

Identifikasi Rossby Atmosfer-Siklon Tropis di Perairan Timur Indonesia

Identification of Rossby Atmosphere-Tropical Cyclone in Eastern Indonesian Waters

Maldiva Hafiza Anjarika Suhendar^{1*}, Erma Yulihastin², Alya Fitri Syalsabilla³, Syifa Alifia Azzahra⁴, Gentur Handoyo¹, Agus Wawan Ridwan², Maulana Dwi Nur Dawami²

¹Program Studi Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional

³Program Studi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya

⁴Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman

*E-mail: maldivahafiza@students.undip.ac.id

ABSTRACT

Recent research has revealed that tropical cyclones can develop over eastern Indonesian waters influenced by marine heatwaves and Rossby waves in the atmosphere. However, there is no study documenting tropical cyclones that occur in conjunction with atmospheric Rossby waves (Rossby Atmospheric-Tropical Cyclones) and their association with increased sea surface temperatures in eastern Indonesian waters. This study aims to document the influence of Rossby waves in the atmosphere on the formation of tropical cyclones around the Indonesian region using 5 case studies in 2017-2022, namely: December 2017, January 2020, December 2020, December 2021, and April 2022. This study uses wind data, sea surface temperature, specific humidity, and temperature (2m) obtained from the European Re-Analysis (ERA5) with a temporal and spatial resolution of one hour and $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. The identification of Rossby waves is based on the Rossby index issued by the North Carolina Institute for Climate Studies (NCICS). In this study, the Rossby Atmosphere-Tropical Cyclone is grouped into three phases, namely: early phase, mature phase, and late phase, using composite and statistical methods to calculate anomalies. The results showed that in the early phase, the existence of Rossby waves was shown by two twin vortices over eastern Indonesia, which was supported by high specific humidity, warming sea surface temperature ($>+0.4^{\circ}\text{C}$), and higher surface temperature ($>+0.3^{\circ}\text{C}$) over Timor. In the mature phase, the twin vortices over eastern waters transformed into a tropical cyclone over the Philippines. In the final phase, specific humidity decreases, sea surface temperature cools ($<-0.3^{\circ}\text{C}$), and surface temperature decreases ($<-0.3^{\circ}\text{C}$). The results also prove the crucial role of Timor waters in forming Rossby waves that can grow into tropical cyclones around Indonesia.

Keywords: Rossby wave, Indonesia, Timor waters, tropical cyclones.

PENDAHULUAN

Perairan Timur Indonesia terletak di wilayah maritim antara benua Asia dan Australia. Perairan ini telah lama menjadi sorotan dalam penelitian ilmiah oseanografi dan meteorologi global. Kompleksitas dan keunikan karakteristik oseanografi dan atmosfer di wilayah ini memberikan kontribusi signifikan terhadap dinamika iklim regional dan global. Arus laut di Perairan Timur berfungsi sebagai penghubung antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia. Arus laut yang membawa panas dan massa air dari satu samudra ke samudra lainnya dapat menciptakan perubahan dalam sirkulasi oseanik global. Selain itu, suhu permukaan laut di Perairan Timur Indonesia juga dapat mempengaruhi variabilitas iklim di berbagai

belahan dunia. Penelitian ini mengindikasikan bahwa fluktuasi suhu permukaan laut di perairan ini dapat memicu fenomena El Niño dan La Niña, yang memiliki efek dominan pada iklim global. Dampak dari adanya perubahan suhu permukaan laut di Perairan Timur ialah pembentukan dan perkembangan siklon tropis, yang berpotensi mempengaruhi pola cuaca ekstrem di wilayah sekitarnya dan lebih jauh (Sprintall *et al.*, 2014).

Indonesia adalah negara yang terkena dampak dari perubahan iklim global. Perubahan iklim ini menyebabkan terjadinya pemanasan global dan menyebabkan terjadinya peningkatan suhu permukaan laut. Fenomena siklon tropis sangat jarang terjadi di wilayah tropis terutama Indonesia, biasanya Indonesia

hanya terkena dampak ekor siklon saja, namun saat ini bibit siklon dapat terjadi dan terbentuk di wilayah Indonesia. Situasi ini menunjukkan bahwa dampak perubahan iklim sangat nyata. Fenomena ini akan berdampak pada aktivitas siklon tropis di wilayah Indonesia dan perlu diwaspadai dampaknya pada kehidupan manusia dan lingkungan.

Salah satu faktor penyebab Siklon tropis ini ialah gelombang Rossby. Gelombang Rossby dapat memainkan peran penting dalam pembentukan, perkembangan, dan pergerakan siklon tropis. Menurut (Betari, 2021), siklon tropis umumnya terbentuk pada perairan hangat dengan suhu lebih dari 26,5°C. Fenomena alam ini penting untuk dipelajari karena kita dapat mempersiapkan diri dan mengambil tindakan yang tepat untuk melindungi diri, keluarga, dan lingkungan sekitar dari dampak yang merugikan. Selain itu, mempelajari siklon tropis dapat membantu kita dalam merencanakan tindakan mitigasi dan adaptasi untuk mengurangi dampak bencana dan merespon perubahan iklim global (Yulihastin *et al.*, 2023).

