



Analisis Dinamika Atmosfer Pada Kejadian Banjir, Tanah Longsor, dan Angin Kencang Di Semarang dan Demak Tanggal 13 Maret 2024

Sayful Amri*, Giarno

Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Banten, Indonesia

*)Koresponden Penulis : sayful.amri@stmkg.ac.id

Abstrak

Pada tanggal 13 Maret 2024 terjadi bencana banjir, tanah longsor, dan angin kencang di wilayah Semarang dan Demak. Bencana ini disebabkan oleh cuaca ekstrim berupa hujan ekstrim disertai badai guntur dan angin kencang. Penelitian ini bertujuan melakukan analisis menyeluruh baik faktor global, regional, maupun lokal terhadap kejadian cuaca ekstrem yang meluluhlantakkan Pantai Utara Jawa Tengah. Analisis dilakukan secara deskriptif kuantitatif, terhadap *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), *Dipole Mode* (DM), *Madden-Julian Oscillation* (MJO), *Cross-Equatorial Northerly Surge* (CENS), *Sea Surface Temperature* (SST), *Mean Sea Level Pressure* (MSLP), *streamline angin gradien*, *Low-Level Moisture Transport* (LLMT), divergensi, labilitas udara atas, fisis awan, curah hujan dan pasang surut air laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya MJO dan gelombang Rossby Ekuator meningkatkan *moisture* di wilayah Indonesia. Selain itu, adanya bibit siklon tropis 91S di perairan selatan Jawa memicu penguatan aliran monsun Asia dan menyebabkan *cross-equatorial flow* dan meningkatkan transpor kelembapan dari Laut China Selatan (LCS) ke wilayah pesisir Utara Jawa. SST yang hangat, udara atas yang labil, serta konvergensi LLMT di wilayah Semarang dan sekitarnya semakin memicu terbentuknya *Mesoscale Convective System* (MCS) yang menyebabkan hujan ekstrim yang disertai badai guntur dan angin kencang, sehingga memicu terjadinya bencana hidrometeorologi di Semarang dan Demak pada tanggal 13 Maret 2024.

Kata kunci: Banjir, Hujan Ekstrim, MCS, Tanah Longsor

Abstract

On March 13, 2024, the regions of Semarang and Demak experienced severe flooding, landslides, and strong winds. This disaster was caused by extreme weather in the form of extreme rain accompanied by thunderstorms and strong winds. This study aims to conduct a comprehensive analysis of both global, regional, and local factors of the extreme weather events that devastated the North Coast of Central Java. The analysis was carried out descriptively quantitatively, on *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), *Dipole Mode* (DM), *Madden-Julian Oscillation* (MJO), *Cross-Equatorial Northerly Surge* (CENS), *Sea Surface Temperature* (SST), *Mean Sea Level Pressure* (MSLP), *gradient wind streamlines*, *Low-Level Moisture Transport* (LLMT), *divergence*, *upper air lability*, *cloud physics*, *rainfall* and *sea tides*. The results of the study indicate that the presence of MJO and Equatorial Rossby waves increases moisture in the Indonesian region. In addition, the presence of tropical cyclone seed 91S in the southern waters of Java triggered the strengthening of the Asian monsoon flow and caused cross-equatorial flow and increased moisture transport from the South China Sea (SCS) to the northern coastal areas of Java. Warm SST, unstable upper air, and LLMT convergence in the Semarang area and its surroundings further triggered the formation of the *Mesoscale Convective System* (MCS) which caused extreme rain accompanied by thunderstorms and strong winds, triggering a hydrometeorological disaster in Semarang and Demak on March 13, 2024.

Keywords: Extreme Rain, Flooding, Landslides, MCS

Histori Artikel

Submit : 15 Mei 2024

Direvisi : 5 Juni 2024

Diterima : 10 Juli 2024

DOI : 10.33474/e-jbst.v10i1.594

Sitasi : S. Amri, Giarno. " Analisis Dinamika Atmosfer Pada Kejadian Banjir, Tanah Longsor, dan Angin Kencang di Semarang dan Demak Tanggal 13 Maret 2024," *Jurnal Ilmiah Biosaintropis* (Bioscience-Tropic), vol. 10, no. 1 pp. 77-89, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.33474/e-jbst.v10i1.594>



Pendahuluan

Kota Semarang dan Demak merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki tipe musim monsun-2, sehingga memiliki karakteristik musim hujan dan kemarau yang jelas [1]. Faktor utama yang memicu terjadinya musim di wilayah Indonesia adalah pengaruh sistem monsun Asia dan Australia [2]. Kedua wilayah ini juga dipengaruhi oleh beberapa variabilitas interannual, seperti *El-Nino Southern Oscillation* (ENSO) [3] dan *Dipole Mode* (DM) [4]. Selain itu, pengaruh variabilitas intraseasonal, seperti *Madden Jullian Oscillation* (MJO) [5] dan gangguan sinoptik seperti gelombang ekuatorial juga dapat memberikan anomali pada musim yang terjadi di kedua wilayah ini [6]. Hal ini menunjukkan kompleksitas dinamika atmosfer di wilayah Semarang dan Demak.

