GeoScienceEd *7(4) (2026)*

Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika

http://jpfis.unram.ac.id/index.php/GeoScienceEdu/index

Respon Dinamika Atmosfer Saat Terjadi Siklon Tropis di Selatan Indonesia

Willy Bonanja Manik[1], Sayful Amri[1]*, Giarno[1], Maman Sudarisman[1]

[1] Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

DOI: https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3032

Article Info:
Received : 21 Juli 2026
Revised : 11 Agustus 2026
Accepted : 22 Agustus 2026
Published : 24 September 2026

Correspondence:

Sayful Amri

Phone:

Abstract: The Indonesian Maritime Continent is surrounded by tropical cyclone (TC) basins that influence weather variability, one of which is the South Indian Ocean (SIO) basin. This study aims to analyze the statistical trend of tropical cyclone (TC) frequency in the SIO basin during the period 1996–2025, as well as the spatial patterns of atmospheric dynamics and their impacts on rainfall variability over the land areas of Java, Bali, and the Lesser Sunda Islands (Nusa Tenggara). The study area covers 10°–15°S and 100°–125°E and is divided into five domains, each measuring 5° × 5°. The datasets used include historical TC records from IBTrACS, PERSIANN precipitation data, Outgoing Longwave Radiation (OLR), and ERA5 reanalysis data. Data processing involved Poisson regression analysis to assess statistical trends and anomaly composite analysis to characterize the spatial patterns of atmospheric conditions. The statistical results show that among the five study domains, a statistically significant increasing trend in TC frequency occurs in Domain 2, with an increase of 22.23% per five-year period. Spatially, the impacts of atmospheric dynamics and rainfall distribution strongly depend on the location of TC occurrence. TCs occurring in the western domains (Domains 1 and 2) induce divergence and rainfall deficits over western to central Java, while enhancing rainfall over Bali to East Nusa Tenggara (NTT). As TCs shift toward the central domain (Domain 3), convergence becomes concentrated over eastern Java to West Nusa Tenggara (NTB), resulting in increased rainfall in these areas, while rainfall deficits occur over western and central Java and NTT. Meanwhile, TCs occurring in the eastern domains (Domains 4 and 5) enhance rainfall over Bali to NTT but induce divergence and rainfall deficits across Java.

Keywords: Tropical Cyclone; South Indian Ocean; Atmospheric Dynamics; Rainfall; Poisson Regression.

Citation: Manik, W. B., Amri, S., Giarno, & Sudarisman, M. (2026). Respon Dinamika Atmosfer Saat Terjadi Siklon Tropis di Selatan Indonesia. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, *7*(4), 5750–5756. https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3032

Pendahuluan

Benua Maritim Indonesia (BMI) merupakan mesin panas utama dalam sistem iklim global (Ramage, 1968). Hal ini menunjukkan konveksi hujan di wilayah tropis menghasilkan panas laten yang kemudian didistribusikan ke lintang yang lebih tinggi serta berperan dalam pembentukan sirkulasi global. Yamanaka, (2016) menjelaskan bahwa BMI juga merupakan miniatur dari planet bumi yang keberadaan daratan dan lautannya saling terkait. Kondisi ini menyebabkan wilayah BMI dikelilingi oleh 3 basin *tropical cyclone* (TC) dunia, yaitu *Western North Pasific* (WNP), *North Indian Ocean* (NIO), dan *South Indian Ocean* (SIO), sehingga wilayah Indonesia dapat terkena dampak dari TC tersebut. Aktivitas TC memberikan dampak terhadap wilayah Indonesia melalui dua mekanisme, yaitu dampak langsung berupa hujan ekstrem, angin kencang, dan *storm surge*, serta dampak tidak langsung (*remote effect*). Dampak tidak langsung ini dapat memicu peningkatan kelembapan dan curah hujan (CH), atau sebaliknya memicu defisit kelembapan seperti fenomena monsoon break (Li dkk., 2023). Walaupun Indonesia berada di ekuator yang gaya Coriolisnya lemah (Nur dkk., 2024), anomali

Email: sayful.amri@stmkg.ac.id

Copyright © 2026, Manik, W. B., Amri, S., Giarno, & Sudarisman, M. (2026).
This open access article is distributed under a (CC-BY License

pembentukan siklon di lintang rendah menunjukkan bahwa wilayah Indonesia juga tidak aman dari ancaman dampak sistem siklonik tersebut (Deng dan Li, 2020).

