

Analisis Dinamika Atmosfer Saat Peristiwa Siklon Tropis Paddy di Pulau Jawa (22 November 2021 – 24 November 2021)

Fadhil Muhammad Aslam^{1*}

¹Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika

* E-mail: fadhil.muhammad.aslam4@gmail.com

Abstrak

Pulau Jawa merupakan pulau dengan penduduk terpadat di Indonesia. Sejalan dengan hal tersebut, Pulau Jawa juga rentan mengalami gangguan atmosfer yang berpengaruh terhadap aktivitas penduduknya. Salah satunya adalah peristiwa Siklon Tropis Paddy yang terjadi dari 22 hingga 24 November 2021. Tujuan studi ini adalah untuk memahami dan mendalami analisis dinamika atmosfer saat peristiwa Siklon Tropis Paddy yang nantinya berdampak pada kehidupan dan aktivitas masyarakat di Pulau Jawa. Penelitian ini menggunakan data berbagai parameter meteorologi seperti curah hujan, angin zonal dan meridional, suhu permukaan laut (SST), kelembapan, dan tekanan yang dikumpulkan dari beberapa sumber yaitu: Satelit Himawari-8, GsMap, ECMWF Era 5 *hourly data on pressure levels*, dan NOAA. Penelitian ini mengkaji dinamika anomali suhu permukaan laut (SST), pola angin, transpor kelembapan (LLMT), divergensi, tekanan permukaan dan curah hujan saat peristiwa Siklon Tropis Paddy. *Software* seperti GrADS 2.2 dan Python digunakan untuk analisis spasial. Analisisnya menunjukkan bahwa anomali SST tinggi, konvergensi, dan LLMT yang juga tinggi turut berkontribusi pada pembentukan awan konvektif, sehingga pada akhirnya menyebabkan curah hujan tinggi di wilayah selatan Jawa yang terpengaruh oleh siklon. Seiring dengan berjalannya waktu, terjadi penurunan dalam fenomena ini, hal tersebut ditandai dengan penurunan tekanan, kecepatan angin, dan curah hujan, yang mengarah pada normalisasi kondisi cuaca di Pulau Jawa pasca-siklon.

Kata kunci: Siklon Tropis, Awan Konvektif, Hujan, Pulau Jawa.

Abstract

Java Island is the most densely populated island in Indonesia. Consequently, Java Island is also prone to atmospheric disturbances that affect the activities of its inhabitants. One such event was Tropical Cyclone Paddy, which occurred from November 22 to 24, 2021. The aim of this study is to understand and delve into the analysis of atmospheric dynamics during the Tropical Cyclone Paddy event, which subsequently impacts the lives and activities of the people on Java Island. This study utilizes data from various meteorological parameters such as rainfall, zonal and meridional winds, sea surface temperature (SST), humidity, and pressure collected from several sources, namely: Himawari-8 Satellite, GsMap, ECMWF Era 5 *hourly data on pressure levels*, and NOAA. The research examines the dynamics of sea surface temperature (SST) anomalies, wind patterns, lower-level moisture transport (LLMT), divergence, surface pressure, and rainfall during the Tropical Cyclone Paddy event. *Software* such as GrADS 2.2 and Python were used for spatial analysis. The analysis indicates that high SST anomalies, convergence, and high LLMT contributed to the formation of convective clouds, ultimately resulting in high rainfall in the southern regions of Java affected by the cyclone. Over time, there was a decline in these phenomena, marked by a decrease in pressure, wind speed, and rainfall, leading to the normalization of weather conditions in Java Island post-cyclone.

Keywords: Tropical Cyclone, Convective Clouds, Rain, Java Island.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan sebuah negara kepulauan strategis yang terletak di wilayah khatulistiwa dan dikelilingi oleh dua benua dan dua samudera. Negara ini memiliki karakteristik iklim tropis dengan dua musim yang dominan: hujan dan kemarau. Iklim juga memiliki peran yang penting dalam kehidupan sehari-hari masyarakat. Fenomena cuaca dan iklim di Indonesia dipengaruhi oleh berbagai faktor yang beroperasi pada skala yang beragam, mulai dari global hingga mikro. Salah satunya yang berpengaruh adalah siklon tropis. Soerjadi (2006) menyatakan bahwa siklon tropis adalah gangguan atmosfer yang signifikan dengan dampak yang luas.

Siklon tropis juga dikenal dengan istilah *Typhoon*, *Hurricane* atau *Tropical Cyclone*, ini merupakan fenomena skala regional yang berkembang di samudera tropis. Fenomena ini terbentuk sebagai sistem cuaca pusaran siklonal di daerah tekanan rendah di atas perairan tropis yang hangat, dengan suhu permukaan laut di atas 27°C (Aguado & E. Burt, 2001). Siklon tropis dicirikan oleh angin kencang dan hujan lebat. Mayoritas siklon tropis terbentuk pada daerah lintang antara 10° dan 20° dari ekuator, dengan 67% di antaranya terjadi di Belahan Bumi Utara (Tjasyono, 2006, 2007). Sebagai suatu sistem tekanan rendah yang berkembang di lautan luas, siklon tropis ini memiliki kecepatan angin maksimum 34 knot atau lebih yang mendominasi di sekitar pusat siklon dan bertahan setidaknya selama 6 jam (Zakir, 2006b). Pada umumnya, masa hidup suatu siklon tropis rata-rata berkisar antara 3 hingga 18 hari. Karena energi siklon tropis didapat dari lautan hangat, maka siklon tropis akan melemah atau punah ketika bergerak dan memasuki wilayah perairan yang dingin atau ketika memasuki daratan (BMKG, 2024b).

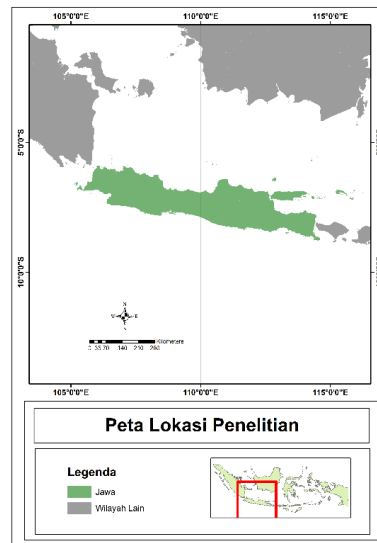
Meskipun wilayah Indonesia terbebas dari lintasan langsung siklon tropis karena gaya coriolis yang kecil di sekitarnya, keberadaan siklon tropis di sekitar wilayah ini dapat mempengaruhi pola cuaca (Zakir, 2010). Pola cuaca yang terpengaruh termasuk angin kencang, gelombang tinggi, dan perubahan curah hujan. Menurut Zakir (2006a), selain dari posisi dan kekuatan siklon itu sendiri, kondisi cuaca di Indonesia juga dipengaruhi oleh faktor sirkulasi udara yang berlaku di daerah tersebut.

Siklon tropis memiliki dampak meteorologi signifikan yang mempengaruhi kondisi cuaca di sekitarnya. Zakir (2006c) menunjukkan bahwa tanda-tanda awal pembentukan siklon sering kali mengakibatkan kondisi cuaca buruk di beberapa wilayah. Ketika siklon tersebut sudah matang atau sudah diberi nama, biasanya dampak siklon di Indonesia akan terbatas pada angin kencang dan gelombang tinggi, kecuali di daerah yang berada dalam radius 500 km dari pusat siklon. Ketika siklon menjauh dari Indonesia atau intensitasnya melemah, wilayah bagian Selatan Indonesia, termasuk Pulau Jawa sering mengalami hujan lebat (Zakir, 2006c).