Menurut (Latos *et al.*, 2023), siklon tropis seroja merupakan salah satu siklon tropis pertama yang menyebabkan dampak signifikan pada daratan Indonesia. Siklon ini terjadi pada April 2021 dekat Pulau Timor dan membawa banjir ke wilayah hampir ekuator Indonesia dan Timor Leste. Sebelumnya, pulau Timor dilanda hujan deras selama 8 hari. Kondisi ini disebabkan oleh siklon tropis Seroja. Curah hujan yang tinggi dan berkelanjutan ini menyebabkan banjir dan tanah longsor. Selain menyebabkan kerusakan yang signifikan di Indonesia dan Timor Leste, Seroja juga berdampak pada wilayah Barat Tengah Australia Barat.

Menurut (Gochakov *et al.*, 2022), gelombang Rossby atmosfer adalah gerakan besar dalam atmosfer yang terjadi di kawasan polar dan subpolar akibat dari perbedaan suhu dan tekanan udara antara daerah hangat dan dingin. Penelitian yang dilakukan (Zaqarashvili *et al.*, 2021), menunjukkan bahwa gelombang Rossby dapat mempengaruhi berbagai fenomena cuaca dan iklim, termasuk pola cuaca ekstrem, perubahan iklim, dan variabilitas atmosfer dan lautan. Dalam astrofisika,

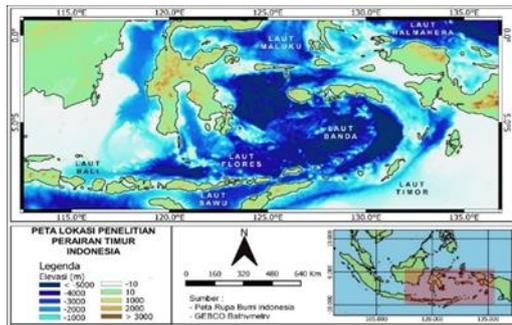
gelombang Rossby dapat mempengaruhi struktur bintang dan planet, termasuk pola angin, medan magnetik, dan getaran bintang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gelombang Rossby dapat mempengaruhi dinamika bintang dan planet, termasuk pola medan magnetik dan aktivitas bintang.

Penelitian mengenai aktivitas gelombang Rossby atmosfer yang berkaitan dengan siklon tropis di Indonesia masih belum ada hingga saat ini. Padahal, dampak yang terjadi adalah hujan yang terus-menerus kemudian berakibat banjir hingga longsor. Menurut penelitian oleh (Lubis & Respati, 2021), adanya fenomena gelombang Rossby dapat mempengaruhi cuaca lokal, khususnya curah hujan ekstrem yang berisiko banjir dan bencana alam lainnya. Gelombang ini memengaruhi pola aliran udara dan kondisi atmosfer yang mendukung pembentukan awan dan hujan intens.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendokumentasikan pengaruh gelombang Rossby di atmosfer terhadap pembentukan siklon tropis di Perairan Timur Indonesia, dengan menggunakan 5 studi kasus pada tahun 2017-2022 yaitu: Desember 2017, Januari 2020, Desember 2020, Desember 2021, dan April 2022. Menurut penelitian, dari tahun 2017-2022 terdapat lebih banyak siklon tropis yang terjadi di wilayah laut timur Indonesia, maka dari itu penelitian ini ingin membuktikan bagaimana pengaruh gelombang Rossby atmosfer terhadap anomali di laut timur Indonesia dari tahun 2017-2022. Fenomena siklon tropis sangat jarang terjadi di Indonesia, biasanya Indonesia hanya terkena dampak dari ekor siklon saja, namun saat ini bibit siklon dapat terjadi dan terbentuk di wilayah Indonesia. Situasi ini menunjukkan bahwa dampak perubahan iklim sangat nyata. Fenomena ini akan berdampak pada aktivitas siklon tropis di wilayah Indonesia dan perlu diwaspadai dampaknya pada kehidupan manusia dan lingkungan.

METODE

Penelitian terdiri dari studi literatur, pengumpulan data sekunder, pengolahan data, dan analisis data. Penelitian ini berlokasi di Perairan Timur Indonesia yang meliputi laut Banda, laut Flores, laut Seram, laut Maluku, laut Halmahera, laut Timor, dan laut Arafura.



