BMI semakin bergeser ke timur, dengan nilai anomali curah hujan positifnya sebesar 2 hingga 8 mm/hari. Anomali positif ini juga masih terjadi di pesisir utara Jawa bagian barat. Hal ini menunjukkan bahwa peranan CENS dalam menyediakan kelembapan di wilayah tersebut mampu menyeimbangkan *suppressed convective* MJO. Oleh karena itu, sebagian besar wilayah BMI bagian barat, seperti Sumatra dan Kalimantan didominasi oleh penurunan curah hujan sebesar -1 hingga -6 mm/hari.

Pada fase 7 MJO (Gambar 5f) yang konvektif MJO-nya berada di tengah Samudra Pasifik, anomali curah hujan di BMI mirip dengan fase 6 MJO. Namun, wilayah perairan utara Jawa mengalami peningkatan curah hujan yang lebih besar dibandingkan saat MJO fase 6, yaitu lebih dari 25 mm/hari. Hal ini menunjukkan bahwa transpor kelembapan yang besar oleh adanya penguatan monsun dingin Asia karena CENS yang sebelumnya dapat meningkatkan tutupan awan konvektif dan curah hujan ekstrem di pesisir utara Jawa bagian barat (Dewi dkk. 2023) masih lebih dominan dari *suppressed convective* MJO. Adapun pada fase 8 MJO (Gambar 5g) yang konvektif MJO-

nya berada di belahan bumi bagian barat, anomali curah hujan di BMI mirip dengan fase sebelumnya, namun peningkatan curah hujan bergeser ke timur, yaitu di perairan Nusa Tenggara dan Laut Arafura sebesar 5 hingga 15 mm/hari. Selain wilayah tersebut, BMI didominasi oleh penurunan curah hujan sekitar -2 hingga -10 mm/hari.

## KESIMPULAN

Adanya MJO aktif mengubah dampak yang ditimbulkan oleh CENS di Indonesia bagian barat. Pada saat terjadi CENS tanpa MJO, wilayah laut Jawa dan Jabodetabek mengalami peningkatan tutupan awan konvektif dan memicu curah hujan ekstrem, dan sebaliknya wilayah Sumatra dan Kalimantan mengalami penurunan tutupan awan konvektifnya dan curah hujannya. Namun pada saat CENS terjadi bersamaan dengan MJO aktif fase 3, sebagian besar Sumatra dan Kalimantan bagian barat berubah menjadi bertambah tutupan awannya dan curah hujannya, yaitu sebesar 25 mm/hari. Pada saat CENS aktif bersamaan dengan MJO aktif pada fase 4, terjadi peningkatan tutupan awan konvektif dan curah hujan sebesar 5 hingga lebih dari 25 mm/hari di sebagian besar wilayah Indonesia, kecuali pesisir timur Sumatra bagian utara (Sumbagut), sebagian Jawa Tengah, Kalimantan bagian timur dan sebagian Papua. Pada saat MJO fase 5, anomali positif curah hujan mulai bergeser ke Indonesia bagian timur, yaitu berkisar antara 0 hingga lebih dari 25 mm/hari. Adapun penurunan curah hujan pada periode ini terjadi di Indonesia bagian barat, seperti di wilayah Sumatra, yaitu sebesar -2 hingga -10 mm/hari.

Pada fase 6 MJO, pola anomali positif curah hujan di BMI semakin bergeser ke timur, yaitu sebesar 2 hingga 8 mm/hari. Peningkatan curah hujan ini juga masih terjadi di pesisir utara Jawa bagian barat. Hal ini menunjukkan bahwa peranan CENS dalam menyediakan kelembapan di wilayah tersebut mampu menyeimbangkan *suppressed convective* MJO. Adapun Pada fase 7 dan 8 MJO, wilayah perairan utara Jawa, Nusa Tenggara masih mengalami peningkatan curah hujan, yaitu lebih dari 25 mm/hari. Hal ini menunjukkan bahwa transpor kelembapan yang besar oleh adanya penguatan monsun dingin Asia karena CENS masih lebih dominan dari *suppressed convective* MJO. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi *weather forecaster* terutama pada saat memprediksi cuaca ketika kedua variabilitas iklim tersebut terjadi secara bersamaan.

## PENGHARGAAN

Penulis mengucapkan penghargaan dan terima kasih kepada *Bureau of Meteorology* (BoM), GloH2O, dan *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) karena telah menyediakan data RMM MJO serta data *reanalysis v wind, outgoing longwave radiation, dan precipitation* selama 30 tahun. Selain itu, penghargaan yang sebesar-besarnya juga diberikan kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) serta para dosen STMKG yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan teknik pengolahan data yang sangat bermanfaat. Dukungan dan kontribusi dari semua pihak tersebut merupakan bagian yang sangat penting dalam mendukung penyelesaian penelitian ini.

## REFERENSI

- Argüeso, D., R. Romero, dan V. Homar. 2020. "Precipitation features of the Maritime Continent in parameterized and explicit convection models." *Journal of Climate* 33(6):2449–66.
- Booth, James G., dan Peter Hall. 1994. "Monte Carlo approximation and the iterated bootstrap." *Biometrika* 81(2):331–40.

Dewi, BP, Sayful Amri, Muharsyah Robi, DPO Veanti, dan Sagita Novria. 2023. "The influence of cross-equatorial northerly surge in the western maritime continent." Hlm. 02005 dalam Vol. 464. EDP Sciences.