Meskipun penelitian tentang siklon tropis di Indonesia sudah banyak dilakukan, tetapi pada umumnya hanya terfokus pada pengaruh siklon terhadap curah hujan (Zakir, 2017). Namun, jarang ada penelitian yang mengeksplorasi siklon tropis dari berbagai aspek meteorologi, khususnya di Pulau Jawa. Pulau Jawa merupakan pulau terpadat di Indonesia dengan populasi lebih dari 150 juta jiwa serta menjadi pusat ekonomi terbesar di Indonesia (BPS, 2023). Oleh karena itu, pulau ini menjadi fokus dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh Siklon Tropis Paddy yang terjadi pada tanggal 22 hingga 24 November 2021 dari perspektif berbagai aspek meteorologi. Tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan pemahaman yang lebih luas tentang pengaruh siklon tropis terhadap faktor-faktor meteorologi yang nantinya akan berdampak pada kehidupan dan aktivitas masyarakat di Pulau Jawa. Penelitian ini juga bertujuan untuk mendemokratisasikan pentingnya memahami dinamika kondisi cuaca untuk perencanaan dan implementasi strategi mitigasi serta adaptasi terhadap dampak perubahan cuaca yang dinamis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Pulau Jawa. Secara astronomis, pulau ini terletak di antara 105° hingga 115° bujur timur dan -5° lintang utara hingga -18° lintang selatan. Utara Pulau Jawa berbatasan langsung dengan Laut Jawa dan Pulau Kalimantan, di selatan dengan Samudra Hindia, di barat dengan Selat Sunda dan Pulau Sumatera, serta di timur berbatasan langsung dengan Selat Bali dan Pulau Bali. Data lokasi diperoleh dari BIG (Badan Informasi Geospasial). Penelitian ini dilakukan pada saat terjadinya Siklon Tropis Paddy yang terjadi pada 22 hingga 24 November 2021.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

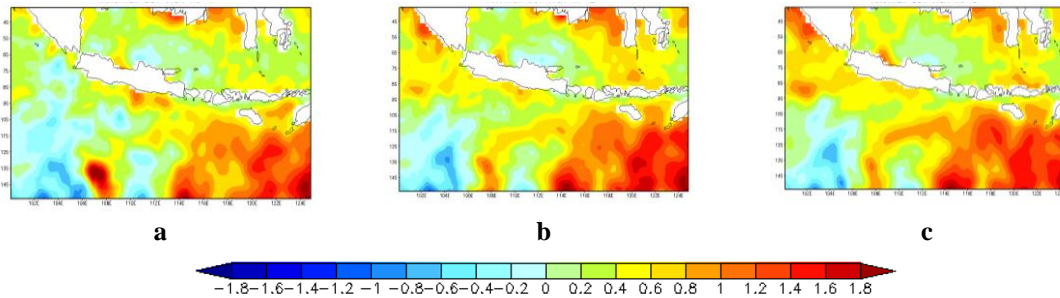
Metode penelitian ini melibatkan pengumpulan data dari beberapa instansi. Data satelit Himawari-8 kanal IR pada 22 - 24 November 2021 digunakan untuk menganalisis kondisi awan yang dipengaruhi oleh Siklon Tropis Paddy (JMA, 2024). Selain itu, ada data *reanalysis* parameter meteorologi berupa angin zonal, angin meridional, divergensi, kelembapan spesifik dan tekanan permukaan dari ECMWF Era 5 *hourly data on pressure levels* dengan resolusi $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ yang diperoleh melalui *website cds.climate.copernicus.eu*. Untuk data anomali SST dan curah hujan diperoleh dari NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) dan GsMap (Global Satellite Mapping of Precipitation) (BMKG, 2024a; ECMWF, 2024; NOAA, 2024).

Semua data tersebut digunakan untuk menganalisis anomali SST (*Sea Surface Temperature*), LLMT (*Low Level Moisture Temperature*), arah dan kecepatan angin, divergensi LLMT, tekanan permukaan, dan curah hujan. Data ECMWF ditampilkan menggunakan software GrADS 2.2, kondisi awan ditampilkan dengan aplikasi SATAID GMSLPD dan data GsMap divisualisasikan menggunakan *software* Python. Analisis dilakukan untuk menentukan pengaruh Siklon Tropis Paddy di Pulau Jawa berdasarkan data yang tersedia dan dilanjutkan dengan menyimpulkan dampaknya terhadap kondisi cuaca di Pulau Jawa.

Penelitian ini menganalisis data dari satelit Himawari-8 kanal IR pada tanggal 22-24 November 2021. Data ini digunakan untuk memeriksa kondisi awan yang dipengaruhi oleh Siklon Tropis Paddy. Selain itu, untuk mengamati aspek meteorologis lainnya seperti anomali SST, LLMT, arah dan kecepatan angin, divergensi, tekanan permukaan, dan curah hujan, digunakan data ECMWF ERA 5 dan GsMap. Analisis spasial dilakukan menggunakan GrADS 2.2 dan Python untuk divisualisasikan data SST, LLMT, arah dan kecepatan angin, divergensi, tekanan permukaan, dan curah hujan di Pulau Jawa. Hasil dari analisis ini akan digunakan untuk menarik kesimpulan tentang pengaruh Siklon Tropis terhadap berbagai faktor meteorologi di Pulau Jawa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Anomali Suhu Permukaan Laut (SST)



Gambar 2: Anomali Suhu Permukaan Laut (SST) Harian: (a) November 22, 2021 (b) November 23, 2021 (c) November 24, 2021

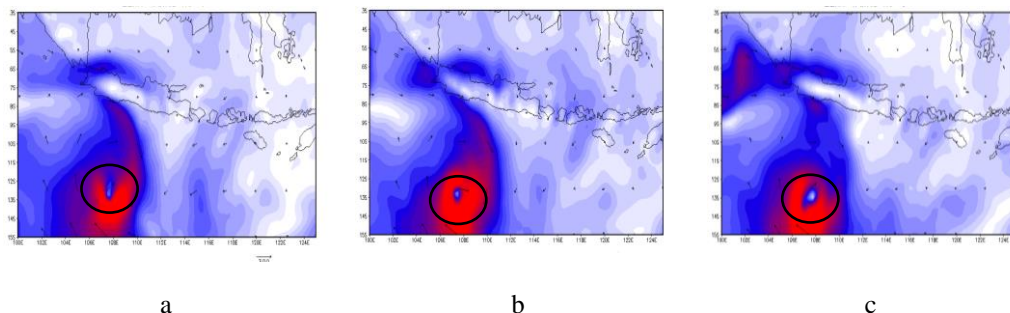
Dari gambar 2 dapat terlihat anomali suhu permukaan laut (SST) selama periode pembentukan Siklon Tropis Paddy, ini dapat diinterpretasikan bahwa kondisi SST memainkan peran yang signifikan dalam siklus hidup siklon. Pada tanggal 22 November (Panel a), terdapat anomali SST positif yang sangat tinggi di selatan Pulau Jawa, hal tersebut mencerminkan kenaikan suhu permukaan laut yang signifikan, dengan nilai anomali berkisar antara 1,0 hingga 1,8 derajat Celsius. Suhu permukaan laut yang lebih hangat ini berkisar di atas ambang 27°C yang diperlukan untuk pembentukan siklon. Kondisi ini berkontribusi menyediakan energi tambahan yang diperlukan untuk proses kondensasi uap air, yang selanjutnya memicu pembentukan awan dan presipitasi yang lebih intens (Huo et al., 2015).