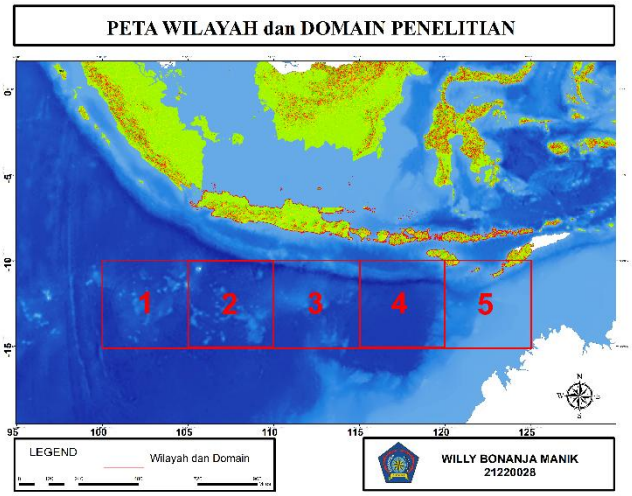
Secara historis, dari beberapa kejadian TC yang melanda wilayah Indonesia, basin SIO merupakan salah satu basin yang paling banyak memberikan dampak kerugian. Habibie dkk., (2018) dan Mulyana dkk., (2018) menjelaskan bahwa TC Cempaka dan TC Dahlia pada tahun 2017 berpengaruh kuat terhadap peningkatan CH yang sangat signifikan di wilayah Jawa. Dampak yang lebih parah terjadi di Nusa Tenggara Timur saat terjadinya TC Seroja di tahun 2021 yang menimbulkan kecepatan angin 70 knot, gelombang maksimum 14,24 meter (Umam dkk., 2024) serta menelan korban jiwa sebanyak 181 jiwa dan kerugian lebih dari 71 miliar rupiah (Sekaranom dkk., 2021). Nur dkk., (2024) menjelaskan sebanyak 52% kejadian TC yang terjadi di Indonesia terbentuk di bagian selatan (basin SIO). Namun, penelitian mengenai dampak siklon di wilayah ini umumnya hanya membahas satu kejadian TC saja. Penelitian klimatologis yang dilakukan oleh Windiarto (2024) masih menggunakan wilayah kajian yang relatif terlalu luas, sehingga hal ini dapat menimbulkan bias dampak posisi TC di wilayah Jawa dan sekitarnya.

Penelitian ini mengkaji dampak TC di basin SIO dengan membatasi kajian menjadi 5 Domain yang berukuran 5° × 5°, dari 10°-15°LS dan 100°-125°BT untuk mengurangi bias dari rata-rata wilayah yang terlalu luas. Dalam penelitian TC, sangat penting untuk memahami bagaimana dinamika atmosfer memengaruhi pembentukan dan berkembangnya sistem siklon (Holton, 2004). Selain itu, analisis tren telah banyak digunakan untuk melihat perubahan aktivitas TC dalam jangka panjang (Villarini dkk., 2010). Mengacu pada hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis statistik tren frekuensi kejadian TC dengan periode 5 tahunan di setiap domain kajian. Penelitian ini juga diintegrasikan untuk menganalisis pola spasial dinamika atmosfer yang secara spesifik difokuskan pada analisis Angin, Transpor Kelembapan dan divergensinya, *Outgoing Longwave Radiation* (AOLR), dan anomali curah hujan (ACH) saat terjadi TC di basin SIO beserta dampaknya terhadap wilayah daratan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara.

Metode

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi dampak dinamika atmosfer di wilayah daratan Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara saat terjadi TC.