Anomali cuaca pada periode musim tertentu dapat menimbulkan cuaca ekstrem dan memicu bencana hidrometeorologi, seperti banjir, tanah longsor, dan angin kencang. Salah satu kasus cuaca ekstrem yang dampaknya besar adalah banjir dan tanah longsor yang terjadi di Semarang pada tanggal 13 Maret 2024. Kepala Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kota Semarang menjelaskan bahwa banjir terjadi di banyak titik di Kota Semarang dengan ketinggian hingga 80 cm [7]. Selain itu, juga terdapat 10 kejadian longsor, yaitu di Kelurahan Purwoyoso, Sendangmulyo, Bendungan, Candi, Tinjomoyo, Lemponsari, Mlatibaru, Kembangarum, dan 2 titik di Jomblang. Angin kencang juga terjadi pada kejadian hujan ekstrem tersebut, sehingga menimbulkan beberapa titik pohon tumbang dan atap rusak. Cuaca ekstrem ini juga melanda wilayah di sekitar Semarang, seperti Demak. Hujan ekstrem yang terjadi menyebabkan lima tanggul jebol di Kabupaten Demak, yaitu tanggul Klambu, Sungai Dombo, Sungai Dukuh Menawan, Sungai Dukuh Luwuk, dan Sungai Jratun. Kondisi ini menyebabkan 88 desa dan 92246 jiwa terdampak dan 12982 orang mengungsi [8].

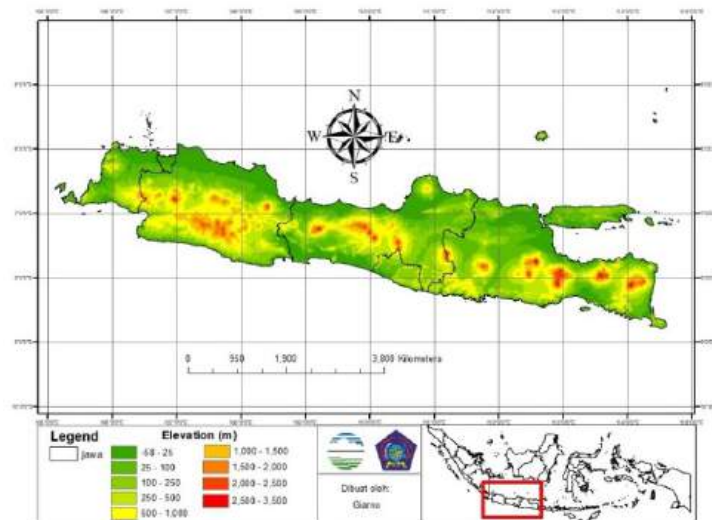
Beberapa penelitian terkait analisis dinamika atmosfer saat terjadi cuaca ekstrem di wilayah Indonesia sudah banyak dilakukan. Salah satunya adalah analisis dinamika atmosfer pada kasus banjir saat malam tahun baru 2020 di Jabodetabek [9]. Hasilnya menunjukkan bahwa terdapat gangguan sinoptik *Cross-Equatorial Northerly Surge*, sehingga meningkatkan suplai kelembapan di wilayah pesisir utara Jabodetabek dan memicu terjadinya *Mesoscale Convective System* (MCS) yang menjadi penyebab hujan ekstrem tersebut. Penelitian tersebut hanya fokus pada pengaruh CENS pada kejadian cuaca ekstrem tersebut, tanpa mengidentifikasi pengaruh gangguan sinoptik lainnya yang bisa jadi memiliki kontribusi dalam menambah potensi terbentuknya awan konvektif pada kejadian hujan ekstrem tersebut. Kajian dinamika atmosfer dengan menganalisis seluruh faktor yang mempengaruhi wilayah kajian penting untuk dilakukan, sehingga seluruh gangguan cuaca yang menjadi pemicunya teridentifikasi dengan jelas. Salah satu penelitian terkait analisis cuaca ekstrem yang sudah mempertimbangkan faktor-faktor lainnya adalah analisis citra satelit Himawari-8 pada kejadian angin kencang di Bangkalan, Madura pada tanggal 17 Oktober 2021 [10]. Namun, penelitian tersebut lebih fokus pada analisis fisis awan cumulonimbus yang menjadi penyebab angin kencang tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika atmosfer meliputi analisis pengaruh global, sinoptik dan lokal, serta fisis awan yang menjadi pemicu terjadinya hujan ekstrem yang mengakibatkan bencana banjir, tanah longsor dan angin kencang di wilayah Semarang dan Demak pada tanggal 13 Maret 2024.