Gambar 1. Lokasi Penelitian siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby

Metode pengumpulan data diawali dengan Klasifikasi 3 fase (awal, matang dan akhir) Rossby Atmosfer di Indonesia. Pada penelitian kali ini digunakan metode analisis spasial, analisis komposit dan analisis statistik (anomali). Metode Komposit yang dimaksud adalah menggabungkan 2 jenis data NetCDF atau nc, yaitu komposit (digabung menjadi

fase awal, fase matang dan fase akhir) dan average (digabung menjadi 5 bulan dirata-rata).

Data yang digunakan pada penelitian ini ada 4 variabel diantaranya diagram Hovmöller, data nc (NetCDF) kelembapan spesifik & angin, suhu permukaan laut, dan suhu (2m). Suhu (2m) merupakan suhu udara pada ketinggian 2m di atas permukaan tanah, laut, atau perairan pedalaman. Perangkat lunak yang digunakan untuk proses pengolahan dan analisis data ini adalah NCICS, ERA 5 Single Level Daily, ERA 5 Pressure Level Daily, Python dan GrADS. Kemudian, pengumpulan data suhu permukaan laut dan suhu (2m) diawali dengan pengunduhan data nc diunduh melalui European Re-Analysis (ERA5) hourly data on single levels. Sedangkan untuk pengumpulan data angin & kelembapan spesifik diunduh melalui ERA 5 Pressure Level Daily.

Data nc yang diunduh adalah per tiap bulan kejadian Rossby atmosfer dan di tanggal yang terjadi fase awal, matang, dan akhir.

Tabel 1. Data dan Metodologi

No.	Tahap Pengerjaan	Metode	Sumber Data	Output
1.	Sampel Data	Analisis spasial	NCICS	5 sampel siklon
2.	Klasifikasi 3 fase (komposit)	Analisis komposit	Copernicus: ERA 5 Single Level Daily: SPL & Suhu (2m) ERA 5 Pressure Level Daily: Angin & kelembapan spesifik	Peta komposit 3 fase
3.	Klasifikasi 3 fase (anomali)	Analisis statistik	Copernicus: ERA 5 Single Level Daily: SPL & Suhu (2m) ERA 5 Pressure Level Daily: Angin & kelembapan spesifik	Peta anomali 3 fase

Sampel siklon yang dipengaruhi oleh gelombang Rossby didapatkan melalui laman web *North Carolina Institute for Climate Studies* (NCICS) melalui diagram Hovmöller variabel *Outgoing Longwave Radiation*, potensi kecepatan 850 hPa rata-rata antara 5° S - 5° N. Kemudian, sampel siklon yang didapatkan melalui diagram Hovmöller ini ditempatkan didalam satu tabel yang berjudul 'kriteria fase siklon' agar mudah untuk dipahami. Setelah itu, dilakukan analisis komposit yang dapat digunakan untuk menentukan beberapa karakteristik struktural penting dari fenomena meteorologi atau klimatologi yang sulit untuk diamati secara keseluruhan, atau fenomena yang terjadi dari waktu ke waktu (seperti cuaca atau iklim di wilayah geografis tertentu). Kemudian semua data nc ini diolah menggunakan GrADS menjadi peta komposit 3 fase: pra, matang dan pasca dengan 7 variabel berbeda.

Data nc yang diunduh per bulan dan tahun kejadian digabungkan menjadi satu melalui perangkat lunak python dan diolah menjadi peta average per-bulan. Untuk mengetahui anomali di antara ketiga fase siklon, didapatkan rumus:

$$Anomali = Komposit - Average$$

Keterangan:

- Anomali : Nilai deviasi dari keadaan normal atau rata-rata
- Komposit : data nc 3 fase (pra, matang dan pasca)
- Average : data nc 5 bulan full yang digabung menjadi satu

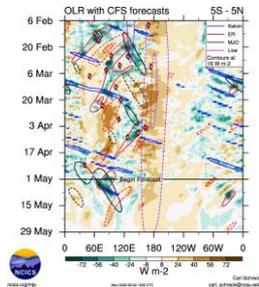
Contoh:

- Anomali Fase Awal Suhu Permukaan Laut (SPL) = Komposit Fase Awal SPL - Average (gabungan data nc SPL 5 bulan)
- Anomali Fase Matang Angin & Kelembapan Spesifik = Komposit Fase Matang Angin & Kelembapan Spesifik - Average (gabungan data nc Angin & Kelembapan Spesifik 5 bulan)

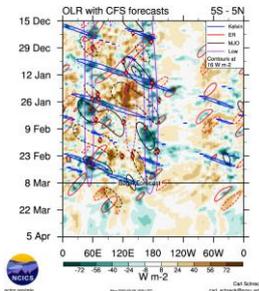
Rumus ini kemudian dimasukkan ke dalam script yang akan diolah di GrADS menjadi peta anomali untuk melihat pola perubahan ke-7 variabel dari 3 fase siklon (pra, matang dan pasca). Setelah itu setiap variabel di analisis melalui peta anomalinnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