Wilayah penelitian dan Domainnya ditunjukkan pada Gambar 1 dan data yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Peta wilayah penelitian dan domain penelitian

Tabel 1. Data Penelitian

No	Data	Sumber	Resolusi/Periode
1	Historis TC	IBTrACS (NOAA)	1996 -2025
2	Curah Hujan	PERSIANN (NOAA)	0,25° × 0,25°
3	OLR	CPC (NOAA)	1° × 1°
4	Angin (u dan v) dan Kelembapan udara	ERA5	0,25° × 0,25°

Analisis data dilakukan dalam dua pendekatan, yaitu pendekatan statistik untuk melihat tren dan analisis spasial dinamika atmosfer saat terjadi TC. Analisis statistik tren frekuensi kejadian TC dievaluasi dalam periode 5 tahunan di setiap domain kajian menggunakan analisis regresi Poisson (Villarini dkk., 2010). Metode ini ideal untuk melihat tren kenaikan atau penurunan pada tipe data kejadian berfrekuensi rendah. Perhitungan regresi Poisson dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\boldsymbol{\mu_t = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)}$$

dimana :
μ_t : Rata-rata jumlah kejadian TC
t : Waktu pengamatan
β_0 : Intersep
β_1 : Koefisien tren

Tinjauan dinamika atmosfer secara spasial dihitung menggunakan analisis komposit dan anomali *Low-Level Moisture Transport* (LLMT) dan divergensinya, anomali OLR (AOLR), serta anomali curah hujan (ACH). LLMT dihitung dengan mengintegrasikan perkalian vektor angin horizontal dan kelembapan spesifik pada lapisan atmosfer bawah (1000–825 hPa) yang menjadi rute dominan pergerakan uap air (Zhou dkk., 2010). Persamaan vektor LLMT dirumuskan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{Q = \frac{1}{g}\int_{p_{825}}^{p_{1000}} q\,V\,dp}$$

dimana :
Q : Vektor LLMT
V : Angin horizontal (u, v)
p : Ketinggian isobar
q : Kelembapan
g : Gravitasi

Divergensi dihitung untuk menentukan pola distribusi kelembapan, di mana nilai positif merepresentasikan penyebaran uap air (divergensi) dan nilai negatif (konvergensi) merepresentasikan pengumpulan uap air yang memicu pertumbuhan awan konveksi (Holton, 2004). Persamaan divergensi transpor kelembapan dihitung dengan turunan parsial horizontal sebagai berikut:

$$\boldsymbol{\nabla \cdot (qV) = \frac{\partial(qu)}{\partial x} + \frac{\partial(qv)}{\partial y}}$$

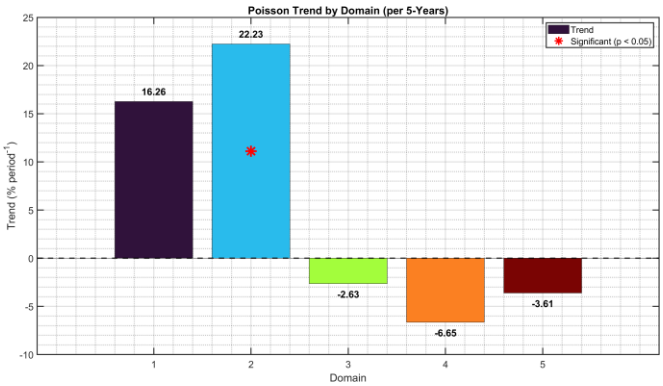
dimana :
∇ : Divergensi
q : Kelembapan spesifik
qu : Kelembapan arah zonal
qv : Kelembapan arah meridional

Untuk parameter AOLR dan ACH, nilai anomali diperoleh dengan mengurangkan data saat kejadian TC dengan rata-rata klimatologis 30 tahunan di wilayah tersebut. Seluruh hasil integrasi matematis ini selanjutnya diproyeksikan dalam bentuk peta distribusi spasial komposit untuk interpretasi dampaknya terhadap wilayah Jawa, Bali dan Nusa Tenggara.