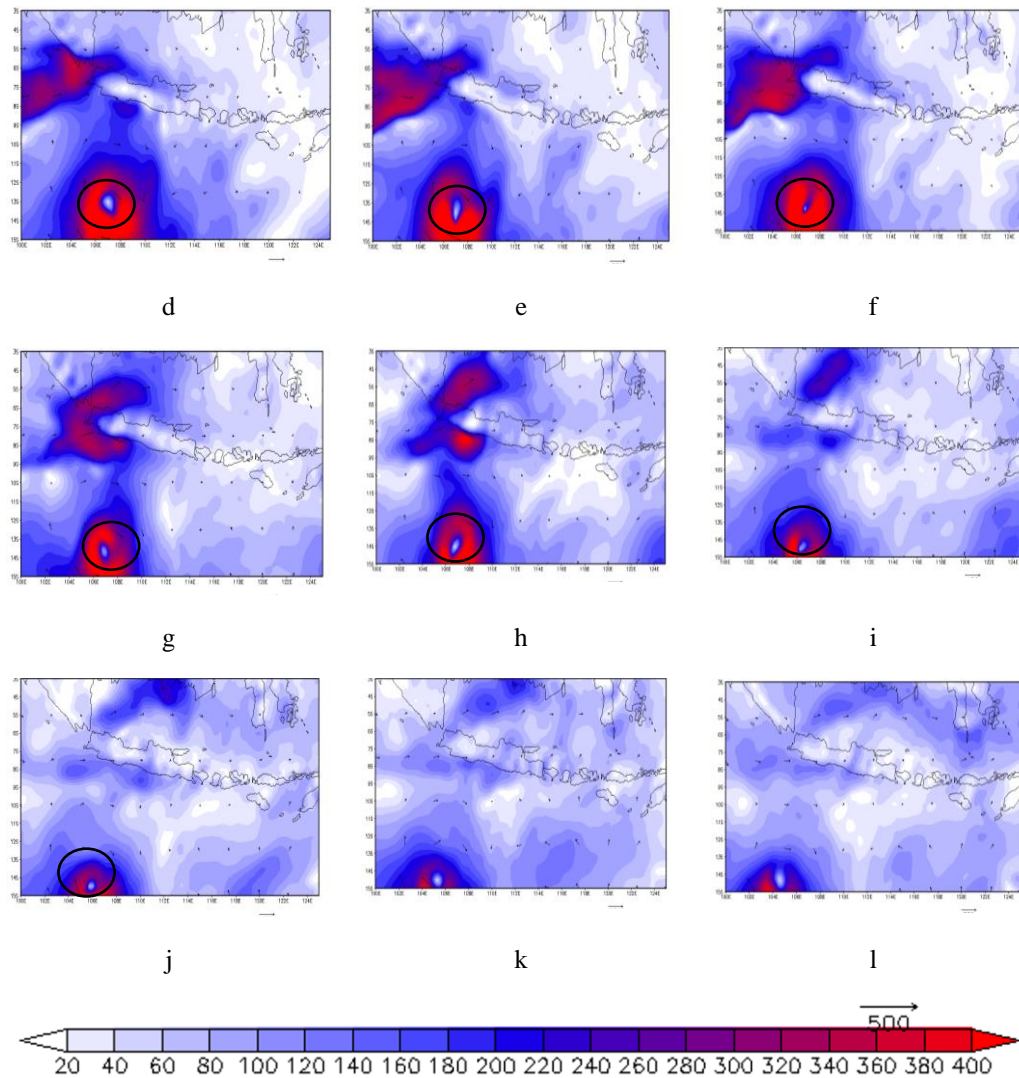
Selanjutnya, meskipun pada tanggal 23 November (Panel b) anomali SST positif masih terlihat jelas di wilayah yang sama, terdapat penurunan pada intensitas anomali tersebut. Nilai anomali SST menunjukkan penurunan ke angka 0,6 hingga 1,4 derajat Celsius. Penurunan ini mengindikasikan bahwa Siklon Paddy telah memulai proses pengambilan energi dari permukaan laut yang mengakibatkan *upwelling* lokal dan penurunan suhu permukaan laut di daerah sekitarnya.

Akhirnya, pada tanggal 24 November (Panel c), analisis menunjukkan bahwa anomali SST positif di sekitar area pembentukan siklon telah berkurang, meskipun masih terdapat anomali positif yang merata di wilayah selatan Pulau Jawa dengan nilai berkisar antara 0,2 hingga 1,0 derajat Celsius. Pengamatan ini menandakan bahwa Siklon Paddy mulai kehilangan kekuatan atau bergerak menjauh dari area ekuator yang secara bertahap mengurangi pengaruhnya pada suhu permukaan laut.

Secara keseluruhan, anomali SST yang hangat di selatan Pulau Jawa selama periode ini memiliki peran krusial dalam pembentukan Siklon Tropis Paddy dan memberikan kondisi yang kondusif untuk penguatan siklon. Namun, seiring berjalannya waktu, pengaruh siklon terhadap suhu permukaan laut menunjukkan tren penurunan yang sejalan dengan siklus siklon yang juga melemah.

Low-Level Moisture Transport (LLMT)





Gambar 3: LLMT Setiap 6 Jam: (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23, 2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

Siklon tropis adalah sistem sinoptik intens dengan transportasi kelembaban yang kuat dan dapat mencapai ketinggian tinggi. Transportasi kelembaban di lapisan rendah atau dikenal dengan *Low Level Moisture Transport* (LLMT), adalah faktor penting dalam terjadinya kejadian hujan lebat yang jauh dari tubuh utama siklon tropis (Galarneau et al., 2010; Yu et al., 2020). Gambar 3 memvisualisasikan LLMT di sekitar Pulau Jawa selama periode 22-24 November, dapat terlihat dinamika LLMT yang sangat relevan dengan perkembangan Siklon Tropis Paddy. Pada tanggal 22 November, mulai dari 00.00 UTC (Panel a) hingga 00.18 UTC (Panel d), terlihat bahwa puncak nilai LLMT yang tinggi terkonsentrasi di selatan Pulau Jawa, ini ditunjukkan oleh daerah berwarna merah intens yang menandakan transportasi kelembaban yang tinggi. Nilai-nilai LLMT ini mencapai puncak tertinggi lebih dari 320 g/cm². Hal tersebut mencerminkan kondisi yang sangat mendukung untuk konveksi atmosfer dan pembentukan awan yang intens, pada akhirnya ini dapat memicu presipitasi berintensitas tinggi di wilayah tersebut.

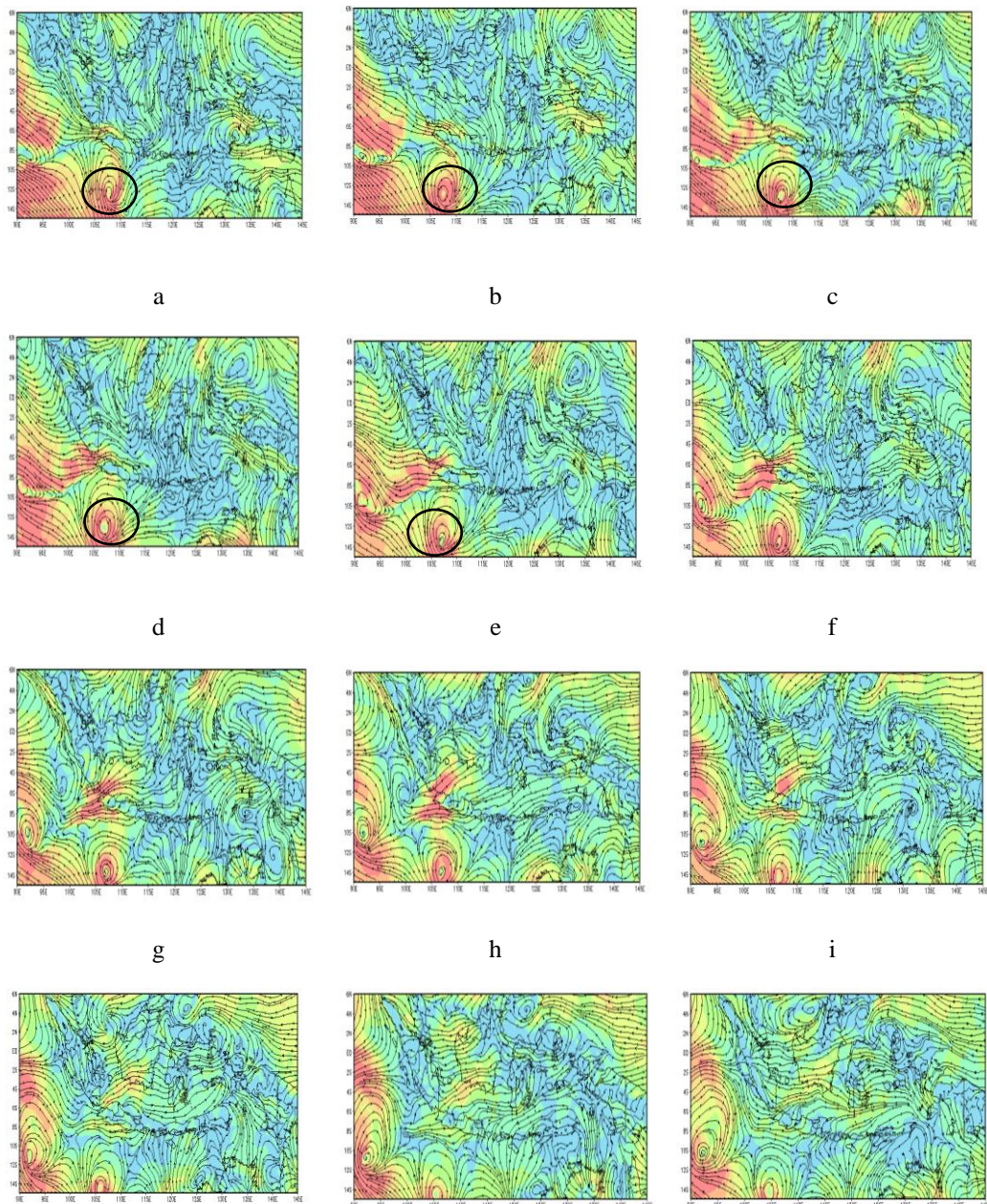
Seiring berlanjutnya siklus harian, pada tanggal 23 November 00.00 UTC (Panel e) sampai 00.18 UTC (Panel h), ada indikasi penurunan pada nilai intensitas LLMT meskipun masih ada transportasi kelembaban yang signifikan. Transportasi kelembaban masih terus berlangsung dari laut ke daratan, tetapi dengan nilai yang sedikit menurun, hal ini menandakan bahwa Siklon Paddy telah mulai

memengaruhi suhu permukaan laut dan dinamika kelembapan dengan cara yang berbeda karena proses *upwelling*.

