Analisis Dampak Gelombang *Equatorial Rossby* terhadap Kejadian Cuaca Ekstrem di Wilayah Indonesia

The Impact of Equatorial Rossby Waves on Extreme Weather Events Across Indonesia

Agung Perdian Sulistio[1], Sayful Amri[2]*, Giarno[3], Yahya Darmawan[4]
[1,2,3,4]Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia
***Corresponding author:** Sayful Amri, sayful.amri@stmkg.ac.id

ABSTRAK

Gelombang *Equatorial Rossby* (ER) merupakan gelombang ekuatorial yang memiliki struktur *gyre* atau *twin vortices* di belahan bumi utara (BBU) dan belahan bumi Selatan (BBS) saat melintas di wilayah ekuator. *Twin vortices* tersebut mampu memengaruhi pergerakan massa udara dan memodulasi terbentuknya cuaca ekstrem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pola klimatologis dinamika atmosfer pada hari aktif gelombang ER di musim hujan (Desember, Januari, Februari) dan menganalisis wilayah yang berpotensi mengalami peningkatan kejadian cuaca ekstrem pada periode kajian. Data yang digunakan yakni data reanalisis ERA5 meliputi *geopotential*, angin u dan v, dan kelembapan spesifik(q), anomali *outgoing longwave radiation* (OLR) CPC NOAA, dan curah hujan PERSIANN-CDR. Pengolahan data dilakukan dengan metode filter S*pace Time Spectral Analysis* (STSA), *Empirical Orthogonal Function* (EOF) dan analisis komposit hari aktif ER (indeks fase ER). Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas gelombang ER mengakibatkan ketidakstabilan atmosfer sehingga memicu terbentuknya awan konvektif dan meningkatkan probabilitas kejadian hujan ekstrem. Pada fase aktif, pusaran siklonik memicu konvergensi masif dan memodulasi pembentukan awan konvektif pada fase 7, 8, 1 dan 2 di sebagian besar wilayah Indonesia. Sebaliknya, pada fase 3, 4, 5 dan 6, pusaran antisiklonik mendukung terjadinya supresi konvektif yang menyebabkan divergensi dan menekan terbentuknya awan konvektif di wilayah Indonesia bagian timur dan tengah. Meskipun demikian, wilayah barat Indonesia tetap mengalami anomali konvergensi, akibat pengaruh topografi dan aliran massa udara dari Samudera Hindia. Informasi wilayah yang berpotensi terjadi hujan ekstrem dapat digunakan dalam upaya mitigasi dan peringatan dini cuaca ekstrem saat gelombang ER terpantau aktif. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya dibutuhkan analisis lebih lanjut mengenai superposisi gelombang ER dengan sistem monsun maupun anomali iklim global lainnya.
Kata kunci: Gelombang *Equatorial Rossby*, dinamika atmosfer, musim hujan, probabilitas hujan ekstrem, Indonesia

ABSTRACT

Equatorial Rossby (ER) waves are equatorial waves characterized by a gyre structure or twin vortices in the Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH) as they propagate across the equatorial region. These twin vortices alter air mass movement and modulate the occurrence of extreme weather events. This study aims to analyze the climatological patterns of atmospheric dynamics during active ER wave days in the rainy season (December, January, February) and to identify regions with an increased potential for extreme weather events during the study period. The datasets utilized include ERA5 reanalysis data (geopotential, u and v wind components, and specific humidity [q]), CPC NOAA Outgoing Longwave Radiation (OLR) anomalies, and PERSIANN-CDR precipitation data. Data processing was conducted using Space-Time Spectral Analysis (STSA) filtering, Empirical Orthogonal Function (EOF), and composite analysis based on active ER wave days (ER phase index). The results demonstrate that ER wave activity induces atmospheric instability, thereby triggering convective cloud formation and increasing the probability of extreme rainfall events. During the active phases (Phases 7, 8, 1, and 2), cyclonic vortices induce massive convergence and modulate convective cloud development across most parts of Indonesia. Conversely, during Phases 3, 4, 5, and 6, anticyclonic vortices favor convective suppression, causing divergence and inhibiting convective cloud formation in eastern and central Indonesia. Nevertheless, western Indonesia continues to experience anomalous convergence due to topographic influences and air mass transport from the Indian Ocean. Information regarding regions vulnerable to extreme rainfall can be utilized to support mitigation strategies and early warning systems for extreme weather when ER waves are active. Therefore, future research requires further analysis of the superposition of ER waves with monsoon systems and other global climate anomalies.
Keywords: *Equatorial Rossby Waves, atmospheric dynamics, rainy season, probability of extreme rainfall, Indonesia*

ARTICLE IDENTIFIERS

ORIGINAL ARTICLE
Volume Vol. 9 No. 10, 2026
Pages 4868-4881
DOI: 10.56338/jks.v9i10.12039

ARTICLE HISTORY

Received: 13 August 2026
Revised: 25 September 2026
Accepted: 02 October 2026

CC BY-SA 4.0

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang setiap tahunnya mengalami kejadian cuaca ekstrem hingga mengakibatkan berbagai bencana hidrometeorologi seperti banjir bandang, tanah longsor dan kekeringan ekstrem (Argüeso et al., 2020; Yamamoto et al., 2021). Kondisi tersebut disebabkan oleh superposisi berbagai fenomena iklim yang utamanya dipengaruhi oleh sistem monsun yang kemudian berinteraksi dengan fenomena skala global, intraseasonal bahkan lokal. Interaksi tersebut dapat memengaruhi distribusi massa udara lembap dan aktivitas konveksi di wilayah Indonesia (Amri & Giarno, 2024; Peatman et al., 2014; Slingo, 2003). Salah satu fenomena yang memodulasi aktivitas konvektif di wilayah Indonesia yakni gelombang ekuatorial. Gelombang ekuatorial atau *Convectively Coupled Equatorial Waves* (CCEWs) merupakan fenomena iklim skala intraseasonal yang mampu mengakibatkan gangguan pada skala sinoptik dan memodulasi terbentuknya sistem konvektif masif, khususnya di wilayah maritim tropis (Horinouchi, 2013; Pramuwardani et al., 2020). Gelombang ini sering berasosiasi dengan sistem konveksi skala global seperti ENSO dan IOD yang berpengaruh terhadap variabilitas curah hujan di berbagai wilayah di Indonesia baik di musim hujan maupun musim kemarau (Aslam, 2025; Hanifa & Wiratmo, 2024; Moron et al., 2015; Sakaeda et al., 2020; Saufina et al., 2025).

Gelombang *Equatorial Rossby* (ER) merupakan salah satu gelombang ekuatorial yang mampu memengaruhi pergerakan massa udara dan memodulasi terbentuknya cuaca ekstrem di wilayah Indonesia. Gelombang ini memiliki mode meridional n = 1 yang menandakan gelombang berada simetris secara teoritis di sepanjang garis ekuator (Kiladis et al., 2009; Matsuno, 1966; Wheeler & Kiladis, 1999). Karakteristik utama gelombang ER yakni berbentuk *twin vortices* di utara dan selatan ekuator yang umumnya berpropagasi ke arah barat, namun dapat terdispersi ke arah timur akibat pengaruh angin latar belakang. Gelombang ini sistematis berlawanan dengan gelombang *Madden Julian Oscillation* (MJO). Fenomena konvektif MJO bergerak kontinu ke arah timur sedangkan gelombang ER bergerak ke arah sebaliknya. Aktivitas gelombang ER melalui vorteks siklonik dan antisikloniknya, dapat menyebabkan gangguan pada aliran monsun sehingga transpor massa udara lembap berkumpul di area vorteks dan membentuk zona konvergensi yang mendukung peningkatan atau penurunan aktivitas konvektif di wilayah yang dilewatinya (Latos et al., 2026; Lubis & Jacobi, 2015).