Hasil dan Diskusi

Analisis Tren Frekuensi Kejadian TC

Frekuensi kejadian TC di masing-masing Domain dalam periode 5 tahunan ditunjukkan oleh Gambar 2. Hasilnya menunjukkan tren kenaikan frekuensi TC per 5 tahunan terjadi di Domain 1 dan 2, di mana Domain ini terletak di sebelah barat Domain kajian SIO. Sebaliknya, tren penurunan kejadian TC terjadi di Domain 3, 4, dan 5 yang merupakan di sebelah timur Domain kajian SIO. Hasil uji signifikansi statistik menunjukkan hanya tren di Domain 2 yang memiliki nilai signifikan secara statistik, yaitu kurang dari 0,05 ($p < 0,05$). Hal ini menunjukkan pada Domain 2 terjadi tren kenaikan kejadian TC sebesar 22,23% di setiap 5 tahunnya.

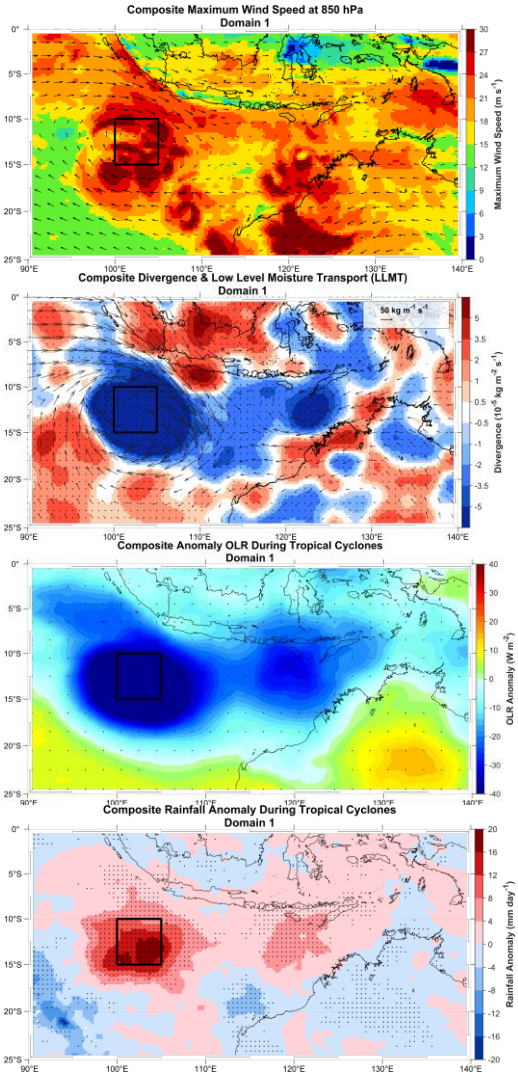


Gambar 2. Tren frekuensi kejadian TC di masing-masing Domain

Analisis Spasial TC di Domain 1

Peta distribusi angin menunjukkan adanya pergerakan aliran angin menuju pusat domain dengan kecepatan maksimal melampaui hingga 30 m/s. Aliran angin ini membawa uap air dari area yang dilaluinya menuju pusat domain. Hal ini menciptakan daerah konvergensi (berwarna biru) yang sangat kuat di pusat Domain, sehingga memicu daya angkat vertikal untuk mendukung pembentukan awan-awan konvektif yang ditandai oleh AOLR bernilai sangat negatif (barwarna biru). Oleh karena itu, aktivitas konvektif yang masif di pusat Domain menyebabkan peningkatan curah hujan hingga mencapai 16–20 mm/hari.

Kejadian TC di Domain ini menciptakan aliran angin yang kuat di wilayah pesisir selatan Sumatera hingga Jawa dan menyebabkan dampak angin kencang. Aliran angin menuju pusat TC secara efektif merampas massa uap air di atas daratan. Kondisi ini menciptakan area divergensi yang membentang dari pesisir barat Sumatera hingga ke Jawa Tengah. Defisit kelembapan akibat divergensi ini menyebabkan penurunan curah hujan di wilayah Jawa bagian barat. Sebaliknya, daerah konvergensi terbentuk di wilayah bagian timur kajian. Hal ini menyebabkan adanya pertumbuhan awan-awan konvektif dan memicu peningkatan curah hujan di wilayah Bali hingga NTT.