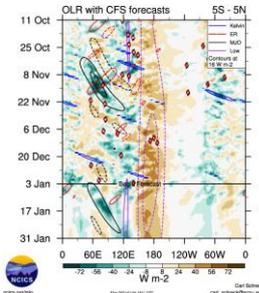
A. Metode Analisis Spasial



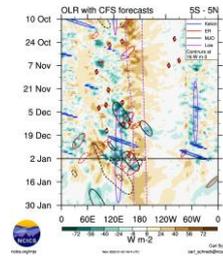
Gambar 2. Siklon Malakas (6-15 April 2022)
(Sumber: <https://ncics.org>)



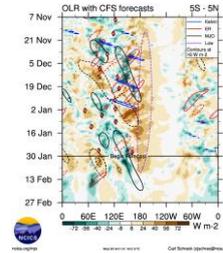
Gambar 3. Siklon Blake (4-17 Januari 2020)
(Sumber: <https://ncics.org>)



Gambar 4. Siklon 3 (18-23 Desember 2020)
(Sumber: <https://ncics.org>)



Gambar 5. Siklon Ruby (10-18 Desember 2020)
(Sumber: <https://ncics.org>)



Gambar 6. Siklon Tembin (19-24 Desember 2021)
(Sumber: <https://ncics.org>)

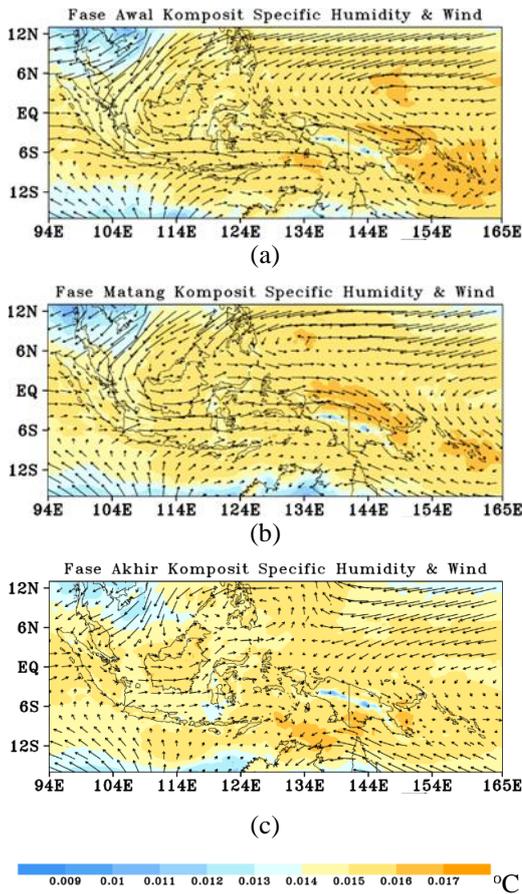
Melalui ke-5 diagram Hovmöller pada Gambar 2-6 di atas ini dapat diketahui terdapat 5 kejadian siklon tropis yang berkaitan dengan gelombang Rossby atmosfer di sekitar wilayah Indonesia dengan letak geografis berdasarkan posisi garis lintang dan garis bujur berada diantara 13° LU - 16° LS dan 94° BB - 165° BT. Didapatkan pula tanggal, bulan beserta tahun kejadian siklon. Secara umum terjadi pada musim barat dan peralihan 1. Diantaranya pada Bulan Desember 2017, Januari 2020, Desember 2020, Desember 2021, dan April 2022. Lalu, 5 Sampel ini kemudian di klasifikasi menjadi 3 fase (awal, matang dan akhir) dengan kriteria yang ada pada Tabel 2 dan peta per fase ditampilkan pada Gambar 6 - Gambar 11.

Tabel 2. Kriteria Fase Siklon

Kelompok	Kriteria	Kasus	Jumlah Kasus
Fase awal	Sebelum siklon	19 Desember 2017, 6 Januari 2020, 7 Januari 2020, 8 Januari 2020, 9 Januari 2020, 14 Desember 2020, 15 Desember 2020, 10 Desember 2021, 11 Desember 2021, 6 April 2022, 7 April 2022	11
Fase matang	Saat siklon	20 Desember 2017, 21 Desember 2017, 22 Desember 2017, 10 Januari 2020, 11 Januari 2020, 12 Januari 2020, 16 Desember 2020, 17 Desember 2020, 12 Desember 2021, 13 Desember 2021, 14 Desember 2021, 15 Desember 2021, 8 April 2022, 9 April 2022	14
Fase akhir	Setelah siklon	23 Desember 2017, 24 Desember 2017, 13 Januari 2020, 14 Januari 2020, 18 Desember 2020, 19 Desember 2020, 16 Desember 2021, 17 Desember 2021, 18 Desember 2021, 11 April 2022, 12 April 2022, 13 April 2022, 14 April 2022, 15 April 2022	14

B. Metode Analisis Komposit

Data nc ini diolah menggunakan GrADS menjadi peta komposit 3 fase: fase awal, fase matang dan fase akhir dengan 4 variabel berbeda.