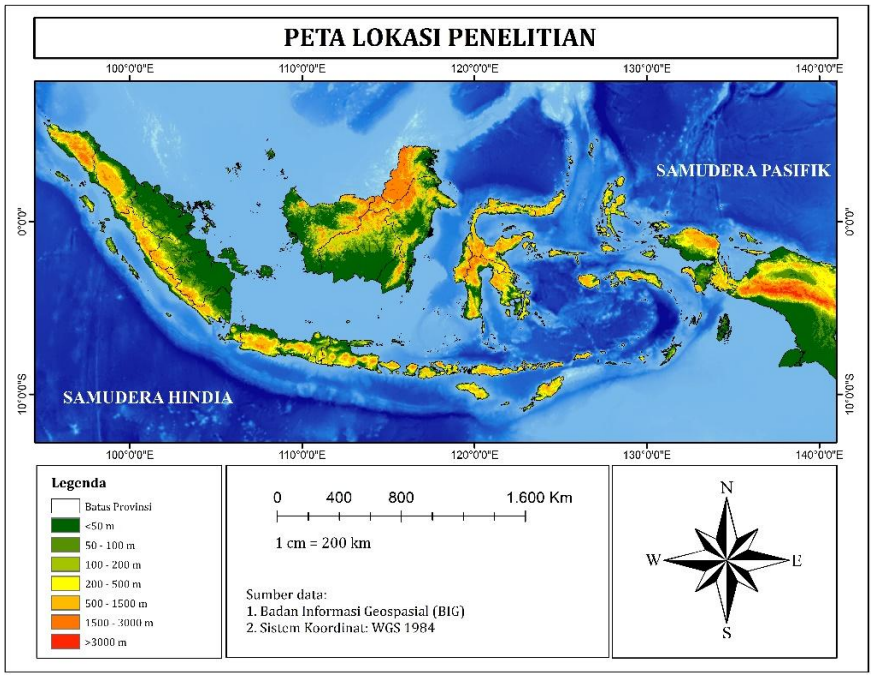
Salah satu bencana hidrometeorologi yang terjadi akibat aktivitas gelombang ER yakni kejadian banjir bandang di Bali pada tanggal 9-10 September 2025. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Provinsi Bali menyebutkan bahwa hingga tanggal 13 September diketahui sebanyak 356 titik kejadian banjir dan terdata sebanyak 17 korban jiwa akibat dari bencana tersebut (BPBD, 2025). Berdasarkan kronologi, fenomena tersebut terjadi akibat hujan dengan intensitas sedang hingga lebat pada Selasa, 9 September 2025 waktu dini hari. Informasi tersebut menunjukkan lokasi awal kejadian berada di kabupaten Tabanan kemudian meluas hingga Denpasar, Badung, Gianyar, Jembrana, Klungkung, Bangli dan Karangasem. Penelitian oleh Tsai et al. (2020) menjelaskan bahwa pada periode musim hujan (Desember, Januari dan Februari), gelombang ER menunjukkan modulasi curah hujan ekstrem di wilayah *South China Sea–Maritime Continent* (SCS-MC). Pada penelitian lainnya, ER diketahui meningkatkan probabilitas hujan ekstrem mencapai 44% hingga 80% di wilayah Jawa, Sumatera dan Sulawesi (Al Zibrah & Sagita, 2023; Latos et al., 2021; Lubis & Respati, 2021; Respati et al., 2022). Berdasarkan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dinamika atmosfer secara klimatologis di seluruh wilayah Indonesia untuk mengetahui pola propagasi gelombang ER saat terpantau aktif, di musim hujan dan mengidentifikasi wilayah yang terdampak akibat aktivitas gelombang ER.

METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah wilayah Indonesia pada koordinat 15˚LU-15˚LS dan 95˚BT - 141˚BT (Gambar 1). Adapun koordinat lokasi penelitian untuk memfilter dan mengidentifikasi fase propagasi gelombang *Equatorial Rossby* (ER), yakni berdasarkan pada penelitian Kiladis dkk. (2009) dan Roundy (2023) dengan koordinat 15˚LU-15˚LS dan 0˚-360˚BT.

CC BY-SA 4.0



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini yakni pada periode 1996 – 2025 dengan rincian sebagai berikut:
Data reanalysis Copernicus ERA-5 pressure level 850 mb dan 200 mb untuk kecepatan angin zonal dan meridional (u, v), kelembapan spesifik (q) serta geopotential height (z) dengan resolusi spasial 0,25˚x 0,25˚ dan resolusi harian. Data u, v dan q digunakan untuk menganalisis terkait transpor kelembapan dan divergensi secara spasial saat ER aktif. Adapun data z digunakan untuk menganalisis terkait struktur vertikal baroklinik gelombang ER. Data tersebut dapat diunduh pada tautan berikut:
https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview
Data CPC *Blended Outgoing Longwave Radiation* (OLR) NOAA dengan resolusi spasial sebesar 1˚x 1˚ dan resolusi temporal harian. Data OLR digunakan untuk menganalisis aktivitas konvektif saat gelombang Equatorial Rossby (ER) aktif. Data tersebut dapat diunduh pada tautan berikut:
https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single levels?tab=overview
Data curah hujan *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network – Climate Data Record* (PERSIANN – CDR) dengan resolusi spasial 0,25˚x0,25˚ dan resolusi temporal harian. Data tersebut digunakan untuk menganalisis anomali curah hujan saat ER aktif. Data tersebut dapat diunduh pada tautan berikut:
https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/precipitation-persiann

Alat Pengolahan Data

Alat yang digunakan untuk membantu pengolahan dan visualisasi data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Perangkat lunak *Climate Data Operators* (CDO). Perangkat lunak ini dipilih sebagai alat bantu dalam penelitian, karena mampu mengolah dan menyunting data *reanalysis* dengan sangat cepat, akurat dan efisien.
Aplikasi MATLAB. Aplikasi ini digunakan untuk membantu dalam perhitungan indeks fase gelombang ekuatorial, analisis regresi prototipe fase gelombang serta uji signifikasi data.
Perangkat lunak QGIS. QGIS digunakan untuk pemetaan lokasi penelitian,
Perangkat lunak Notepad++. Dalam penelitian ini, Notepad++ digunakan untuk menyunting skrip yang dijalankan pada terminal menggunakan CDO, GrADS atau skrip MATLAB
Perangkat lunak Microsoft Excel. Pada penelitian ini digunakan untuk filtering hari aktif gelombang ER

CC BY-SA 4.0

Metode

Metode penelitian yang digunakan yakni metode analisis deskriptif kuantitatif terhadap dinamika atmosfer pada hari aktif gelombang ER di musim hujan dan musim kemarau. Identifikasi hari aktif gelombang ER dilakukan dengan *filtering* data anomali *outgoing longwave radiation* (OLR) menggunakan *Space Time Spectral Analysis* (STSA) berdasarkan *zonal wavenumber* gelombang Equatorial Rossby (ER) yakni -1 hingga -10 dengan periode 9,7 hingga 72 hari sesuai dengan penelitian Kiladis dkk. (2009) dan pembuatan indeks fase dari data AOLR Filtered ER berbasis menggunakan *Empirical Orthogonal Function* (EOF) yang berisi nilai *principal component* (PC) 1 dan 2 dan amplitudo gelombang. Gelombang ER dinyatakan aktif jika nilai amplitudo ER > 1. Tinjauan dinamika atmosfer yang dianalisis meliputi anomali *geopotential height*, anomali *vertical integrated moisture flux divergence* (VIMFD), anomali OLR, anomali curah hujan dan probabilitas curah hujan ekstrem. Analisis *geopotential height* pada penelitian ini digunakan untuk mendeteksi aktivitas konvektif di lapisan bawah melalui kondisi fisis baroklinik yang terlihat di lapisan atas (200 mb) dengan rumus sebagai berikut (Salby, 2012).