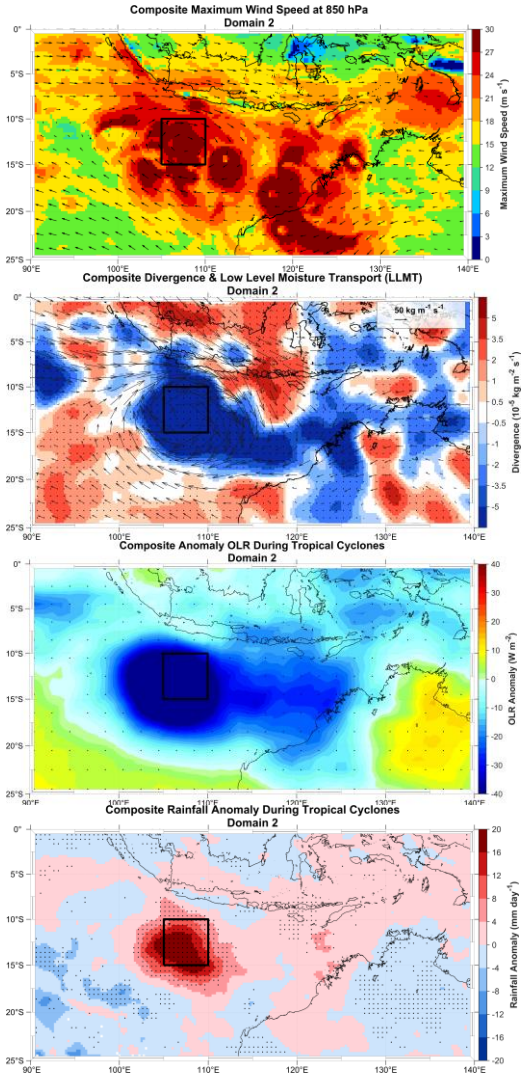


Gambar 3. Komposit dinamika atmosfer angin (a), LLMT dan Divergensi (b), AOLR (c), dan ACH (d) di Domain 1

Analisis Spasial TC di Domain 2

Secara umum mekanisme dinamika atmosfer saat kejadian TC di pusat domain sama. Pergerakan aliran udara menuju pusat domain dan menciptakan area konvergensi, sehingga adanya pembentukan awan-awan konvektif yang memicu peningkatan curah hujan. Selain itu, pergerakan aliran angin ini menciptakan dampak angin kencang di sepanjang pesisir selatan Pulau Jawa.

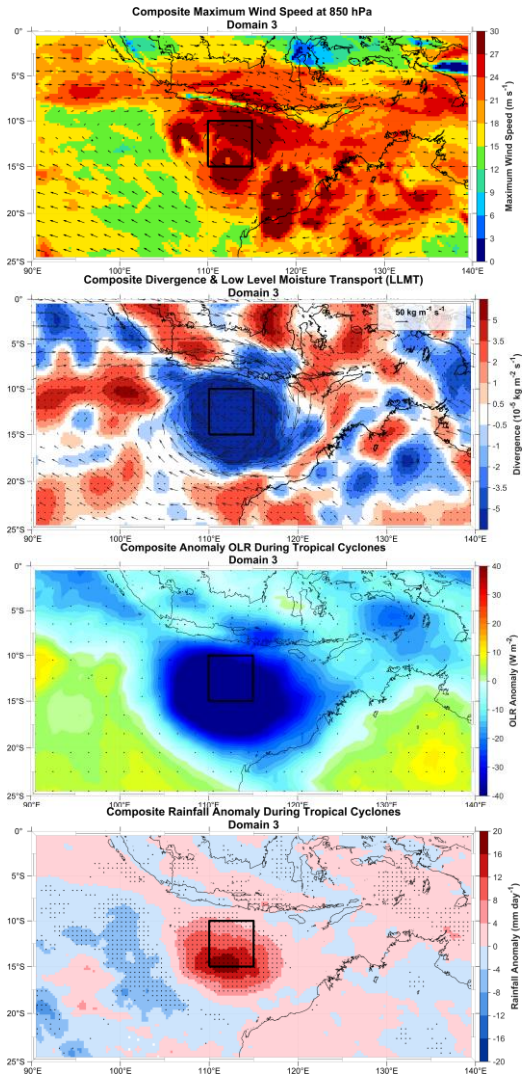
Pergeseran TC menuju Domain 2 pada Gambar 4 menunjukkan aliran angin bergerak dari arah utara Jawa menuju pusat Domain melintasi wilayah Bali dan NTB. Hal ini menciptakan area divergensi di bagian selatan Jawa, Bali dan NTB. Area divergensi ini memicu defisit kelembapan dan mengakibatkan penurunan curah hujan di daratan tersebut. Sebaliknya, di wilayah utara Jawa dan NTT terbentuk area konvergensi dan pembentukan awan-awan konvektif. Kondisi ini memicu peningkatan curah hujan di wilayah bagian utara Jawa dan NTT.