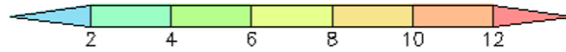
Pada tanggal 24 November dari 00.00 UTC (Panel i) hingga 18.00 UTC (Panel l), terlihat bahwa intensitas LLMT terus menurun. Meskipun masih ada aliran kelembapan di wilayah ini, distribusi dan intensitasnya berubah, hal tersebut menunjukkan bahwa Siklon Paddy telah bergerak lebih jauh dari Pulau Jawa atau kehilangan energinya. Kondisi ini mengakibatkan berkurangnya pasokan kelembapan ke atmosfer lokal dan berdampak pada menurunnya potensi presipitasi.

Melalui analisis ini, dapat dipahami bahwa Siklon Tropis Paddy diindikasikan oleh nilai LLMT yang tinggi, fluktuasi nilai LLMT secara aktif mempengaruhi dinamika cuaca di Pulau Jawa selama periode ini. Seperti yang telah dianalisis sebelumnya, suhu permukaan laut yang lebih hangat mengakibatkan anomali SST positif yang berkombinasi dengan nilai LLMT yang kuat, hal tersebut memberikan kondisi yang sangat kondusif untuk intensifikasi siklon. Namun, seiring siklon bergerak dan intensitasnya berkurang, kondisi ini juga menunjukkan tren penurunan yang pada akhirnya dapat berkontribusi pada normalisasi kondisi cuaca di Pulau Jawa pasca-peristiwa Siklon Paddy.

Streamline



j k l



Gambar 4: Arah dan Kecepatan Angin Setiap 6 Jam: (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23, 2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

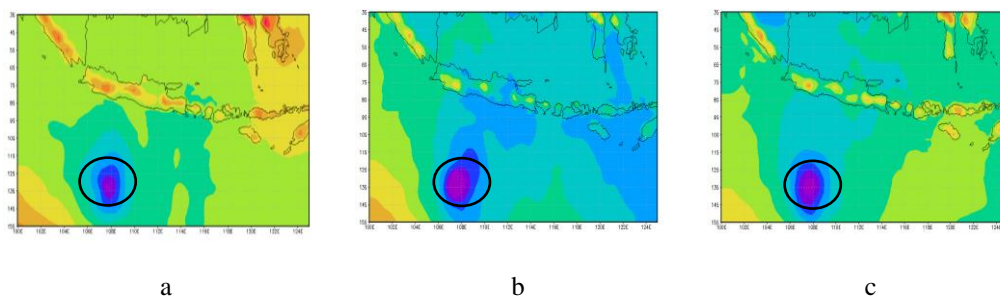
Dari Gambar 4 dapat terlihat visualisasi pola arah dan kecepatan angin setiap 6 jam pada tekanan 925 mb. Pada 22 November (Panel a-d), pola angin siklonik yang intensif terlihat di selatan Pulau Jawa, ini mengindikasikan adanya pusaran tekanan rendah yang mengindikasikan siklon tropis. Angin dalam pola ini mengalir mengelilingi pusat tekanan rendah, seringkali dengan kecepatan yang tinggi, hal ini dapat terlihat dari arah aliran angin yang rapat dan berputar. Ini menandakan adanya transportasi kelembapan yang kuat dari laut ke daratan yang berkontribusi pada peningkatan kelembapan di Pulau Jawa dan potensi hujan lebat.

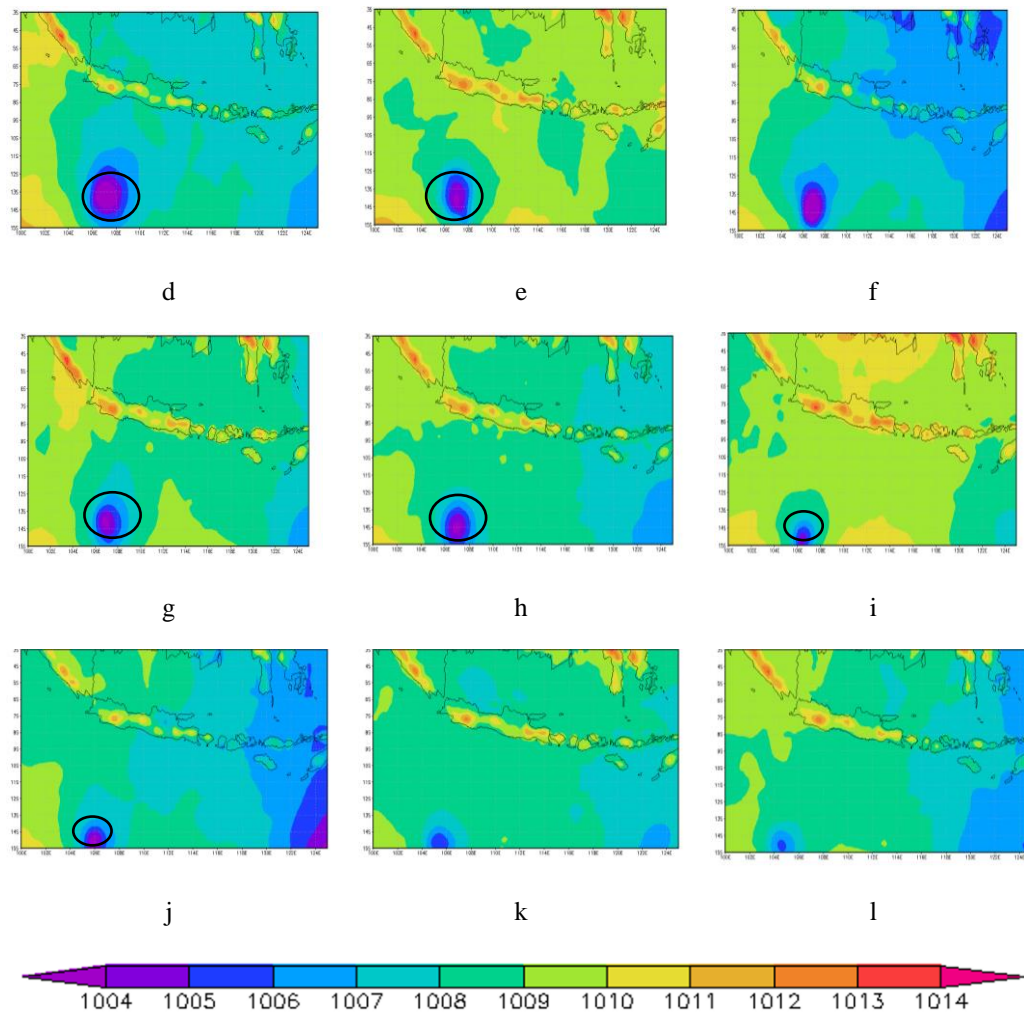
Sebagai sebuah siklon yang notabeneanya bergerak dan berkembang, pola angin pada tanggal 23 November (Panel e-h) menunjukkan perubahan posisi pusat siklon. Meskipun masih terdapat pola angin siklonik yang jelas, ada indikasi bahwa pusat siklon mulai bergeser, hal ini akan mengurangi dampak langsung dari angin siklonik dan transportasi kelembapan ke Pulau Jawa. Garis aliran angin yang mulai terpisah menunjukkan menurunnya kecepatan angin di sekitar siklon yang mengurangi kapasitas transportasi kelembapan ke daratan.