$$Z = \frac{\Phi}{g_0}$$

$$Z' = Z - Z_{klim}$$

Keterangan:

Z = *Geopotential height* (m)
Z' = Anomali *geopotential height* (m)
Z_{klim} = Rata-rata *geopotential height* klimatologis (m)
Φ = *Geopotential* (m^2/m^2)
g_0 = percepatan gravitasi (9,8 m/s^2)

Analisis anomali VIMFD dilakukan untuk mengetahui pengaruh aktivitas gelombang ER terhadap distribusi massa udara dan mengetahui secara spasial wilayah mana yang mengalami divergensi akibat aktivitas gelombang ER pada setiap fase propagasinya (Holton, 2004; Lélé et al., 2015). Analisis tersebut dirumuskan pada persamaan di bawah ini.

$$Q = \frac{1}{g}\int_{pt}^{ps} qV\, dp$$

$$\nabla_H \overrightarrow{qv} = \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y}$$

$$\nabla_H \overrightarrow{qv}' = \nabla_H \overrightarrow{qv} - \nabla_H \overrightarrow{qv}\, klim$$

Keterangan:

Q = transport uap air (kg/m/s)
g = percepatan gravitasi (m/s^2)
ps = Tekanan permukaan (1000 hPa)
pt = Tekanan pada ketinggian 825 hPa
q = kelembapan spesifik (g/kg)
V = vektor angin zonal dan meridional (m/s)
dp = perubahan tekanan (hPa)
$\nabla_H \overrightarrow{qv}'$ = anomali divergensi transpor kelembapan ($kgm^{-2}s^{-1}$)
$\nabla_H \overrightarrow{qv}$ = divergensi transpor kelembapan ($kgm^{-2}s^{-1}$)
qu = komponen transpor zonal (m/s)
qv = komponen transpor meridional (m/s)

Analisis probabilitas kejadian hujan ekstrem digunakan untuk mengetahui wilayah yang berpotensi mengalami peningkatan hujan ekstrem saat terjadi *coupling* konvektif akibat pengaruh dari gelombang ER pada setiap fase propagasinya (Ren & Ren, 2017). Analisis tersebut dirumuskan pada persamaan dibawah ini.

$$\Delta P_n = \frac{P_n(x \geq X_c) - P_{all}(x \geq X_c)}{P_{all}(X \geq X_c)}$$

CC BY-SA 4.0

Keterangan:
ΔP_n = probabilitas kejadian hujan ekstrem (%)
P_n = probabilitas kumulatif curah hujan
x_c = threshold ekstrem pada setiap grid (persentil ke-90)
X = curah hujan (mm)
P_{all} = probabilitas kejadian hujan ekstrem per hari.

Parameter anomali OLR dan anomali curah hujan diperoleh dengan mengurangkan data aktual dengan data klimatologisnya (30 tahun). Seluruh hasil perhitungan setiap parameter, dikompositkan secara spasial berdasarkan hari aktif gelombang ER (Amplitudo >1) untuk mengetahui pola propagasi gelombang ER secara klimatologis dan menganalisis wilayah dampak akibat aktivitas gelombang tersebut melalui analisis dinamika atmosfer pada musim hujan di wilayah Indonesia. Parameter anomali VIMFD, anomali OLR, anomali curah hujan dan probabilitas hujan ekstem dilakukan uji signifikansi Monte Carlo-Bootstrap dengan n = 1000 dan α = 95% untuk mengetahui wilayah yang signifikan mengalami peningkatan dan penurunan aktivitas konvektif secara statistik (Efron & Tibshirani, 1993).

HASIL

Identifikasi Hari Aktif Gelombang Equatorial Rossby (ER)

Berdasarkan hasil *filtering* gelombang ER menggunakan *Space Time Spectral Analysis* (STSA) dan *Empirical Orthogonal Function* (EOF). Pada periode 1996 hingga 2025 diketahui sebanyak 6.529 hari aktif gelombang ER dengan 1.972 hari aktif pada periode musim hujan yakni Desember, Januari dan Februari (DJF) yang tertera pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Total Hari Aktif Gelombang Equatorial Rossby Periode 1996 – 2025

No.	Fase	Total Hari Aktif	DJF
1	Fase 1	829 hari	264 hari
2	Fase 2	810 hari	228 hari
3	Fase 3	835 hari	241 hari
4	Fase 4	836 hari	254 hari
5	Fase 5	822 hari	254 hari
6	Fase 6	802 hari	235 hari
7	Fase 7	802 hari	232 hari
8	Fase 8	829 hari	264 hari
Total		**6.529 hari**	**1.972 hari**

Analisis Dinamika Atmosfer

Analisis parameter dinamika attmosfer meliputi anomali *geopotential height*, anomali *vertical integrated moisture flux divergence* (VIMFD), anomali OLR, anomali curah hujan dan probabilitas curah hujan ekstrem.

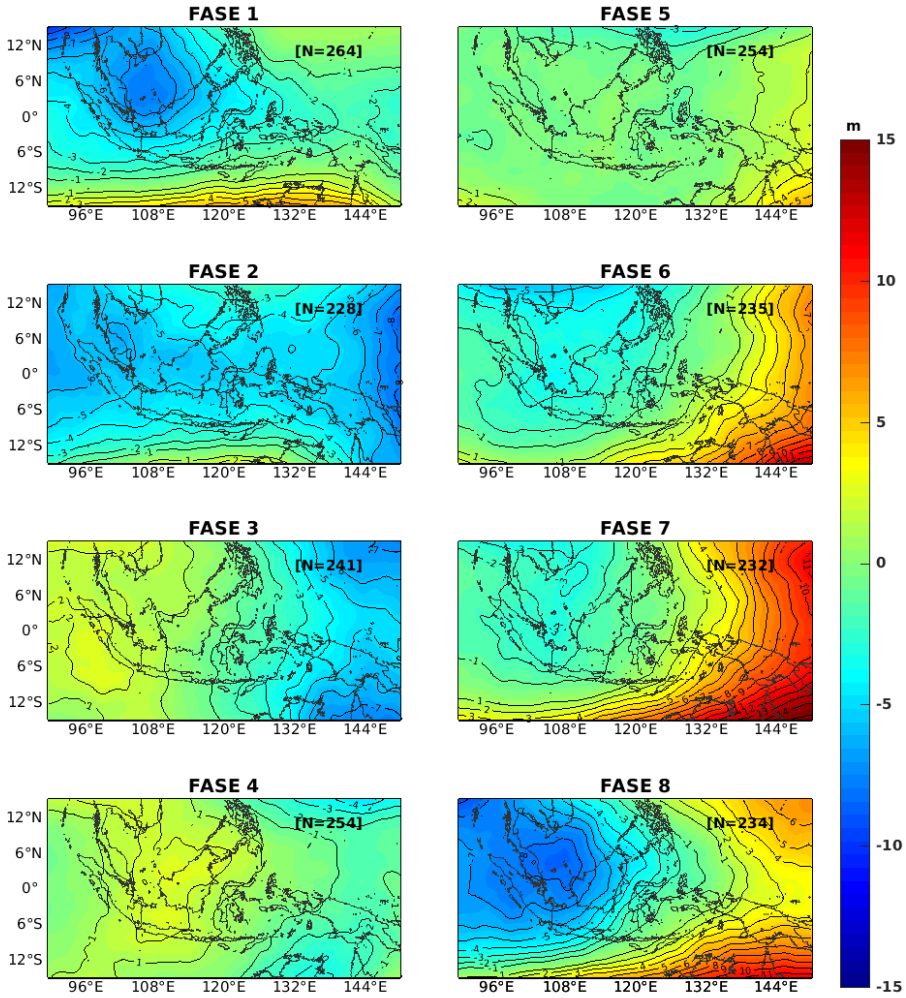
Anomali Geopotential Height (200 mb)