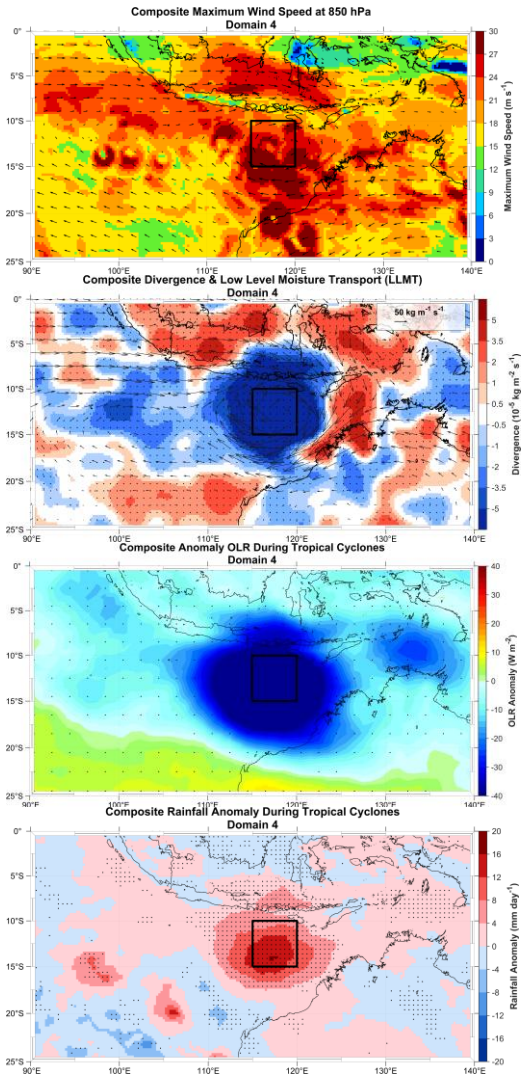
Gambar 4. Komposit dinamika atmosfer angin (a), LLMT dan Divergensi (b), AOLR (c), dan ACH (d) di Domain 2

Analisis Spasial TC di Domain 3

Pergeseran TC ke Domain 3 menyebabkan dampak angin kencang di wilayah utara dan selatan Jawa hingga NTB. Aliran angin ini menarik massa udara dari arah barat melintasi utara pulau Jawa dan NTB menuju pusat Domain. Hal ini menciptakan area konvergensi di atas wilayah utara dan selatan Jawa, Bali, dan NTB, sehingga menyebabkan pembentukan awan konveksi serta memicu peningkatan curah hujan. Sebaliknya, penarikan massa udara ini menciptakan defisit kelembapan di wilayah daratan Jawa bagian barat, Jawa bagian tengah dan NTT. Defisit kelembapan ini memicu area divergensi yang menghambat aktivitas konvektif, sehingga terjadinya penurunan curah hujan di wilayah tersebut.