Pada 24 November (Panel i-l), dapat terlihat penurunan lebih lanjut dalam intensitas pola angin siklonik yang bergerak semakin menjauh dari Pulau Jawa. Kecepatan angin yang menurun dapat terlihat dari jarak yang lebih lebar antara garis aliran angin dan kurangnya warna merah intens yang mewakili kecepatan angin yang lebih tinggi. Penurunan ini menandakan pengaruh siklon yang melemah terhadap cuaca di Pulau Jawa yang seiring berjalannya waktu akan membawa kondisi cuaca kembali ke keadaan normal setelah peristiwa ekstrem berlalu.

Analisis kecepatan angin ini mengungkapkan bagaimana Siklon Paddy mempengaruhi transportasi kelembapan dan distribusi hujan di Pulau Jawa. Dengan Bergeraknya siklon, terjadi perubahan signifikan dalam pola cuaca yang dibawa oleh angin yang pada akhirnya menentukan kondisi cuaca lokal dan potensi presipitasi. Meskipun angin siklonik memiliki peran awal dalam membawa kelembapan yang tinggi, pergerakan siklon secara bertahap mengurangi pengaruh ini, hal tersebut dapat tercermin dalam pola angin yang berubah dan kelembapan yang menurun.

Mean Sea Level Pressure (MSPL)





Gambar 5: *Mean Sea Level Pressure* Setiap 6 Jam: (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23, 2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

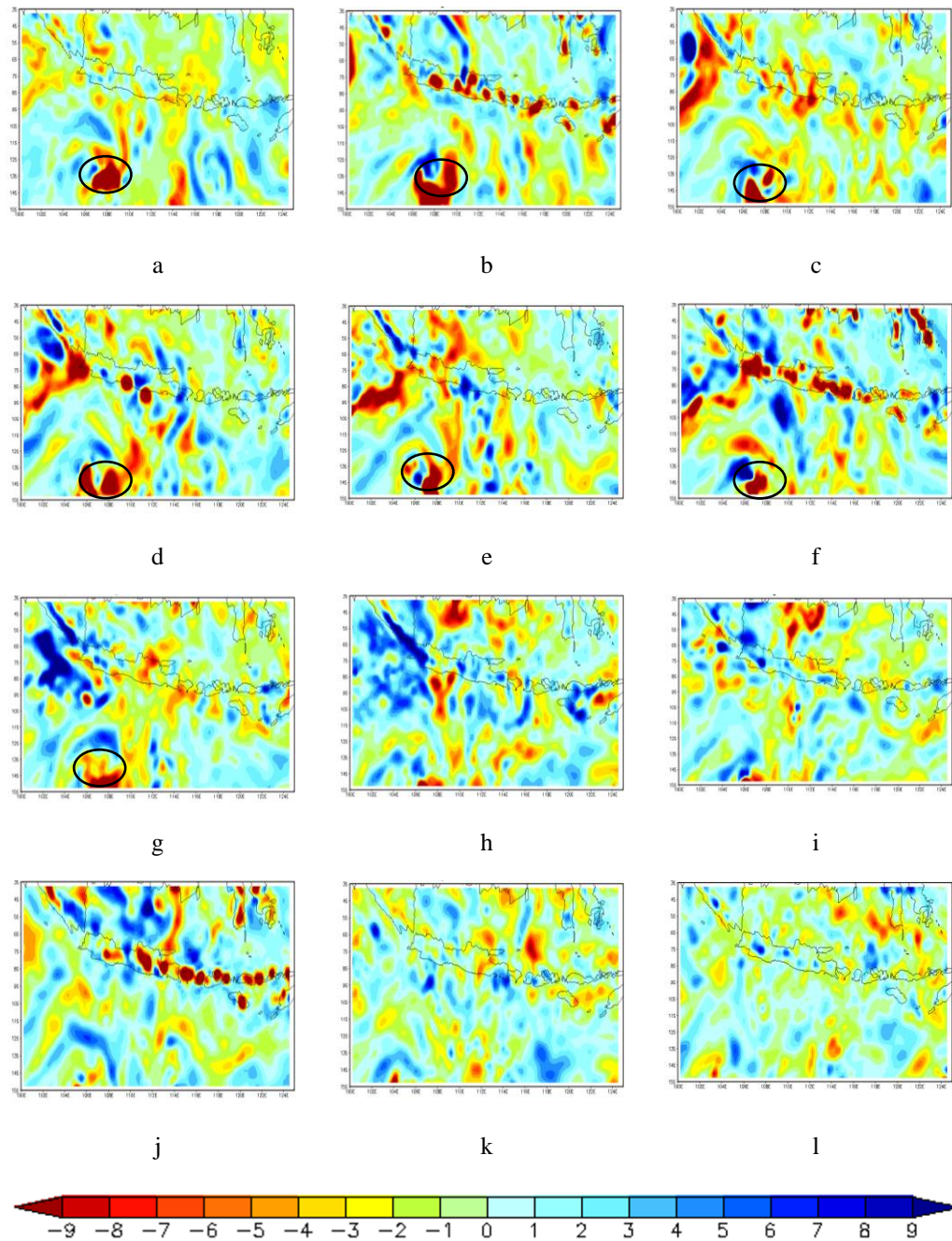
Berdasarkan Gambar 5 yang menyajikan visualisasi distribusi tekanan laut rata-rata atau yang dikenal dengan *Mean Sea Level Pressure* (MSLP) dari tanggal 22 hingga 24 November, dapat terlihat bagaimana tekanan atmosfer berkaitan dengan perkembangan Siklon Paddy. Pada tanggal 22 November, mulai dari 00.00 UTC (Panel a) hingga 00.18 UTC (Panel d), ada daerah tekanan rendah yang signifikan yang terlokalisir di selatan Pulau Jawa, ditandai dengan warna yang lebih gelap pada gambar. Area ini menandakan adanya pusat siklon dengan tekanan yang turun ke kisaran 1004 hingga 1006 mb. Penurunan tekanan ini menciptakan kondisi yang mendukung pengangkatan udara, pembentukan awan konvektif, dan presipitasi yang meningkat.

Seiring berjalannya waktu, pada tanggal 23 November (Panel e-h), siklon bergerak perlahan ke arah tenggara, hal ini diindikasikan oleh perubahan warna pada area tekanan rendah yang menjadi lebih tersebar dan sedikit meningkat. Kondisi tersebut menandakan penurunan intensitas siklon. Pergeseran ini mengurangi kekuatan angin di sekitar pusat siklon dan mengurangi transportasi kelembapan menuju Pulau Jawa yang sebelumnya menyebabkan kondisi cuaca ekstrem.

Pada tanggal 24 November (Panel i-l), MSLP di sekitar Pulau Jawa mulai stabil dengan daerah tekanan rendah yang semakin bergerak menjauh. Tekanan di area siklon tampak meningkat kembali ke nilai yang lebih normal di atas 1007 mb yang menandakan bahwa Siklon Paddy melemah dan dampaknya terhadap Pulau Jawa berkurang secara signifikan. Stabilisasi ini mengarah pada kondisi cuaca yang lebih normal di Pulau Jawa, dengan potensi hujan lebat dan angin kencang berkurang.

Dari analisis ini, dapat diambil kesimpulan bahwa dinamika MSLP merupakan faktor penting dalam memahami dan memprediksi pergerakan serta intensitas siklon tropis. Penurunan MSLP merupakan salah satu tanda diagnosa angin berkecepatan tinggi yang merupakan salah satu ciri pembentukan siklon (Atmo 336, n.d.). Sebaliknya, peningkatan tekanan menunjukkan indikasi punahnya siklon.