Hasil analisis spasial anomali *geopotential height* pada lapisan 200 mb di musim hujan (DJF) memperlihatkan adanya aktivitas konvektif di lapisan atmosfer bawah dari arah timur yang bergerak ke barat dengan amplitudo berkisar antara -15 hingga 15 gpm (Gambar 2). Anomali positif menandakan terjadinya peningkatan ketebalan lapisan atmosfer (*deep convective*) sedangkan anomali negatif menandakan kondisi sebaliknya (*supress convective*). Peningkatan ketebalan lapisan atmosfer di wilayah Indonesia bagian timur terpantau pada fase 6, yang ditandai dengan kemunculan anomali positif di wilayah Papua dengan nilai 1 gpm hingga 12 gpm. Memasuki fase 7 dan 8, anomali positif tersebut berpropagasi ke barat dan mengalami penguatan hingga

CC BY-SA 4.0

mencapai 15 gpm, mendominasi seluruh wilayah Papua dan Kepulauan Maluku. Pada fase yang sama, anomali negatif mulai terbentuk di Laut Cina Selatan (LCS) dan meluas ke Kalimantan, Jawa, serta Sumatera dengan nilai mencapai -8 gpm

Seiring dengan penjalaran gelombang ke arah barat pada fase 1 dan 2, wilayah Indonesia mulai didominasi oleh pergerakan anomali negatif, dengan pusat nilai mencapai -7 gpm di wilayah LCS dan Kalimantan. Penurunan berlanjut hingga fase 3 dan 4, di mana anomali positif yang relatif lemah yakni 1 hingga 3 gpm mulai muncul di wilayah Indonesia bagian barat. Memasuki fase 5, anomali positif terlihat terbentuk kembali di wilayah Samudera Pasifik Barat yang menjadi tanda dimulainya siklus berikutnya. Secara spasial, kondisi tersebut dapat disebabkan oleh superposisi berbagai fenomena iklim pada hari aktif gelombang ER. Oleh karena itu, untuk mengonfirmasi keberadaan struktur twin vortices gelombang ER pada setiap fase, dilakukan analisis *vertical integrated moisture flux divergence* untuk melihat transport massa udara dan divergensi yang disebabkan oleh gelombang ER.



Gambar 2. Anomali *geopotential height* (200 mb)

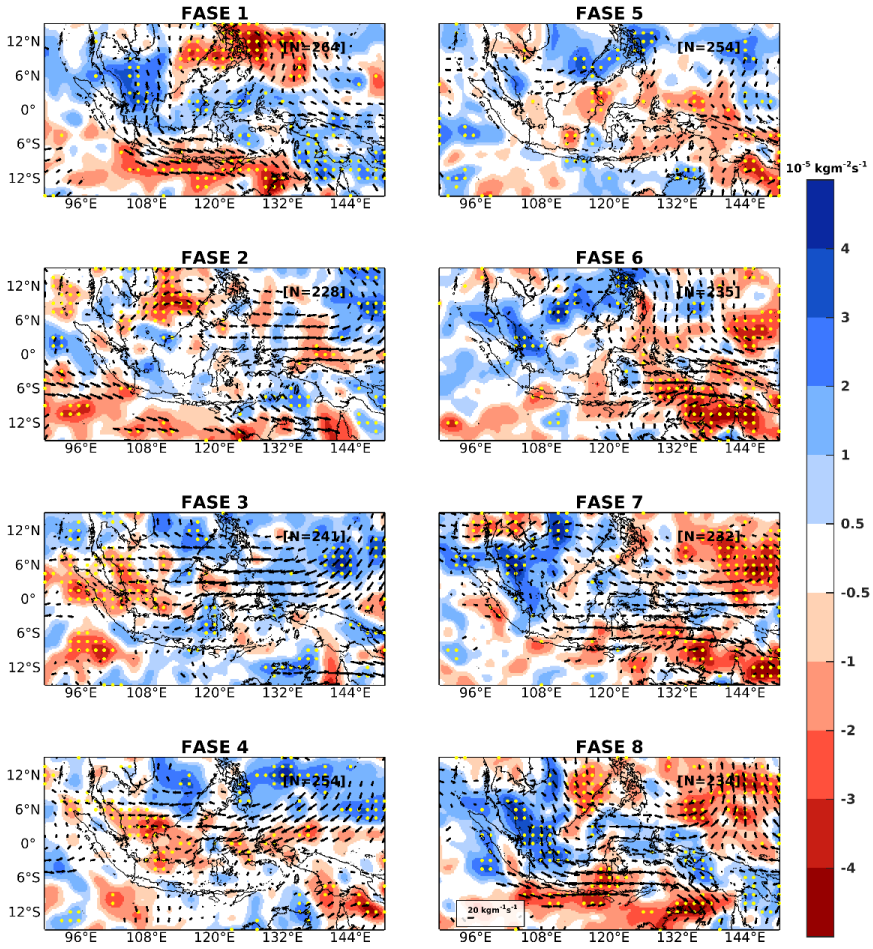
Anomali *Vertical Integrated Moisture Flux Divergence* (VIMFD)

Berdasarkan analisis *vertical integrated moisture flux divergence* (VIMFD) yang tertera pada Gambar 3, struktur *twin vortices* gelombang ER terlihat melalui transpor massa udara lembap (vektor panah). Aliran yang berbentuk pusaran siklonik membentuk zona konvergensi (*shading* merah) yang dapat memicu terbentuknya awan konvektif. Sebaliknya, aliran antisiklonik yang membentuk zona divergensi (*shading* biru) menurunkan potensi terbentuknya awan. Pada fase 6, anomali VIMFD terlihat membentuk *twin vortices* di utara dan selatan Papua (Laut Arafura). Aliran vorteks terlihat membawa massa udara lembap dan memicu terbentuknya zona

CC BY-SA 4.0

konvergensi dengan nilai berkisar antara -1 hingga -4 x 10 $kgm^{-2}s^{-1}$. Memasuki fase 7 dan 8, vorteks tersebut bergeser ke barat mencapai perairan timur Filipina dan perairan utara Australia. Pergeseran ini memperluas zona konvergensi ke wilayah Laut Banda, Nusa Tenggara, Bali, perairan selatan Jawa, dan sebagian Sulawesi bagian selatan. Sebaliknya, wilayah Indonesia bagian barat mulai didominasi oleh zona divergensi yang terpusat di Selat Karimata (1 hingga 4×10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}).

Selanjutnya, pada fase 1 dan 2, pusaran siklonik bergerak mencapai wilayah Filipina dan perairan selatan Jawa. Kondisi ini mempertahankan zona konvergensi di wilayah barat hingga Samudera Hindia Timur, sementara pusaran antisiklonik mulai memasuki wilayah Indonesia timur dan memicu zona divergensi (1 hingga 3×10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}). Pada fase 3 dan 4, pusaran antisiklonik berada tepat di atas wilayah utara dan selatan Indonesia, memicu divergensi masif di Papua, Kepulauan Maluku, Sulawesi, hingga Bali. Di sisi lain, wilayah Sumatera tetap mengalami konvergensi lokal akibat transpor massa udara dari Samudera Pasifik Barat. Memasuki fase 5, aktivitas siklonik kembali terbentuk di timur Papua Nugini dan Laut Arafura, menandakan dimulainya siklus konvergensi selanjutnya di wilayah Indonesia timur.