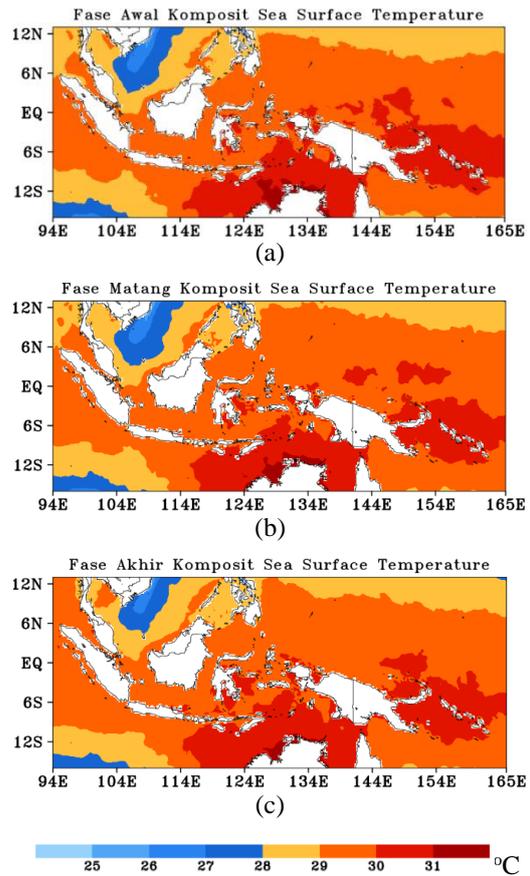
Gambar 7. Peta spasial komposit kelembapan spesifik (gradasi warna) & angin (vektor) pada tekanan 925 hPa yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021

Pada peta komposit spesifik kelembapan & angin Gambar 7a terlihat jelas ada vorteks kembar yang muncul di laut bagian timur Indonesia, kelembapan spesifik di area vorteks tinggi dan arah angin terlihat memutar. Kemudian di Gambar 7b vorteks kembar ini menjauhi Perairan Timur Indonesia, dimana pusaran angin bergerak ke bawah. Pada Gambar 7c, vorteks kembar mehilang dan mempengaruhi penurunan kelembapan spesifik.

Menurut (Tang *et al.*, 2023), perbedaan

kelembapan spesifik di atmosfer dapat mempengaruhi pembentukan dan perkembangan vorteks di wilayah terkait.

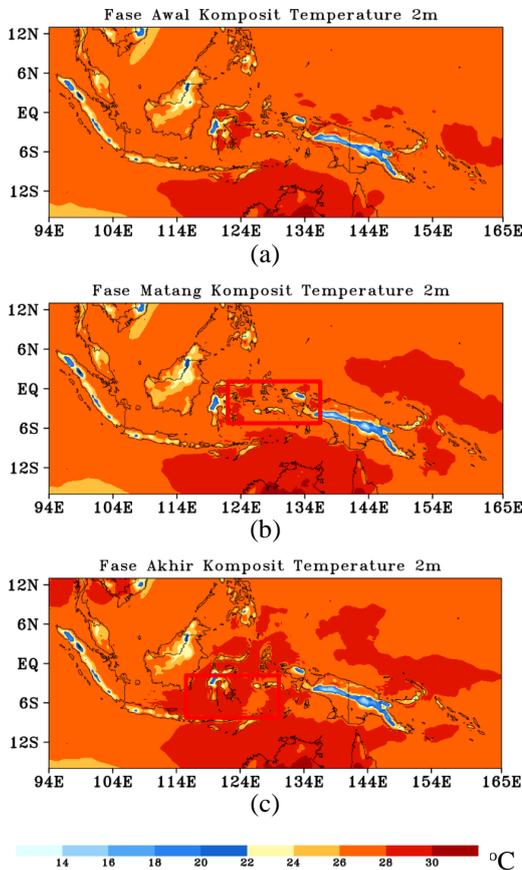
Konveksi dan pembentukan awan dapat dipengaruhi oleh kelembapan spesifik, ketika udara lembap naik ke atas, maka akan mendorong pembentukan awan tebal dan konveksi, yang mungkin mengarah pada pembentukan badai atau vortex.



Gambar 8. Peta spasial komposit suhu permukaan laut yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021.