Divergensi LLMT



Gambar 6: Divergensi LLMT Setiap 6 Jam: (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23, 2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

Gambar 6 menyajikan analisis divergensi LLMT yang menunjukkan distribusi dan pergerakan kelembapan di atmosfer setiap enam jam dari tanggal 22 hingga 24 November 2021. Konvergensi LLMT yang diwakili oleh warna merah pada gambar memperlihatkan daerah di mana massa udara

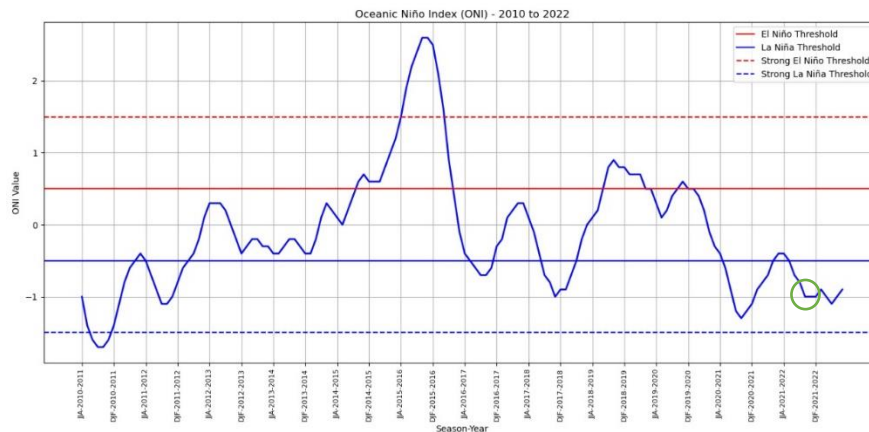
bertemu dan mengalir ke atas, hal tersebut menimbulkan kondisi yang mendukung pembentukan awan dan potensi presipitasi (Lainata et al., 2016). Sebaliknya, area biru menunjukkan divergensi LLMT yang menandakan daerah di mana massa udara menyebar dan bergerak ke bawah, hal ini seringkali dikaitkan dengan kondisi cuaca yang lebih stabil.

Pada tanggal 22 November (Panel a-c), terdapat daerah konvergensi LLMT yang signifikan di selatan Pulau Jawa, ini menunjukkan adanya intensitas kelembapan yang tinggi dan potensi pembentukan awan hujan di area tersebut. Kondisi ini berkorelasi dengan pembentukan Siklon Paddy yang diperkuat oleh angin siklonik dan anomali SST yang positif. Daerah konvergensi ini menunjukkan pembentukan awan hujan yang intensif sehingga berpotensi menyebabkan hujan lebat dan cuaca buruk.

Seiring dengan pergerakan siklon ke arah selatan pada tanggal 23 November (Panel d-h), terjadi pergeseran dalam pola konvergensi LLMT, ini menggambarkan perpindahan zona pembentukan awan dan hujan yang berkaitan dengan siklon. Hal tersebut ditunjukkan dengan penurunan area konvergensi (merah) di atas Pulau Jawa yang mengindikasikan penurunan kelembapan yang diangkut ke pulau, peristiwa ini mengarah pada penurunan intensitas hujan dan normalisasi kondisi cuaca.

Pada tanggal 24 November (Panel i-l) terlihat perubahan yang lebih jelas dari konvergensi ke divergensi LLMT. Area biru yang semakin meluas di wilayah yang sebelumnya dipengaruhi oleh siklon menandakan berkurangnya kekuatan siklon dan berkurangnya pengaruh terhadap kondisi cuaca di Pulau Jawa. Sehingga dapat diindikasikan bahwa Siklon Paddy mulai kehilangan energi atau bergerak ke area dengan kondisi yang tidak mendukung untuk mempertahankan kekuatannya. Kondisi ini pada akhirnya akan berdampak pada penurunan cuaca buruk dan pergerakan massa udara yang stabil.

Oceanic Nino Index (ONI)



Gambar 7: Grafik Oceanic Niño Index (ONI) 2010 - 2022

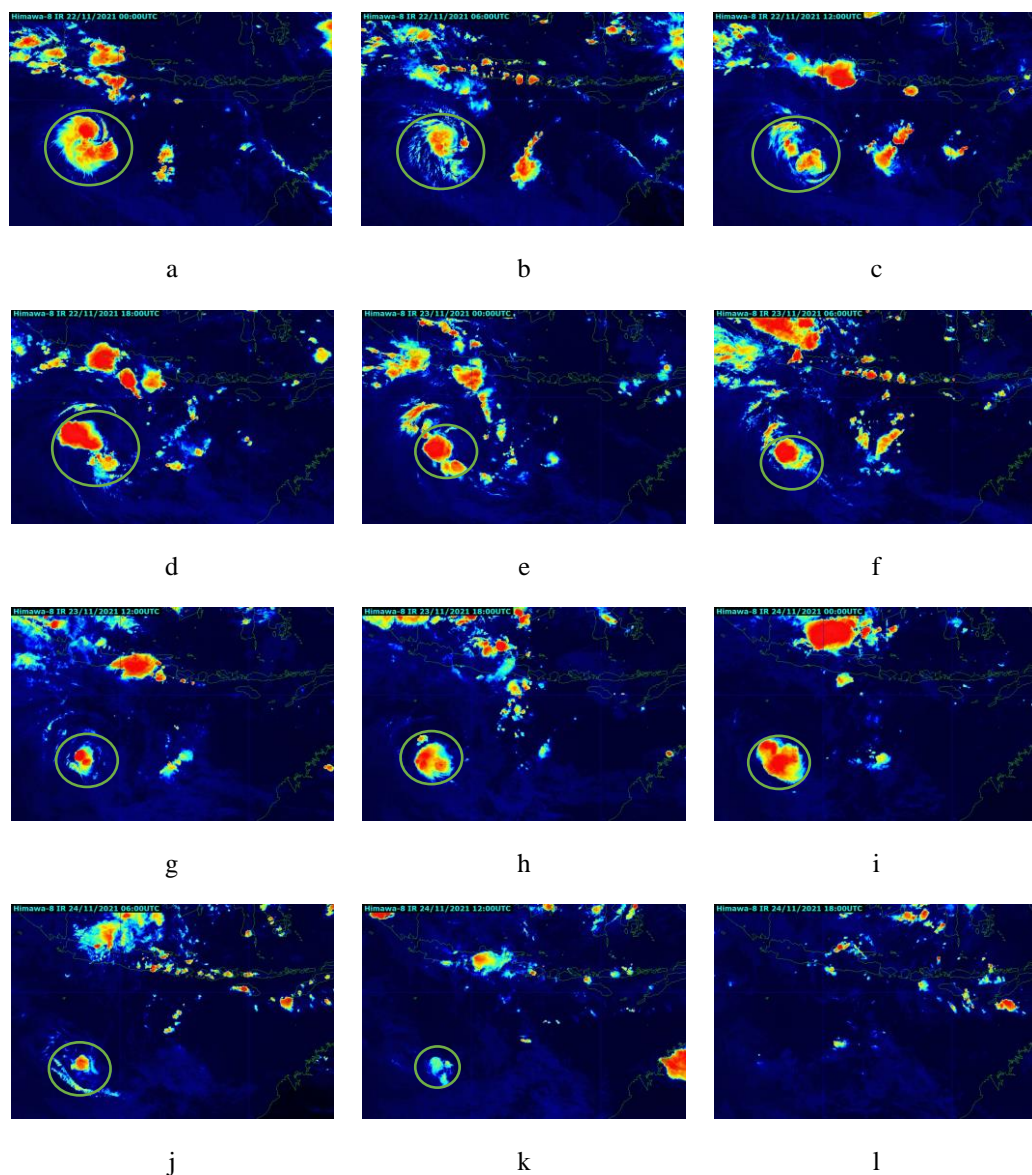
Tabel 1: Tabel Oceanic Niño Index (ONI) 2010-2022

Season	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ
2010-2011	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4
2011-2012	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1
2012-2013	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
2013-2014	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2
2014-2015	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2
2015-2016	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1
2016-2017	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3
2017-2018	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0
2018-2019	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5
2019-2020	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3
2020-2021	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4
2021-2022	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9

Berdasarkan tabel dan grafik yang bersumber dari (Golden Gate Weather Services, n.d.), terlihat bahwa pada bulan November 2021 terdapat kondisi La Niña dengan intensitas moderat, hal ini ditandai oleh indeks ONI sebesar -1,0. La Niña yang ditandai oleh pendinginan abnormal di permukaan laut di Samudera Pasifik ekuator, umumnya diasosiasikan dengan peningkatan aktivitas siklon tropis di Pasifik Barat yang dapat mencakup wilayah Indonesia (Camargo & Sobel, 2005; Du et al., 2011; Wing et al., 2007).