Gambar 3. Anomali *Vertikal Integrated Moisture Flux Divergence* (VIMFD) (Bootstrap 95%, n = 1000). Area titik merupakan area signifikan.

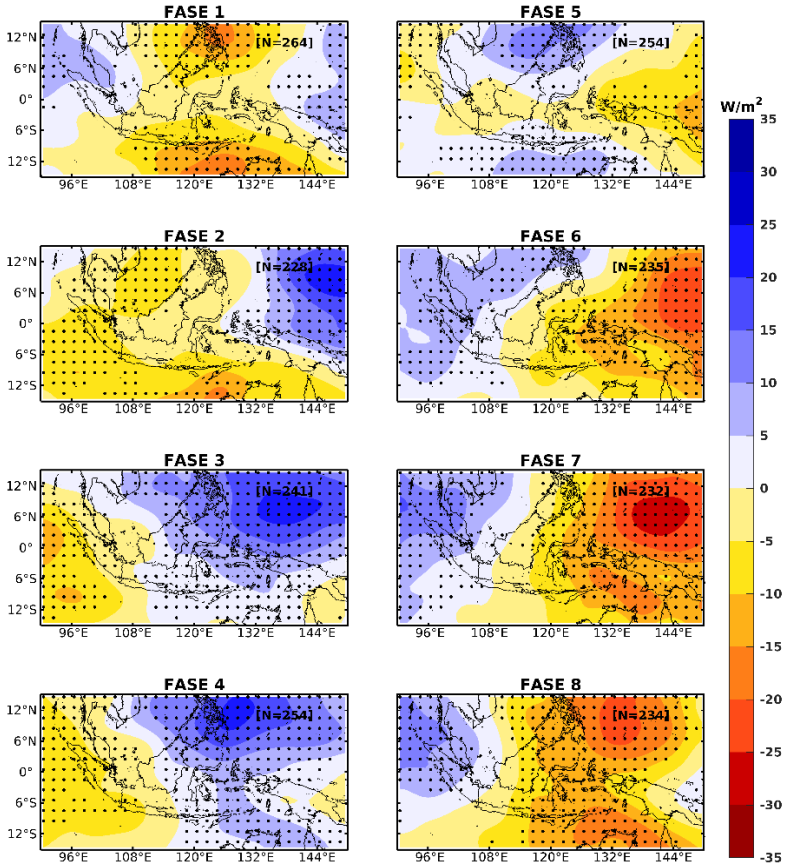
Anomali *Outgoing Longwave Radiation* (OLR)

Berdasarkan hasil analisis spasial anomali vektor angin dan VIMFD pada Gambar 4 sebelumnya, diketahui wilayah yang mengalami konvergensi sesuai secara spasial dengan wilayah konvektif yang dibuktikan pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, diketahui anomali negatif OLR terlihat mendominasi wilayah Indonesia bagian timur pada fase 6, 7 dan 8. Pada fase 6, terlihat anomali negatif OLR terbentuk di utara Papua Nugini dan meluas ke wilayah Indonesia bagian timur meliputi Papua dan Kepulauan Maluku dengan nilai berkisar antara -5 hingga -30 Wm^{-2}. Memasuki fase 7 dan 8, anomali negatif terlihat bergeser ke barat dan mengalami

CC BY-SA 4.0

penguatan dengan pusat konvektif di perairan timur Filipina (utara) dan perairan utara Australia (selatan) dan meluas hingga ke wilayah timur Kalimantan, Sulawesi dan Nusa Tenggara (NTT dan NTB) dengan nilai anomali berkisar -5 hingga -30 Wm^{-2}.

Beralih ke fase 1 dan 2, terlihat anomali negatif kembali bergeser semakin ke barat mencapai wilayah Filipina hingga LCS di utara dan perairan selatan Timor Timur hingga perairan selatan Jawa dan Sumatera (Samudera Hindia) di selatan yang diikuti penurunan intensitas konvektif dengan nilai anomali berkisar antara -5 hingga -15 Wm^{-2}. Pergeseran anomali negatif di wilayah tersebut terlihat diiringi oleh terbentuknya anomali positif OLR di utara Papua dengan nilai anomali berkisar antara 5 hingga 25 Wm^{-2}. Selanjutnya pada fase 3 dan 4, terlihat sebagian besar wilayah Indonesia didominasi oleh anomali positif OLR meliputi wilayah Papua, Kepulauan Maluku, Sulawesi, NTT, NTB, Bali dan wilayah timur Kalimantan. Sementara itu, untuk wilayah barat Kalimantan, Jawa dan Sumatera diselimuti oleh anomali negatif OLR dengan nilai berkisar antara -5 hingga -20 Wm^{-2}. Memasuki fase 5, terlihat wilayah Indonesia bagian tengah hingga barat seluruhnya diselimuti oleh anomali positif OLR yang terpusat di wilayah Filipina dan Laut Banda. Akan tetapi, di wilayah Indonesia bagian timur tepatnya di wilayah utara Papua, mulai terbentuk anomali negatif OLR dengan nilai berkisar antara -5 hingga -10 Wm^{-2}. Dengan demikian, kondisi di wilayah Indonesia bagian barat yang didominasi oleh anomali positif dan terbentuknya anomali negatif OLR di utara Papua,menandakan dimulainya siklus konvektif berikutnya.



Gambar 4. Anomali OLR musim DJF (Bootstrap 95%, n = 1000). Area titik merupakan area signifikan.