Efron, Bradley, dan Robert J. Tibshirani. 1994. *An introduction to the bootstrap*. Chapman and Hall/CRC.

Hattori, Miki, Shuichi Mori, dan Jun Matsumoto. 2011. "The cross-equatorial northerly surge over the maritime continent and its relationship to precipitation patterns." *気象集誌. 第2輯* 89:27–47.

Hermawan, Eddy, Haries Satyawardhana, Adi Witono, Sinta Berliana, dan Shailla Rustiana. 2016. "Status Terkini Prediksi Curah Hujan MK 2016 dan MH 2016/2017 (Studi Kasus: DI Yogyakarta)." *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 13(1).

Hidayat, Rahmat, dan Shoichi Kizu. 2010. "Influence of the Madden-Julian Oscillation on Indonesian rainfall variability in austral summer." *International Journal of Climatology* 30(12):1816–25.

Lu, Jiahao, Tim Li, dan Lu Wang. 2019. "Precipitation diurnal cycle over the Maritime Continent modulated by the MJO." *Climate Dynamics* 53(9):6489–6501.

Madani, Naziah, Eddy Hermawan, dan Akhmad Faqih. 2012. "Pengembangan Model Prediksi Madden-Julian Oscillation (MJO) Berbasis Hasil Analisis Data Wind Profiler Radar (WPR)." *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 13(1).

Madden, Roland A., dan Paul R. Julian. 1972. "Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period." *Journal of Atmospheric Sciences* 29(6):1109–23.

Maulana, Madam Taqiyya, Takeshi Yamazaki, Toshiki Iwasaki, dan Muhammad Rais Abdillah. 2023. "Regional variation of the influence of cross-equatorial northerly surge towards diurnal cycle of rainfall over Java Island." *Geoscience Letters* 10(1):40.

Moteki, Qoosaku. 2024. "Vertical structure and occurrence patterns of the cross-equatorial northerly surge under different ENSO and MJO phases." *Scientific Reports* 14(1):29116.

Purwaningsih, Anis, Teguh Harjana, Eddy Hermawan, dan Dita Fatria Andarini. 2020. "Kondisi Curah Hujan dan Curah Hujan Ekstrem Saat MJO Kuat dan Lemah: Distribusi Spasial dan Musiman di Indonesia." *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca* 21(2):85–94.

Putra, Richard Mahendra, Solih Alfiandy, dan Bagas Ega Amirul Haq. 2020. "Identifikasi Pengaruh El Nino Southern Oscillation (Enso), Indian Ocean Dipole (Iod), And Madden Julian Oscillation (Mjo) Terhadap Intensitas Curah Hujan Bulanan Di Indonesia Berbasis Machine Learning." *Buletin Ngurah Rai* 6:1–8.

Saufina, Elfira, Trismidianto Trismidianto, Risyanto Risyanto, Ibnu Fathrio, dan Wendi Harjupa. 2021. "Impact of cross equatorial northerly surge (CENS) on Jakarta heavy rainfall and its interaction with tropical cyclone (Case study: 18-25 February 2020)." dalam Vol. 2366. AIP Publishing.

Song, Lei, Lin Wang, Wen Chen, dan Yang Zhang. 2016. "Intraseasonal variation of the strength of the East Asian trough and its climatic impacts in boreal winter." *Journal of Climate* 29(7):2557–77.

Wang, Bin, C. P. Chang, Zhuo Wang, dan Harry Hendon. 2006. "The Asian winter monsoon." *The Asian Monsoon* 89–127.

Wheeler, Matthew C., dan Harry H. Hendon. 2004. "An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction." *Monthly weather review* 132(8):1917–32.

Windayati, Rainey, dan Dewi Surinati. 2016. "Fenomena Madden-Julian Oscillation (MJO)." *Oseana* 41(3):35–43.

Worku, Lakemariam Y., Ademe Mekonnen, dan Carl J. Schreck III. 2020. "The impact of MJO, Kelvin, and equatorial Rossby waves on the diurnal cycle over the Maritime continent." *Atmosphere* 11(7):711.

World Meteorological Organization. 1989. "Calculation of monthly and annual 30-year standard normals." *WCDP 10, WMO-TD 341*.

Wu, MC, dan Johnny CL Chan. 1995. "Surface features of winter monsoon surges over South China." *Monthly Weather Review* 123(3):662–80.

Wu, MC, dan Johnny CL Chan. 1997. "Upper-level features associated with winter monsoon surges over South China." *Monthly Weather Review* 125(3):317–40.

Wu, Peiming, Masayuki Hara, Hironori Fudeyasu, Manabu D. Yamanaka, Jun Matsumoto, Fadli Syamsudin, Reni Sulistyowati, dan Yusuf S. Djajadihardja. 2007. "The impact of trans-equatorial monsoon flow on the formation of repeated torrential rains over Java Island." *Sola* 3:93–96.

Xu, Qi, Zhaoyong Guan, Dachao Jin, Wei Chen, dan Jing Zhu. 2023. "Regional Characteristics of Summer Precipitation Anomalies in the Northeastern Maritime Continent." *Atmosphere* 14(7):1059.

Yulihastin, Erma, dan Ibnu Fathrio. 2014. "Interaction between CENS-MJO transition phase affect to diurnal anomaly of the rainfall over West Java." Hlm. 1–20 dalam.