Dalam kondisi La Niña, perubahan pola angin dapat mempengaruhi distribusi kelembaban dan suhu di atmosfer yang berpotensi menyebabkan pembentukan awan konvektif lebih intens dan curah hujan yang lebih tinggi di wilayah tertentu (Michael, 2010; NASA, n.d.). Pada kasus Siklon Tropis Paddy, kondisi La Niña moderat pada bulan November 2021 linier dengan kondisi atmosfer yang lebih lembap dan tidak stabil di wilayah Indonesia yang dapat mendukung pembentukan dan intensifikasi siklon.

Satelit Himawari-8 (IR)



Gambar 8: Citra Satelit Himawari-8 Setiap 6 Jam: (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23,

2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

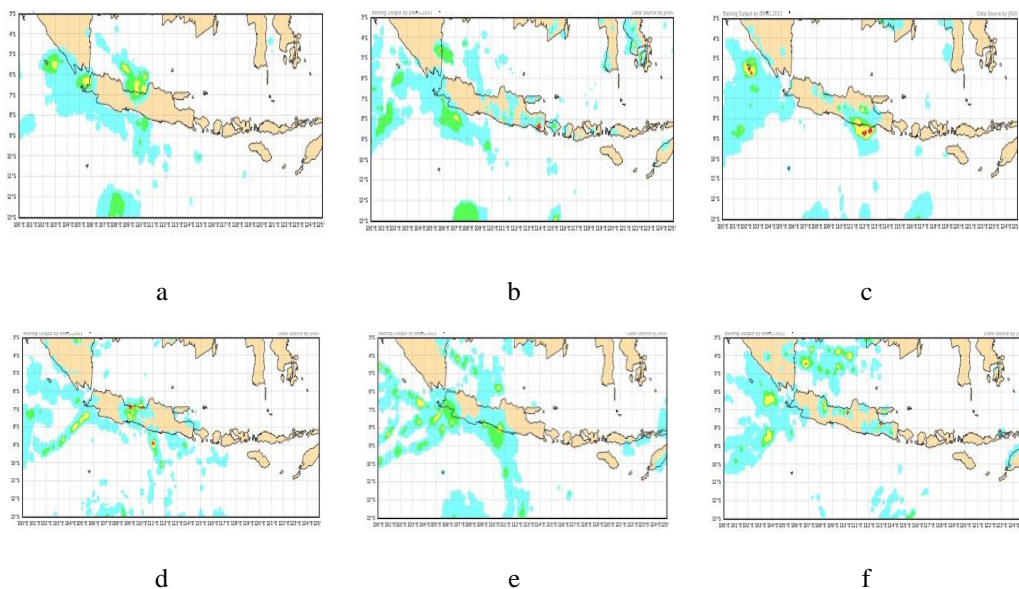
Citra satelit Himawari-8 menunjukkan pembentukan dan perkembangan Siklon Tropis Paddy di Pulau Jawa dari 22 hingga 24 November 2021. Pada awal periode ini, khususnya pada 22 November pukul 00 UTC, terdapat pembentukan awan konvektif yang signifikan dengan suhu puncak yang sangat dingin di atas Pulau Jawa, hal tersebut mengindikasikan adanya aktivitas badai yang intens. Awan konvektif ini terutama berkonsentrasi di pantai utara Jawa Tengah, sebagian timur Jawa Barat, dan wilayah barat Banten. Dengan suhu puncak mencapai $-66,3^{\circ}\text{C}$, awan ini menandakan adanya potensi hujan lebat dan angin kencang yang bisa mempengaruhi area tersebut.

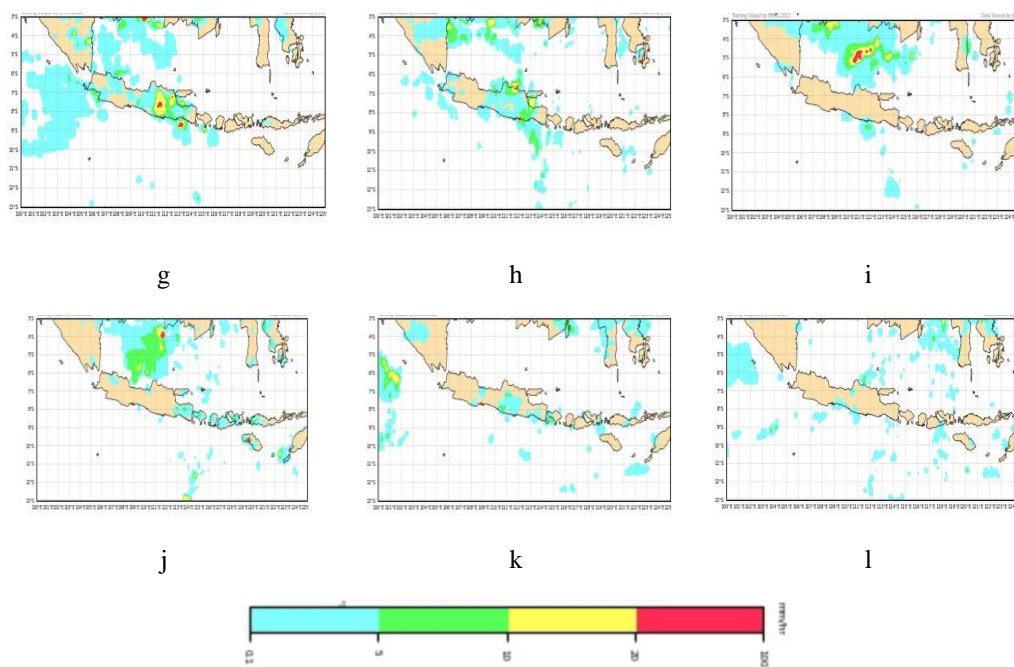
Sebelas jam berikutnya, pada pukul 12 UTC, terjadi pergeseran kondisi awan konvektif ke pantai selatan Jawa Timur, Yogyakarta, dan bagian timur Jawa Tengah dengan suhu puncak yang lebih dingin lagi, mencapai $-69,6^{\circ}\text{C}$. Ini menunjukkan intensifikasi aktivitas konvektif yang terkait dengan pendekatan atau pengaruh langsung dari Siklon Paddy. Awan dengan suhu puncak yang sangat dingin seperti ini biasanya berkorelasi dengan hujan lebat dan cuaca buruk.

Pada tanggal 23 November 00 UTC, meskipun Siklon Paddy mulai melemah, masih terlihat adanya awan konvektif yang signifikan di pantai selatan Jawa Tengah dan Yogyakarta dengan suhu puncak sekitar $-67,6^{\circ}\text{C}$. Ini menegaskan bahwa meskipun siklon mulai kehilangan kekuatan, masih ada cukup kelembapan dan energi di atmosfer untuk mendukung pembentukan awan konvektif. Kemudian pada jam 12 UTC, masih ada pertumbuhan awan yang menonjol di Jawa Tengah serta Jawa Timur dengan suhu puncak yang dingin mencapai $-77,3^{\circ}\text{C}$, hal ini menunjukkan bahwa siklon masih memiliki pengaruh yang cukup untuk menghasilkan kondisi cuaca ekstrem.

Namun, pada tanggal 24 November, baik pada jam 00 UTC maupun 12 UTC, terlihat penurunan intensitas awan konvektif. Meskipun pertumbuhan awan masih teramati di bagian timur Jawa Tengah dan barat Jawa Timur dengan suhu puncak $-74,6^{\circ}\text{C}$ dan $-75,1^{\circ}\text{C}$, keadaan ini menunjukkan bahwa pengaruh siklon telah berkurang secara signifikan. Siklon Tropis Paddy pada titik ini telah melemah dan menjauhi wilayah Pulau Jawa dan Perairan Selatan Jawa yang pada akhirnya mengakibatkan stabilitas kondisi cuaca di wilayah tersebut.