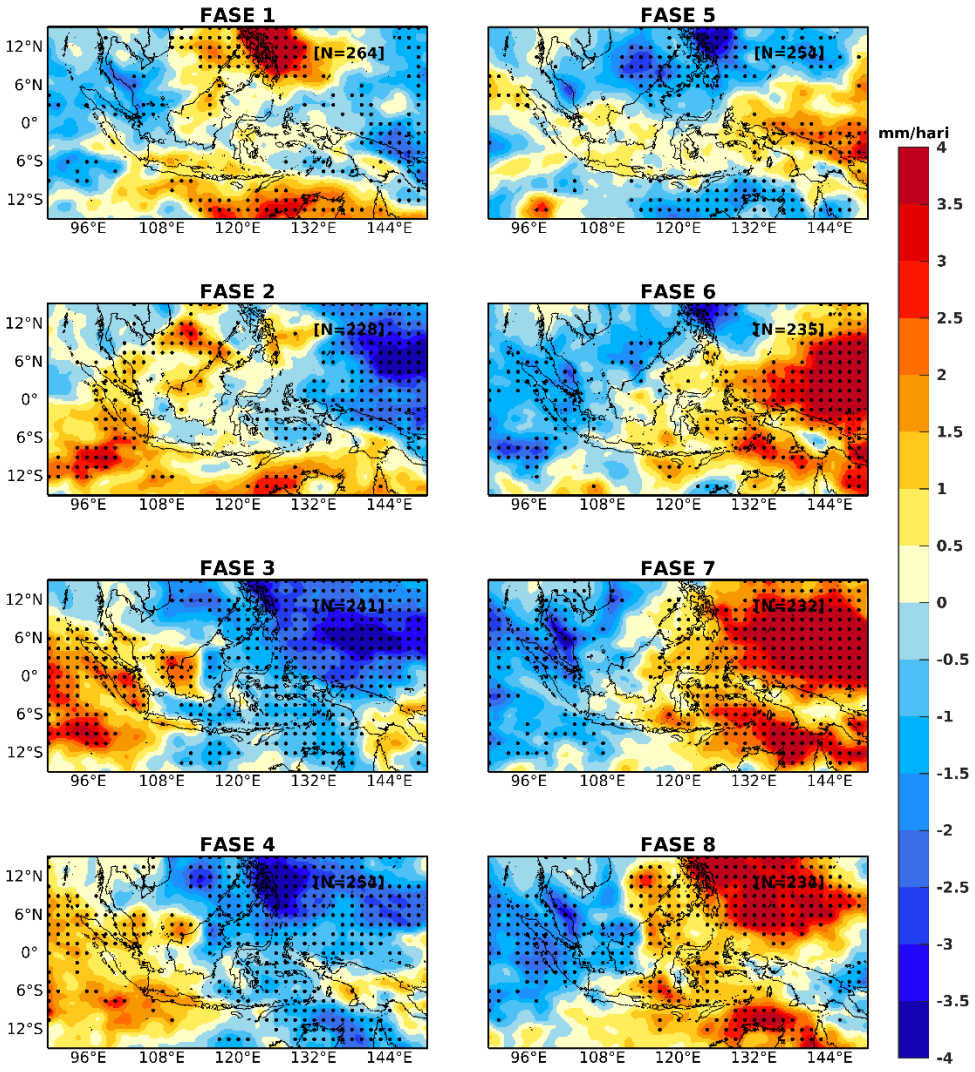
Anomali Curah Hujan

Analisis anomali curah hujan harian dilakukan untuk mengonfirmasi dampak langsung dari aktivitas konvektif yang tertera pada Gambar 5. Secara spasial, pola distribusi anomali curah hujan menunjukkan sesuai dengan pola tutupan awan (OLR) pada setiap fasenya. Anomali positif menunjukkan peningkatan anomali curah hujan harian (*Shading* merah), sedangkan anomali negative menunjukkan penurunan anomali curah hujan (*shading* biru). Pada fase 6 hingga 8, anomali positif secara masif mendominasi wilayah timur hingga tengah Indonesia meliputi Papua, Kepulauan Maluku, Sulawesi, wilayah timur Kalimantan, NTT, NTB dan Bali dengan intensitas

CC BY-SA 4.0

1 hingga 4 mm/hari. Pusat anomali tertinggi (4 mm/hari) terlihat berpropagasi dari perairan utara dan selatan Papua menuju perairan timur Filipina dan utara Australia.

Memasuki fase 1 dan 2, pusat anomali bergeser semakin ke barat memengaruhi wilayah Filipina hingga Laut Cina Selatan dan Samudera Hindia Timur. Pergerakan ini diikuti oleh pelemahan intensitas anomali positif di wilayah daratan (0,5 hingga 2 mm/hari) yang terlihat di Kalimantan bagian utara dan timur dan Sumatera. Kondisi sebaliknya terjadi pada Fase 3 dan 4, di mana anomali negatif mendominasi wilayah timur dan tengah, dengan adanya peningkatan curah hujan lokal di Sumatera dan Jawa (0,5 hingga 3,5 mm/hari). Memasuki fase 5, kondisi *supress convection* (anomali negatif) mendominasi di Filipina dan utara Australia, diikuti dengan anomali positif di utara Papua (0,5 hingga 3 mm/hari).



Gambar 5. Anomali curah hujan harian musim DJF (Bootstrap 95%, n = 1000). Area titik merupakan area signifikan.

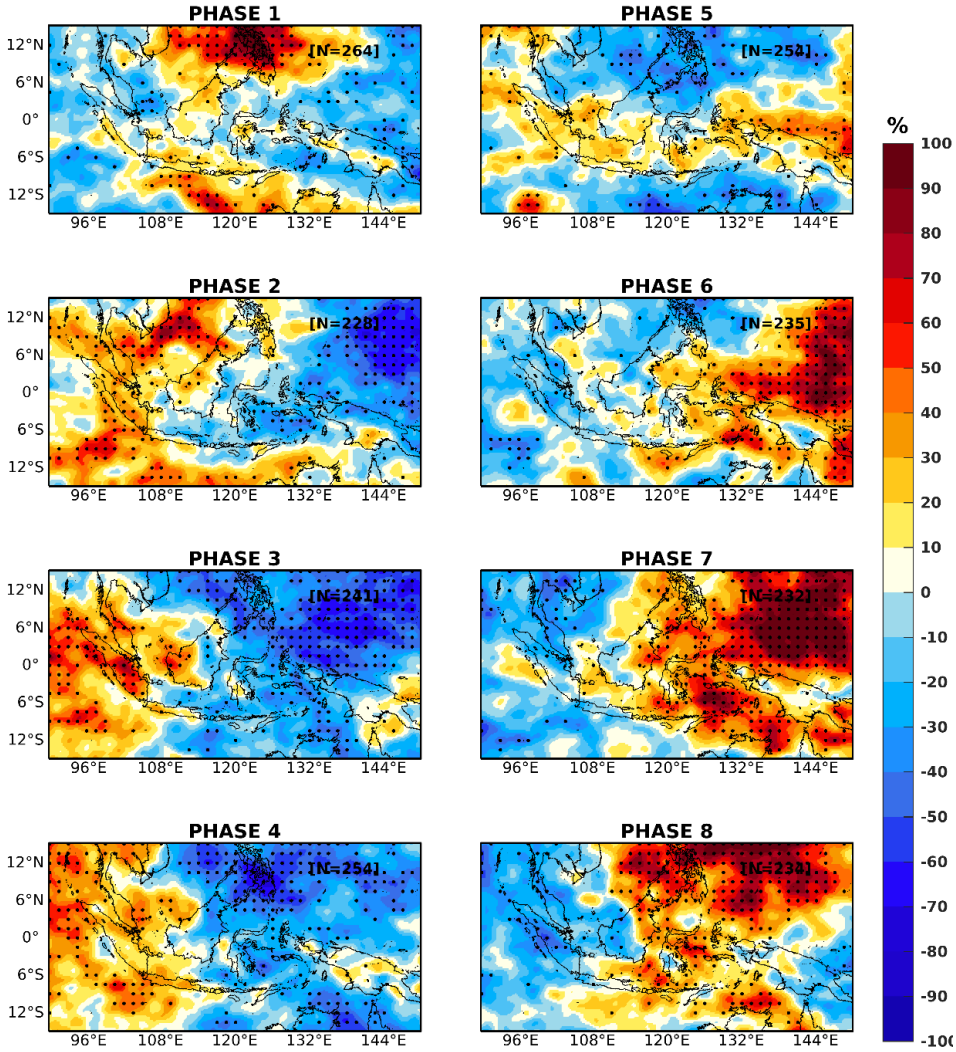
Probabilitas curah hujan ekstrem

Perubahan kondisi atmosfer akibat aktivitas gelombang ER secara dinamis memodulasi probabilitas kejadian hujan ekstrem di wilayah Indonesia (Gambar 6). Pada fase 6, terjadi peningkatan probabilitas hujan ekstrem sebesar 30% hingga 100% di wilayah utara Papua (Samudera Pasifik Barat), Laut Arafura, dan perairan tenggara Papua. Peningkatan probabilitas ini meluas dan berpropagasi ke arah barat pada Fase 7 dan 8,

CC BY-SA 4.0

mencakup wilayah Kepulauan Maluku, Sulawesi, utara Kalimantan, hingga utara Nusa Tenggara dengan intensitas persentase yang serupa.

Memasuki fase 1 dan 2, pengaruh peningkatan probabilitas hujan ekstrem bergeser ke wilayah Sumatera dan Samudera Hindia Timur berkisar 30 hingga 80%, serta mencapai lebih dari 90% di wilayah Filipina dan LCS. Pada fase yang sama, wilayah Indonesia bagian timur dan tengah mulai menunjukkan indikasi penurunan probabilitas hujan ekstrem. Penurunan probabilitas hujan ini meluas ke sebagian besar wilayah timur dan tengah pada Fase 3 dan 4. Sebaliknya di Sumatera, Kalimantan bagian barat, dan Samudera Hindia Timur terjadi peningkatan probabilitas hujan ekstrem mencapai 80% yang kemudian mengalami penurunan. Pada fase 5, sebagian besar wilayah Indonesia mencatat penurunan probabilitas hujan ekstrem, diikuti oleh kemunculan kembali area peningkatan probabilitas yang signifikan di wilayah utara Papua (30% hingga 50%) dan meluas pada siklus propagasi berikutnya.