Analisis suhu permukaan laut digunakan untuk menentukan anomali suhu permukaan laut pada 3 fase siklon. Gambar 8a menunjukkan suhu permukaan di Perairan Timur berkisar 29°C - 31°C. Kondisi ini memenuhi syarat terbentuknya siklon tropis di perairan hangat dengan suhu mencapai 26,5°C. Pada laut Timor di Gambar 8a, suhu permukaan

laut terlihat lebih rendah dari Gambar 8b. Sedangkan Gambar 3c menunjukkan suhu permukaan laut menurun 1°C .



Gambar 9. Peta spasial komposit suhu (2m) yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021.

Pada Gambar 9a menunjukkan suhu di udara tidak lebih panas dibandingkan Gambar 9b. Sedangkan Gambar 9c menunjukkan temperatur permukaan di area terbentuknya vorteks menurun.

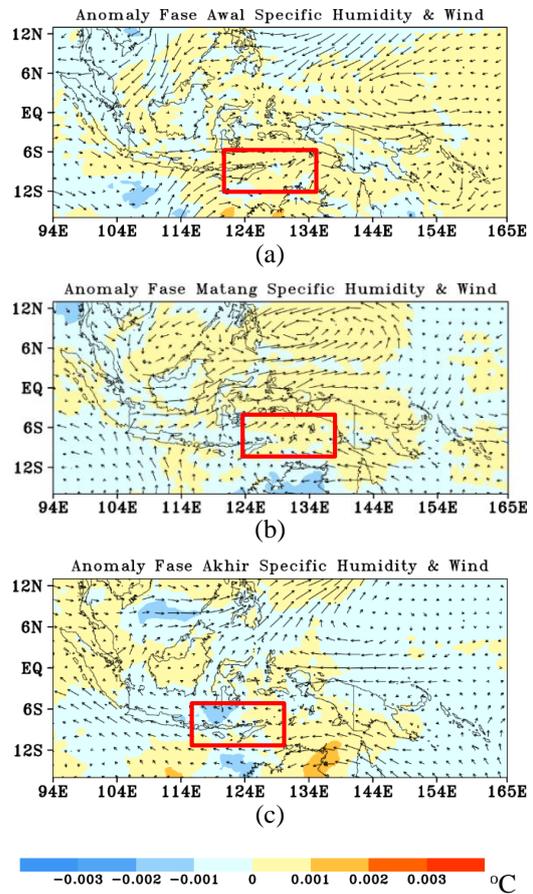
C. Metode Analisis Statistik

Data nc diunduh per bulan kejadian:

1. Desember 2017 (Tanggal 1-31)
2. Januari 2020 (Tanggal 1-31)
3. Desember 2020 (Tanggal 1-31)
4. Desember 2021 (Tanggal 1-31)
5. April 2022 (Tanggal 1-30)

Kemudian semua data ini digabungkan menjadi 1 data nc dan dirata-ratakan menggunakan perangkat lunak python. Setelah

itu, data nc komposit dikurangkan dengan data nc average agar menghasilkan peta anomali.

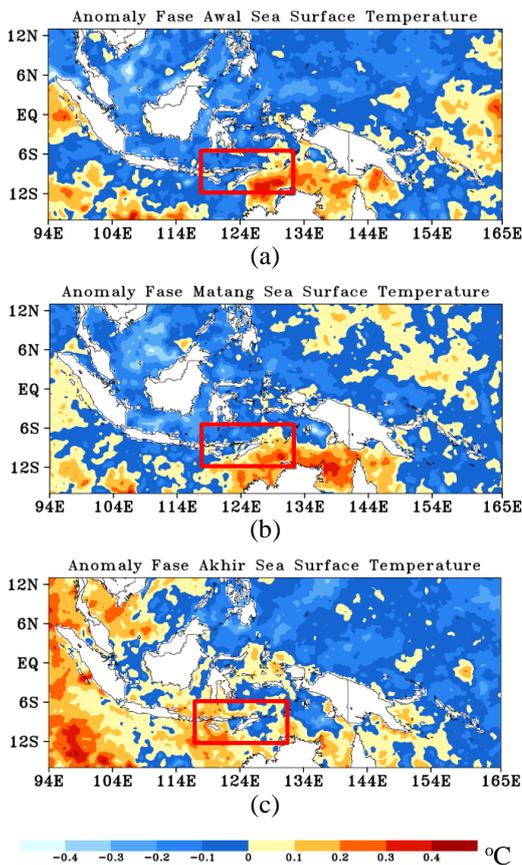


Gambar 10. Peta anomali spesifik kelembapan (gradasi warna) & angin (vektor) pada tekanan 925 hPa yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021. Kotak merah merupakan laut Timor.

Pada peta anomali terlihat lebih jelas perbedaannya dibandingkan dengan peta komposit. Pada Gambar 10a menunjukkan vorteks kembar di Perairan Timur Indonesia. Kelembapan spesifik di laut Timor yang terdapat vorteks terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan kelembapan spesifik pada Gambar 10c di laut Timor. Hal ini didukung oleh penelitian (Kowaleski & Evans, 2015), yang menyatakan, kelembapan udara yang tinggi dapat menyediakan sumber energi untuk menguatkan siklon dengan mendorong proses kondensasi dan pelepasan panas. Vorteks kembar di fase matang Gambar 10b terlihat

menjauhi Perairan Timur Indonesia dan berubah menjadi siklon tropis di Filipina.