Total Presipitasi





Gambar 9: Curah Hujan Setiap 6 Jam : (a) November 22, 2021, 00.00 UTC (b) November 22, 2021, 06.00 UTC (c) November 22, 2021, 12.00 UTC (d) November 22, 2021, 18.00 UTC (e) November 23, 2021, 00.00 UTC (f) November 23, 2021, 06.00 UTC (g) November 23, 2021, 12.00 UTC (h) November 23, 2021, 18.00 UTC (i) November 24, 2021, 00.00 UTC (j) November 24, 2021, 06.00 UTC (k) November 24, 2021, 12.00 UTC (l) November 24, 2021, 18.00 UTC

Gambar 9 menampilkan total curah hujan harian selama periode aktivitas Siklon Paddy dari 22 hingga 24 November. Pada tanggal 22 November, curah hujan yang tinggi terfokus di selatan Pulau Jawa, khususnya di daerah terjadinya Siklon Paddy. Konsentrasi hujan yang signifikan ini kohesif dengan analisis sebelumnya yang menunjukkan adanya awan konvektif yang kuat, ini ditandai oleh suhu puncak awan yang sangat dingin dalam citra satelit Himawari-8 dan diperkuat oleh konvergensi LLMT serta anomali SST yang hangat.

Sejalan dengan pergerakan Siklon Paddy yang diindikasikan oleh citra satelit dan pengurangan awan konvektif dari tanggal 23 hingga 24 November 2021. Pola curah hujan mengalami perubahan yang mencerminkan siklon yang melemah dan bergerak menjauh dari kawasan tersebut. Meskipun masih ada hujan yang tercatat pada tanggal 23 November, ini terjadi dengan intensitas yang lebih rendah dan distribusi yang berbeda. Hal tersebut menunjukkan pengaruh dari siklon yang mereda. Pada tanggal 24 November terlihat penurunan total curah hujan yang linier dengan pengamatan penurunan tekanan dan pola angin yang menunjukkan bahwa Siklon Paddy menjauh dari Jawa, penurunan curah hujan ini menyimpulkan bahwa Siklon Paddy sudah menjauh dari ekuator (daerah Pulau Jawa).

KESIMPULAN

Dinamika meteorologi di Pulau Jawa selama peristiwa Siklon Tropis Paddy sangat dipengaruhi oleh kombinasi kondisi atmosfer dan oseanografi. Anomali suhu permukaan laut (SST) yang signifikan di selatan Pulau Jawa sangat penting dalam pembentukan dan intensifikasi Siklon Paddy. Hal tersebut berkontribusi menyediakan energi yang diperlukan untuk pembentukan awan konvektif sehingga menghasilkan nilai presipitasi tinggi. Siklon yang ditandai dengan pola angin siklonik yang intens memfasilitasi Transportasi Kelembapan Lapisan Rendah (LLMT) yang kuat dalam mentransportasikan kelembapan ke daerah Pulau Jawa, sehingga memberikan kontribusi signifikan pada pembentukan awan dan hujan lebat di wilayah tersebut. Hal ini terlihat dalam pergeseran pola total curah hujan yang bersamaan dengan keberadaan Siklon Paddy. Analisis Tekanan Laut Rata-Rata (MSLP) lebih lanjut memperkuat hipotesis pengaruh Siklon Paddy di Pulau Jawa, analisis ini

menunjukkan bahwa ada area tekanan rendah mencolok yang menandakan keberadaan dan pergerakan siklon. Secara khusus, citra satelit Himawari-8 menangkap siklus hidup Siklon Paddy, mulai dari perkembangannya yang ditandai dengan aktivitas awan konvektif yang signifikan hingga akhirnya melemah dan berpindah. Selain itu, pada kasus Siklon Paddy ini, kondisi La Niña moderat pada bulan November 2021 linier dengan kondisi atmosfer yang lebih lembap dan tidak stabil di wilayah Indonesia yang turut mendukung penguatan pembentukan siklon. Studi ini menyimpulkan bahwa Siklon Tropis Paddy turut dipengaruhi oleh salah satu fenomena cuaca global yaitu La Niña moderat yang pada akhirnya memiliki pengaruh substansial pada parameter meteorologi di Pulau Jawa, terutama melalui perubahan anomali SST, LLMT, pola angin, MSLP, dan total presipitasi.

REFERENSI

- Aguado, E., & E. Burt, J. (2001). *Understanding weather and climate*. Upper Saddle River.
- Atmo 336. (n.d.). *Severe Weather*.
<http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/fall10/atmo336/lectures/sec2/hurricanes.html>
- Badan Informasi Geospasial. (n.d.). *Ina Geoportal*. <https://www.big.go.id/content/produk/ina-geoportal>
- BMKG. (2024a). *GSMaP Rainrate Daily - Indonesia*.
<https://www.bmkg.go.id/satelit/satelit.bmkg?Sat=12&id=0>
- BMKG. (2024b). *Informasi Siklon Tropis*. [https://maritim.bmkg.go.id/info/39/Informasi-Siklon-Tropis#:~:text=Masa hidup suatu siklon tropis,yang dingin atau memasuki daratan.](https://maritim.bmkg.go.id/info/39/Informasi-Siklon-Tropis#:~:text=Masa%20hidup%20suatu%20siklon%20tropis,yang%20dingin%20atau%20memasuki%20daratan.)
- BPS. (2023). *Jumlah Penduduk Pertengahan Tahun (Ribuan Jiwa), 1960 - 2023*.
<https://www.bps.go.id/id>
- Camargo, S. J., & Sobel, A. H. (2005). Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18(15). <https://doi.org/10.1175/JCLI3457.1>
- Du, Y., Yang, L., & Xie, S. P. (2011). Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño. *Journal of Climate*, 24(1), 315–322. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3890.1>
- ECMWF. (2024). *ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present*.
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>
- Galarneau, T. J., Bosart, L. F., & Schumacher, R. S. (2010). Predecessor rain events ahead of tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 138(8), 3272–3297. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3243.1>
- Golden Gate Weather Services. (n.d.). *El Niño and La Niña Years and Intensities*.
<https://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Huo, L., Guo, P., Hameed, S. N., & Jin, D. (2015). The role of tropical Atlantic SST anomalies in modulating western North Pacific tropical cyclone genesis. *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2378–2384. <https://doi.org/10.1002/2015GL063184>
- JMA. (2024). *Meteorological Satellite Center of JMA*.
<https://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/index.html>
- Lainata, R. G., Tinggi, S., & Klimatologi, M. (2016). *KAJIAN KONDISI PERTUMBUHAN AWAN DAN CURAH HUJAN PADA SAAT HUJAN LEBAT MENGGUNAKAN SATELIT MTSAT DAN GSMAP (Studi Kasus Banjir di Seram Utara Tanggal 21 Februari 2015)*. 1–10.
- Michael, P. (2010). El Niño, La Niña and the southern oscillation. In *Encyclopedia of Earth*. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment.
- NASA. (n.d.). *World of Change: El Niño, La Niña, and Rainfall*.

<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/ENSO>

- NOAA. (2024). *NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset*. National Oceanic And Atmospheric Administration. <https://psl.noaa.gov/mddb2/makePlot.html?variableID=4113>
- Soerjadi, W. (2006). *Meteorologi Praktik*. Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Tjasyono, B. (2006). *Meteorologi Indonesia Volume I Karakteristik dan Sirkulasi Atmosfer*. Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Tjasyono, B. (2007). *METEOROLOGY OF THE INDONESIAN MARITIME CONTINENT*. Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Wing, A. A., Sobel, A. H., & Camargo, S. J. (2007). Relationship between the potential and actual intensities of tropical cyclones on interannual time scales. *Geophysical Research Letters*, 34(8). <https://doi.org/10.1029/2006GL028581>
- Yu, J., Gao, S., Zhang, L., Shen, X., & Guo, L. (2020). Analysis of a remote rainstorm in the yangtze river delta region caused by typhoon mangkhut (2018). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/JMSE8050345>
- Zakir, A. (2006a). *Badai Angin*.
- Zakir, A. (2006b). *Badai dan Pengaruhnya Terhadap Cuaca Buruk di Indonesia*. Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Zakir, A. (2006c). *Kajian Siklon Tropis*. Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Zakir, A. (2010). *Perspektif Operasional Cuaca Tropis*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Zakir, A. (2017). Profil Vertikal Suhu, Indeks Labilitas, Vertikal Wind Shear Selama Siklon Tropis Bakung Di Stamet Cengkareng, Padang Dan Pangkal Pinang. *Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 1–15.