Gambar 6. Probabilitas curah hujan ekstrem periode DJF persentil ke-90 (Bootstrap 95%, n = 1000). Area titik merupakan area signifikan.

PEMBAHASAN

Pada musim hujan (DJF), interaksi antara gelombang ER dan monsun barat (Asia) membentuk struktur *twin vortices* menjadi salah satu pemicu aktivitas konvektif di wilayah yang dilewatinya (Latos dkk., 2021; Sakaeda dkk., 2020). Berdasarkan hasil analisis, pada fase 7, 8, 1 dan 2, konveksi masif ditandai dengan peningkatan

anomali geopotential height (200 mb) yang terlihat di wilayah Indonesia bagian timur (Gambar 2.) (Roundy, 2023). Peningkatan tersebut merupakan respon terhadap terbentuknya zona konvergensi akibat pertemuan dan penumpukan massa udara di lapisan bawah (VIMFD) (Gambar 3.) (Diong dkk., 2023; Hadi dkk., 2025; Latos dkk., 2026; Lubis dan Respati, 2021). Fenomena yang terjadi menyebabkan *updraft* dan pelepasan panas laten, sehingga menghasilkan pembentukan awan konvektif masif di wilayah utara dan selatan Papua, Kepulauan Maluku, Sulawesi, Nusa Tenggara, Bali, perairan selatan Jawa dan Sumatera (Gambar 4). Awan konvektif yang terbentuk memicu peningkatan anomali curah hujan (Gambar 5.) dan probabilitas hujan ekstrem (Gambar 6) sebesar 30 hingga 100% pada fase tersebut.

Sebaliknya, pada fase 3, 4, 5 dan 6, dominasi vorteks antisiklonik memicu terjadinya divergensi di sebagian besar wilayah Indonesia. Struktur vorteks antisiklonik memicu penurunan massa udara ke permukaan (*downdraft)*. Massa udara yang turun, mengalami pemanasan adiabatik yang menurunkan kelembapan massa udara. Fenomena tersebut menciptakan lapisan udara kering, sehingga menekan terjadinya pertumbuhan awan konvektif (*convective suppression*). Meskipun sebagian besar wilayah Indonesia berada pada kondisi kering, wilayah Sumatera dan Kalimantan bagian barat menunjukkan terjadi konvergensi akibat pengaruh lokal dan aliran massa udara lembap dari Samudera Hindia yang bergerak melewati wilayah Indonesia bagian barat (Respati dkk., 2022; Peatman dkk., 2014).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu. Respati dkk. (2022) mengonfirmasi bahwa aktivitas gelombang ER mampu meningkatkan kejadian hujan ekstrem sebesar 44% di wilayah Jawa. Kondisi serupa dibuktikan oleh Al Zibrah dan Sagita (2023) yang menemukan bahwa ER mampu meningkatkan presipitasi sebesar 80% pada fase basah, dan tetap mempertahankan peningkatan hingga 50% pada fase kering di Sumatera. Demikian pula di wilayah Indonesia bagian tengah, hasil ini mengonfirmasi penelitian Latos dkk. (2021) yang menyatakan bahwa aktivitas gelombang ER berdampak langsung pada peningkatan anomali curah hujan di wilayah Sulawesi

KESIMPULAN DAN IMPLIKASI

Penelitian ini menyimpulkan bahwa aktivitas gelombang *Equatorial Rossby* (ER) pada musim hujan (DJF) merupakan salah satu fenomena yang signifikan memengaruhi dinamika atmosfer dan meningkatkan probabilitas kejadian curah hujan ekstrem di wilayah Indonesia. Pada Fase 7, 8, 1, dan 2, propagasi vorteks siklonik ER memicu zona konvergensi masif di lapisan bawah yang diiringi oleh peningkatan ketebalan atmosfer. Kondisi ini secara dinamis mendorong pergerakan massa udara ke atas (*updraft*) dan memicu pertumbuhan awan konvektif, yang berdampak langsung pada peningkatan anomali curah hujan dan probabilitas kejadian hujan ekstrem sebesar 30% hingga 100%. Wilayah yang terdampak pada fase aktif tersebut, meliputi wilayah Papua, Kepulauan Maluku, Sulawesi, Nusa Tenggara, Bali, hingga perairan selatan Jawa dan Sumatera. Sebaliknya, pada Fase 3, 4, 5, dan 6, wilayah Indonesia mendapatkan pengaruh dari pergerakan vorteks antisiklonik ER yang memicu divergensi, *downdraft*, dan menekan pembentukan awan (*convective suppression*). Fenomena ini secara umum menurunkan potensi curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia, terutama di bagian timur dan tengah. Meskipun demikian, penelitian ini mengonfirmasi adanya anomali spasial di wilayah Indonesia bagian barat, khususnya Sumatera dan pesisir barat Kalimantan, yang tetap mengalami konvergensi dan peningkatan curah hujan. Kondisi di bagian barat ini menegaskan bahwa selain dikendalikan oleh pemicu dinamika skala sinoptik seperti gelombang ER, variabilitas cuaca ekstrem di Indonesia juga dapat dipengaruhi oleh kondisi lokal dan anomali transpor kelembapan dari fenomena lain. Aktivitas konvektif yang terjadi pada hari aktif gelombang ER tidak hanya dipicu oleh gelombang ER, melainkan terdapat pengaruh dari sirkulasi monsun dan berbagai fenomena iklim lainnya baik pada skala global maupun intraseasonal yang saling berasosiasi yang tidak dikaji secara mendalam pada penelitian ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pemahaman terkait pola pergerakan gelombang ER secara klimatologis pada musim hujan di wilayah Indonesia. Selain itu, informasi terkait wilayah dengan probabilitas hujan ekstrem tinggi dapat digunakan dalam upaya mitigasi dan peringatan dini cuaca ekstrem saat gelombang ER terpantau aktif.

CC BY-SA 4.0

DECLARATIONS

Persetujuan Etik: Penelitian ini menggunakan data sekunder/reanalisis parameter dinamika atmosfer, sehingga tidak membutuhkan persetujuan etik.
Pendanaan: Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri dan tidak mendapatkan pendanaan khusus dari lembaga atau instansi manapun.
Kontribusi Penulis: Agung Perdian Sulistio sebagai penulis pertama berkontribusi dalam pengolahan data, analisis hasil serta penulisan penelitian. Sayful Amri sebagai penulis kedua berkontribusi dalam penentuan ide penelitian, memberi arahan metodologi, supervisi analisis dan penulisan naskah. Giarno dan Yahya Darmawan sebagai penulis ketiga dan keempat berkontribusi dalam evaluasi metodologis dan penyempurnaan pembahasan hasil penelitian.
Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Sarjana Terapan Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika atas dukukan akademis yang diberikan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pihak terkait yang berkontribusi dalam proses penelitian dan penulisan naskah penelitian ini.
Pernyataan Penggunaan AI: Penulis menyatakan bahwa tidak ada teknologi AI (Artificial Intelegence) yang digunakan dalam pengolahan data, analisis, maupun penyusunan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Al Zibrah, M. S., & Sagita, N. (2023). *Study of the Impact of Convectively Coupled Equatorial Kelvin and Rossby Waves on Rainfall Extremes in Sulawesi, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1233*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1233/1/012029

Amri, S., & Giarno. (2024). Analisis Dinamika Atmosfer Pada Kejadian Banjir, Tanah Longsor, dan Angin Kencang Di Semarang dan Demak Tanggal 13 Maret 2024. *Jurnal Ilmian BIOSAINTROPIS*, *10*, 78.