Gambar 4. Komposit dinamika atmosfer angin (a), LLMT dan Divergensi (b), AOLR (c), dan ACH (d) di Domain 3



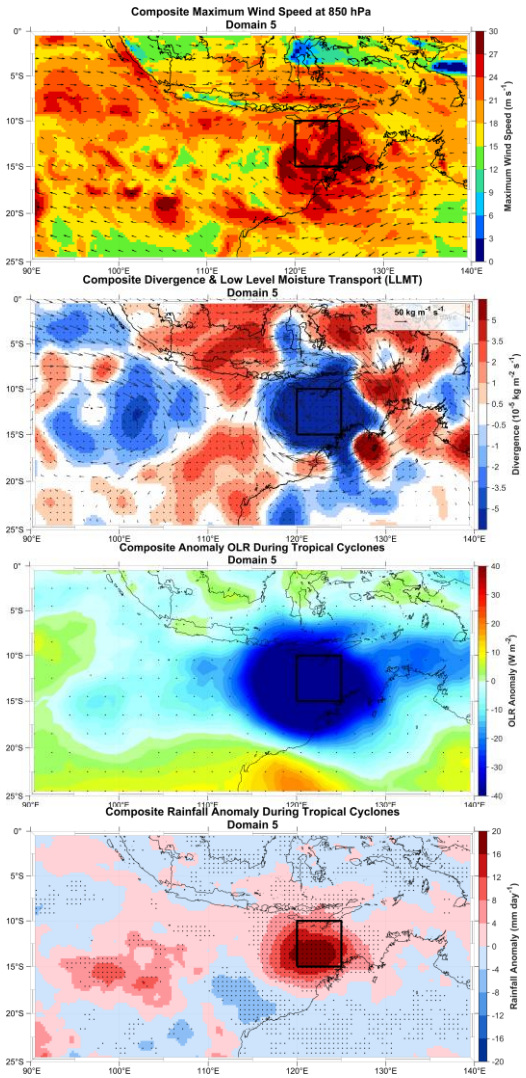
Gambar 5. Komposit dinamika atmosfer angin (a), LLMT dan Divergensi (b), AOLR (c), dan ACH (d) di Domain 4

Analisis Spasial TC di Domain 4

Pergeseran TC ke Domain 4 menyebabkan aliran angin ditarik dan berputar dari arah barat melintasi wilayah Kalimantan dan Sulawesi menuju Laut Banda sebelum mencapai pusat Domain. Penarikan massa udara ke pusat Domain ini menciptakan defisit kelembapan di wilayah Jawa bagian barat hingga Jawa bagian tengah. Hal ini menciptakan area divergensi yang menghambat pembentukan awan konvektif dan memicu penurunan curah hujan. Sebaliknya, wilayah Jawa bagian timur hingga NTT mengalami konvergensi akibat adanya penambahan kelembapan di sekitar Domain. Hal ini menyebabkan wilayah tersebut ditutupi oleh awan konvektif serta memicu peningkatan curah hujan yang masif.

Analisis Spasial TC di Domain 5

Kejadian TC di Domain 5 menarik massa udara dari hampir keseluruhan wilayah Indonesia bagian selatan. Hal ini menyebabkan adanya area divergensi yang masif yang memicu penurunan curah hujan. Di atas pulau Jawa terlihat adanya nilai AOLR positif yang menandakan cuaca cerah sehingga terjadi penurunan curah hujan. Sebaliknya, di wilayah sekitar Domain seperti Bali, NTB, dan NTT terbentuk area konvergensi dan nilai AOLR negatif akibat pembentukan awan konvektif. Hal ini mengakibatkan terjadinya peningkatan curah hujan di wilayah tersebut.



Gambar 6. Komposit dinamika atmosfer angin (a), LLMT dan Divergensi (b), AOLR (c), dan ACH (d) di Domain 5