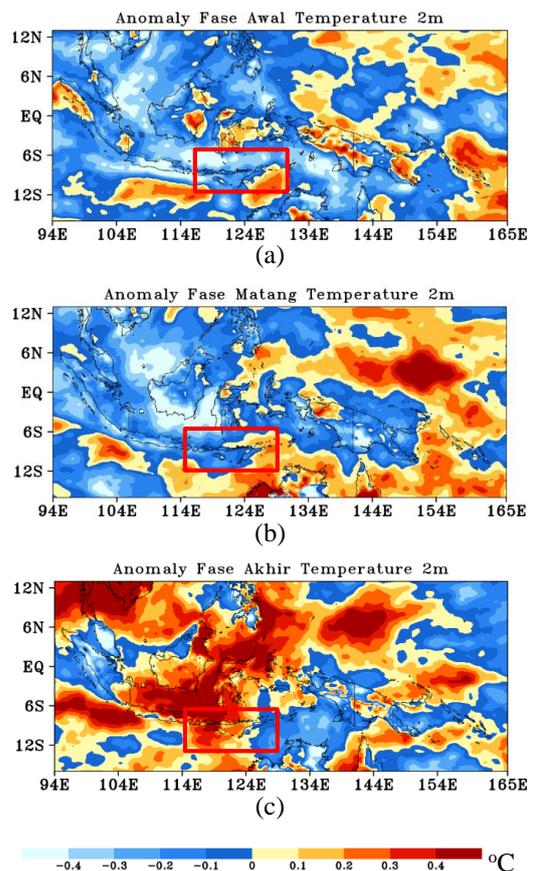
Menurut (Djazim Syaifullah *et al.*, 2015), pada fase awal atau fase belum matang, angin akan melingkar membentuk spiral pada wilayah konvektif yang kuat. Terlihat jelas sesuai dengan Gambar 10a yang menunjukkan adanya 2 angin berbentuk spiral di wilayah Perairan Timur Indonesia. Sedangkan pada tahap matang bentuk siklon tropis cenderung stabil sesuai dengan Gambar 10b di Perairan Timur Indonesia. Pada tahap pelemahan atau fase akhir, pusat siklon mulai menghilang dan wilayah dengan kecepatan angin maksimum terlihat menjauh dan melebar dari pusat siklon, seperti pada Gambar 10c.



Gambar 11. Peta anomali suhu permukaan laut yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021. Kotak merah merupakan laut Timor

Pada Gambar 11a dan 11b terlihat suhu permukaan laut meningkat ($>+0.4^{\circ}\text{C}$) di wilayah perairan Timor. Sedangkan, pada

Gambar 11c suhu permukaan laut menurun ($<-0.3^{\circ}\text{C}$) di perairan Timor. Dengan demikian karena sekitar wilayah Perairan Timur Indonesia didominasi oleh suhu permukaan laut yang tinggi, maka suplai uap air semakin banyak dan memicu terjadi wilayah tekanan rendah yang salah satu hasilnya adalah terbentuknya vorteks. Sesuai dengan hasil penelitian 2021 (Nababan *et al.*, 2023), suhu permukaan laut pada Musim Barat (Desember, Januari dan Februari) dan Musim Peralihan 1 (Maret-Mei dan September-November) akan mencapai puncak maksimum. Hal ini mendukung adanya pembentukan siklon tropis dan aktivitas laut lainnya, seperti adanya kenaikan permukaan laut dan perubahan pola arus.



Gambar 12. Peta anomaly suhu (2m) yang menunjukkan aktivitas siklon dan gelombang atmosfer ekuatorial Rossby untuk (a) fase awal, (b) fase matang dan (c) fase akhir, selama periode 2017-2021. Kotak merah merupakan laut Timor

Pada peta anomali ini terlihat jelas perbedaannya. Pada Gambar 12a menunjukkan temperatur permukaan (2m) naik ($>+0.3^{\circ}\text{C}$) di Perairan Timur Indonesia termasuk laut Timor. Pada Gambar 12b suhu udara permukaan (2m) naik ($>+0.4^{\circ}\text{C}$) di wilayah terjadinya vorteks kembar, sedangkan pada laut Timor temperatur permukaan (2m) tetap naik ($>+0.3^{\circ}\text{C}$) namun terlihat menyebar di sekitarnya. Respon atmosfer terhadap pemanasan tropis melibatkan efek gabungan dari dispersi gelombang Rossby. Pada Gambar 12c terlihat temperatur permukaan (2m) menurun menjadi ($<-0.3^{\circ}\text{C}$).