Argüeso, D., Romero, R., & Homar, V. (2020). *Precipitation Features of the Maritime Continent in Parameterized and Explicit Convection Models. Journal of Climate*, *33*, 2449–2446. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19

Aslam, A. A. (2025). *Rainfall over the Maritime Continent: key processes, scale interactions and model representation. In Weather* (Vol. 80, Number 6, pp. 176–185). John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/wea.7731

BPBD. (2025). *Info Bencana : Data dan Informasi Kebencanaan Bulanan Teraktual*.

Diong, J. Y., Xavier, P., Woolnough, S. J., & Abdullah, F. A. (2023). *Equatorial Rossby waves on cold surge days and their impact on rainfall. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *149*(754), 2031–2047. https://doi.org/10.1002/qj.4493

Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9780429246593

Hadi, T. W., Abdillah, M. R., Purwadani, N. N., Suwarman, R., Trilaksono, N. J., Fajary, F. R., Maulana, M. T., & Wijaya, D. D. (2025). *Cross-Equatorial Northerly Surges Associated with Extratropical Cold Surges and Tropical Variability over the Maritime Continent. Journal of Climate*, *38*, 2783–2798. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24

Hanifa, R., & Wiratmo, J. (2024). *ENSO and IOD Influence on Extreme Rainfall in Indonesia: Historical and Future Analysis. Agromet*, *38*(2), 78–87. https://doi.org/10.29244/j.agromet.38.2.78-87

Holton, J. R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology Fourth Edition*. https://webspace.science.uu.nl/~delde102/Holton_2004.pdf

Horinouchi, T. (2013). *Modulation of seasonal precipitation over the tropical western/central pacific by convectively coupled mixed rossby-gravity waves. Journal of the Atmospheric Sciences*, *70*(2), 600–606. https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0283.1

Kiladis, G. N., Wheeler, M. C., Haertel, P. T., Straub, K. H., & Roundy, P. E. (2009). *Convectively coupled equatorial waves. Reviews of Geophysics*, *47*(2). https://doi.org/10.1029/2008RG000266

Latos, B., Ferrett, S., Lefort, T., Matthews, A. J., Lubis, S. W., Senior, N. V., Peyrillé, P., Nguyen, H., Wheeler, M. C., Jeong-Yik, D., Baranowski, D. B., Flatau, M. K., Flatau, P. J., Pramuwardani, I., Muhammad, F. R., Permana,

CC BY-SA 4.0

D. S., Ferdiansyah, M. R., Wandala, A., Kiki, … Piskozub, J. (2026). *The Role of Equatorial Waves in Triggering Precipitation Extremes in the Maritime Continent. Monthly Weather Review*, *154*(3), 333–368. https://doi.org/10.1175/MWR-D-25-0073.1

Latos, B., Lefort, T., Flatau, M. K., Flatau, P. J., Permana, D. S., Baranowski, D. B., Paski, J. A. I., Makmur, E., Sulystyo, E., Peyrillé, P., Feng, Z., Matthews, A. J., & Schmidt, J. M. (2021). *Equatorial Waves Triggering Extreme Rainfall and Floods in Southwest Sulawesi, Indonesia. Monthly Weather Review*, *149*(5), 1381–1401. https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0262.1

Lélé, M. I., Leslie, L. M., & Lamb, P. J. (2015). *Analysis of low-level atmospheric moisture transport associated with the West African monsoon. Journal of Climate*, *28*(11), 4414–4430. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00746.1

Lubis, S. W., & Jacobi, C. (2015). *The modulating influence of convectively coupled equatorial waves (CCEWs) on the variability of tropical precipitation. International Journal of Climatology*, *35*(7), 1465–1483. https://doi.org/10.1002/joc.4069

Lubis, S. W., & Respati, M. R. (2021). *Impacts of convectively coupled equatorial waves on rainfall extremes in Java, Indonesia. International Journal of Climatology*, *41*(4), 2418–2440. https://doi.org/10.1002/joc.6967

Matsuno, T. (1966). *Quasi-Geostrophic Motions in the Equatorial Area. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, *44*(1), 25–43. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.44.1_25

Moron, V., Robertson, A. W., Qian, J. H., & Ghil, M. (2015). *Weather types across the Maritime Continent: From the diurnal cycle to interannual variations. Frontiers in Environmental Science*, *2*(JAN). https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00065

Peatman, S. C., Matthews, A. J., & Stevens, D. P. (2014). *Propagation of the Madden-Julian Oscillation through the Maritime Continent and scale interaction with the diurnal cycle of precipitation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *140*(680), 814–825. https://doi.org/10.1002/qj.2161

Pramuwardani, I., Hartono, H., Sunarto, S., & Sopaheluwakan, A. (2020). *The interaction between local factors and the Convectively Coupled Equatorial Waves over Indonesian region during Western North Pacific and Australian monsoon phase. Meteorology Hydrology and Water Management*. https://doi.org/10.26491/mhwm/117576

Ren, H. L., & Ren, P. (2017). *Impact of Madden-Julian oscillation upon winter extreme rainfall in southern China: Observations and predictability in CFVs2*. *Atmosphere*, *8*(10). https://doi.org/10.3390/atmos8100192

Respati, M. R., Lubis, S. W., Setiawan, S., & Hidayat, R. (2022). *Convectively Coupled Equatorial Waves (CCEWs) Triggering Torrential Rainfall Events Over Sumatra, Indonesia. In Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science, 2021* (Vol. 275, pp. 61–82). *Springer Proceedings in Physics*. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0308-3_6

Roundy, P. (2023*). Equatorial Rossby waves and their impacts on monsoon region deep convection*. *MAUSAM*, *74*(2), 267–272. https://doi.org/10.54302/mausam.v74i2.5992

Sakaeda, N., Kiladis, G., & Dias, J. (2020). *The diurnal cycle of rainfall and the convectively coupled equatorial waves over the maritime continent. Journal of Climate*, *33*(8), 3307–3331. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0043.1

Salby, M. L. (2012). *Physics of The Atmosphere and Climate. In Physics of the Atmosphere and Climate. Cambridge University Press.* https://doi.org/10.1017/CBO9781139005265.008

Saufina, E., Trismidianto, Satiadi, D., Harjupa, W., Risyanto, Purwaningsih, A., Fathrio, I., Praja, A. S., Juaeni, I., Witono, A., Rahmatia, F., Pratama, R., Putri, M. S., & Wulandari, P. (2025). *The role of Madden-Julian Oscillation, Westerly Wind Bursts, and Kelvin Waves in triggering extreme rainfall through Mesoscale Convective Systems: A case study of West Sumatra, March 7–8, 2024. Atmospheric Research*, *318*. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.107993

Slingo, J. (2003). *"MOONSOONS | Overview,". Encyclopedia of Atmospheric Science, Elsevier*, 1365–1370.

CC BY-SA 4.0

Tsai, W. Y.-H., Lu, M.-M., Sui, C.-H., & Lin, P.-H. (2020). *MJO and CCEW modulation on South China Sea and Maritime Continent boreal winter subseasonal peak precipitation. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, *31*(2), 177–195. https://doi.org/10.3319/tao.2019.10.28.01

Wheeler, M., & Kiladis, G. N. (1999). *Convectively Coupled Equatorial Waves: Analysis of Clouds and Temperature in the Wavenumber-Frequency Domain*.

Yamamoto, K., Sayama, T., & Apip. (2021). *Impact of climate change on flood inundation in a tropical river basin in Indonesia. Progress in Earth and Planetary Science*, *8*(1). https://doi.org/10.1186/s40645-020-00386-4

CC BY-SA 4.0