Kesimpulan

Pola dinamika atmosfer dan sebaran curah hujan sangat dipengaruhi oleh letak domain terjadinya TC. Saat berada di kelompok domain barat (Domain 1 dan 2) tarikan massa udara memicu area divergensi dan cuaca cerah di wilayah Jawa bagian barat hingga tengah serta menyebabkan defisit curah hujan, sedangkan wilayah Bali hingga NTT mengalami peningkatan curah hujan. Ketika TC berada di Domain 3 sirkulasi memusatkan konvergensi dan AOLR negatif yang berdampak pada peningkatan curah hujan di wilayah Jawa Timur hingga NTB. Sebaliknya, terjadi divergensi dan penurunan curah hujan di Jawa bagian barat, Jawa Tengah, dan NTT. Sementara itu, saat TC berada di kelompok domain timur (Domain 4 dan 5) konvergensi terjadi di wilayah Bali hingga NTT, memicu pertumbuhan awan konvektif dan peningkatan curah hujan. Namun, memicu divergensi dan defisit curah hujan di seluruh daratan Jawa.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas dukungan akademik yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada NOAA sebagai penyedia data International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) dan data curah hujan PERSIANN, serta ECMWF sebagai penyedia data reanalisis ERA5. Data dan dukungan yang diberikan sangat membantu dalam pelaksanaan hingga penyelesaian penelitian ini.

Referensi

Deng, Liyuan; Li, T. (2020). Impact of Background Dynamic and Thermodynamic States on Distinctive Annual Cycle of Tropical Cyclone Genesis over the Western North Pacific and the North Atlantic. Journal of Meteorological Research, 34(4), 822–835.

Habibie, Muhammad Najib; Noviati, Sri; Harsa, H. (2018). Pengaruh Siklon Tropis Cempaka Terhadap Curah Hujan Harian di Wilayah Jawa dan Madura. Jurnal Meteorologi Dan Geofisika, 19(1), 1–11.

Holton, J. R. (2004). An Introduction to Dynamic Meteorology (4th Editio). Elsevier Academic Press.

Li, Xinyu; Lu, Riyu; Chen, Guixing; Chen, R. (2023). Tropical cyclones over the South China Sea suppress the monsoonal rainfall in southern China. Npj Climate and Atmospheric Science, 6, 207. https://doi.org/10.1038/s41612-023-00534-9

Mulyana, Erwin; Prayoga, M. Bayu Rizky; Yananto, Ardila; Wirahma, Samba; Aldrian, Edvin; Harsoyo, Budi; Seto, Tri Handoko; Sunarya, Y. (2018). Tropical cyclones characteristic in southern Indonesia and the impact on extreme rainfall event. MATEC Web of Conferences, 229, 02007.

Nur, Agus Salim; Wibowo, Adi; Supriatna; Tampubolon, S. B. (2024). Spatial Pattern of Tropical Cyclone in South Indonesia During 1990-2023. Jurnal Geografi Lingkungan Tropik (Journal of Geography of Tropical Environments), 8(2).

Ramage, C. S. (1968). Role of a Tropical "Maritime Continent" in the Atmospheric Circulation. Monthly Weather Review, 96(6), 365–370.

Sekaranom, Andung Bayu; Putri, Narastravika Henardi; Puspaningrani, F. C. (2021). The impacts of Seroja Tropical Cyclone towards extreme weather in East Nusa Tenggara. E3S Web of Conferences, 325, 01020.

Umam, Choirul; Pranowo, Widodo Setiyo; Azhari, Ferian; Hendra; Setiyadi, Johar; Aji, T. (2024). Analysis of Influence of Cyclone Seroja on Wave Height and Tide in the Indian Ocean. Omni-Akuatika, 20(1), 38–49.

Villarini, Gabriele; Vecchi, Gabriel A.; Smith, J. A. (2010). Modeling the Dependence of Tropical Storm Counts in the North Atlantic Basin on Climate Indices. Journal of Climate, 138(11), 2681–2705.

Windiarto, Y. (2024). Pola Konvektivitas dan Curah Hujan pada Saat Terjadi Siklon Tropis di Indonesia Bagian Selatan. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG).

Yamanaka, M. D. (2016). Physical climatology of Indonesian maritime continent: An outline to comprehend observational studies. Atmospheric Research, 178–179, 231–259. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.017

Zhou, Xiaoxia; Ding, Yihui; Wang, P. (2010). Moisture Transport in the Asian Summer Monsoon Region and Its Relationship with Summer Precipitation in China. Advances in Atmospheric Sciences, 27(1), 31–44.