KESIMPULAN

Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa saat terjadinya fase awal, terdapat dua vorteks kembar di Perairan Timur Indonesia, kelembapan spesifiknya tinggi, suhu permukaan laut ($>+0.4^{\circ}\text{C}$), dan temperatur permukaan ($>+0.3^{\circ}\text{C}$). Sedangkan pada fase matang, vorteks kembar berubah menjadi siklon tropis di Filipina, kelembapan spesifik sama tinggi dengan fase awal, suhu permukaan laut meningkat ($>+0.4^{\circ}\text{C}$) dan menyebar di laut Timor, temperatur permukaan pun meningkat ($>+0.4^{\circ}\text{C}$) dan menyebar di wilayah laut Timor. Untuk fase akhir siklon, terlihat kelembapan spesifik yang menurun, suhu permukaan laut mendingin menjadi ($<-0.3^{\circ}\text{C}$) dan temperatur permukaan menurun ($<-0.3^{\circ}\text{C}$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), atas penyediaan fasilitas dan laboratorium komputasi berkinerja tinggi dalam pengolahan data penelitian ini. Kajian ini mendukung program riset berjudul Implementasi Purwarupa Sistem Pendukung Keputusan NAKULA untuk Meningkatkan Akurasi Prediksi Hujan di Indonesia, Rumah Program Purwarupa Sistem Pendukung Keputusan Berdasarkan Analisis Citra Satelit, Badan Riset dan Inovasi Nasional [Nomor 1/III.6/HK/2024] dan Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju Gelombang 4 [NOMOR 140/III.4.3/HK/2023].

DAFTAR PUSTAKA

Betari WP. 2021. Analisis Variabilitas Cuaca Dari Taifun Molave dan Pengaruhnya Terhadap Distribusi Curah Hujan di Laut Cina Selatan (Studi Kasus 27-28 Oktober 2020). *Jurnal Material dan Energi*

Indonesia. **10**(02): 98.

- Gochakov AV, Antokhina OYu, Krupchatnikov VN & Martynova YuV. 2022. Long-Term Variability of Rossby Wave Breaking in The Subtropical Jet Stream Area. *Meteorologiyai Gidrologiya*. **2**: 5-19.
- Kowaleski AM & Evans JL. 2015. Thermodynamic Observations And Flux Calculations of The Tropical Cyclone Surface Layer Within The Context of Potential Intensity. *Weather and Forecasting*. **30**(5): 1303-1320.
- Latos B, Peyrillé P, Lefort T, Baranowski DB, Flatau MK, Flatau PJ, Riama NF, Permana DS, Rydbeck AV & Matthews AJ. 2023. The Role of Tropical Waves in The Genesis of Tropical Cyclone Seroja in the Maritime Continent. *Nature Communications*. **14**(1).
- Lubis SW & Respati MR. 2021. Impacts of Convectively Coupled Equatorial Waves on Rainfall Extremes in Java, Indonesia. *International Journal of Climatology*. **41**(4): 2418-2440.
- Nababan B, Nirmawan AD & Panjaitan JP. 2023. Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Palabuhan Ratu dan Sekitarnya. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*. **13**(2): 145-162.
- Sprintall J, Gordon AL, Koch-Larrouy A, Lee T, Potemra JT, Pujiana K & Wijffels SE. 2014. The Indonesian Seas And Their Role In The Coupled Ocean-Climate System. *Nature Geoscience*. **7**(7): 487-492.
- Syaifulallah DM. 2015. Siklon Tropis, Karakteristik dan Pengaruhnya di Wilayah Indonesia Pada Tahun 2012. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*. **16**(2): 61-71.
- Tang Y, Wu G, He B, Liu Y, Mao J & Ma T. 2023. Two Types of Tibetan Plateau Vortex Genesis in June and The Associated Mechanisms. *Climate Dynamics*. **61**(9-10): 4343-4357.
- Yulihastin E, Taofiqurohman A, Fathrio I, Nauval F, Andarini DF, Hatmaja RB, Fahim A, Perdani NN, Satyawardhana H, Ismail M. FA, Nugroho D, Suaydhi, Sofiaty I, Avia LQ & Ratnawati HI. 2023. Evolution of Double Vortices Induce Tropical Cyclogenesis of Seroja Over Flores, Indonesia. *Natural Hazards*. **117**: 2675-2692
- Zaqarashvili TV, Albekioni M, Ballester JL, Bekki Y, Biancofiore L, Birch AC, Dikpati M, Gizon L, Gurgenshvili E, Heifetz E,

Lanza AF, McIntosh SW, Ofman L, Oliver R, Proxauf B, Umurhan OM & Yellin-Bergovoy R. 2021. Rossby Waves in Astrophysics. In *Space Science Reviews*. **217**(1).