Material dan Metode

Lokasi Penelitian

Wilayah kajian ini tidak hanya meliputi wilayah Semarang dan sekitarnya, namun Pulau Jawa dan sekitarnya, karena dalam analisis dinamika atmosfer dibutuhkan faktor-faktor yang mempengaruhi cuaca di wilayah Semarang dan sekitarnya. Lokasi penelitian ini mencakup wilayah dari 5°LS-10°LS dan 105°BT-115°BT yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data *Ocean Nino Index* (ONI) yang digunakan untuk mengidentifikasi fase ENSO (El Nino atau La Nina atau Netral). Data ini diperoleh dari link berikut:
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
2. Data *Indian Ocean Dipole* (IOD) yang digunakan untuk mengidentifikasi fase DM (DM positif atau DM negatif atau Netral). Data ini diperoleh dari link berikut:
<http://www.bom.gov.au/climate/enso/indices.shtml?bookmark=iod>
3. Data *Real-time Multivariate MJO* (RMM) Index yang digunakan untuk identifikasi MJO aktif di Indonesia atau tidak. Data tersebut dapat diperoleh dari link berikut:
<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealttime.txt>
4. Data anomali *Sea Surface Temperature* (SST) harian dengan resolusi spasial 0,25° x 0,25°. Data ini digunakan untuk menganalisis anomali SST di sekitar perairan Jawa Tengah. Data ini diperoleh pada link berikut:
<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>
5. Data anomali *Outgoing Longwave Radiation* (OLR) harian dengan resolusi spasial 1° x 1°. Data ini digunakan untuk menggambarkan propagasi MJO dengan diagram hovmoller. Data tersebut diperoleh dari link:
https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc_blended_olr-1deg.html
6. Data citra satelit Himawari-9 Band 13 (infrared) per-jam dengan resolusi spasial 2 km. Data ini digunakan untuk analisis fisis awan pada saat kejadian cuaca ekstrim
7. Data curah hujan Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) produk *Near Real Time* (NRT) 0.1 Gauge per-jam dengan resolusi spasial 0,1° x 0,1°. Data ini digunakan untuk analisis sebaran hujan spasial di wilayah Kota Semarang dan Demak. Data ini diperoleh dari link:
ftp://rainmap@hokusai.eorc.jaxa.jp/realtime_ver/v8/hourly_G/2024/03/13
8. Data reanalisis ERA-5 *pressure level* per-jam untuk parameter kecepatan angin zonal (u), kecepatan



angin meridional (v), dan kelembapan spesifik (q) pada lapisan 1000-825 mb. Data ini memiliki resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ dan data ini dapat diperoleh pada link:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form>

9. Data reanalisis ERA-5 *single level* per-jam untuk parameter *mean sea level pressure* (mslp), *convective available potential energy* (CAPE), k-indeks, dan total-total indeks. Data ini juga memiliki resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ dan dapat diperoleh pada link:

<https://cds-beta.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>

10. Data curah hujan dari Stasiun Meteorologi Ahmad Yani Semarang tanggal 13 Maret 2024

11. Data pasang surut air laut dari Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Emas Semarang pada tanggal 12-13 Maret 2024.

Alat Penelitian

Software yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. FileZilla yang digunakan untuk mendownload ftp data GSMap dan citra satelit Himawari-9
2. *Climate Data Operators* (CDO) yang digunakan untuk mengolah data dengan format netcdf.
3. *Grid Analysis dan Display System* (GrADS) yang digunakan untuk membuat peta hasil pengolahan data yang telah diolah menggunakan CDO.
4. *Satellite Animation and Interactive Diagnosis* (SATAID) yang digunakan untuk analisis fisis awan.

Metode

Metode penelitian yang digunakan ialah metode analisis deskriptif kuantitatif terhadap faktor global hingga lokal yang mempengaruhi wilayah kajian. Analisis terhadap faktor global pada penelitian ini dengan cara mengidentifikasi variabilitas interannual berupa ENSO dan DM menggunakan data indeks ONI dan IOD. Adapun identifikasi MJO menggunakan data RMM dengan kriteria MJO aktif jika nilai amplitudo $RMM \geq 1$ minimal dalam 25 hari secara berturut-turut, fase MJO harus secara berurutan dari barat ke timur, dan MJO aktif tidak boleh bertahan pada satu fase selama lebih dari 20 hari [11]. Analisis hovmoller terhadap anomali OLR juga dilakukan untuk menganalisis propagasi konvektif MJO atau gelombang ekuatorial di wilayah Indonesia. Selanjutnya dilakukan analisis anomali SST dan *Cross-Equatorial Northerly Surge* (CENS) untuk mengkaji peningkatan transpor kelembapan di wilayah kajian. CENS terjadi jika nilai kecepatan angin meridional kurang dari -5 m/s di wilayah 5°LS -Ekuator dan 105° - 115°BT . Kemudian, analisis MSLP, dan *streamline* angin gradien untuk menganalisis potensi terjadinya siklon tropis di sekitar wilayah kajian. Selanjutnya, untuk mengkaji pengaruh monsun, maka dilakukan analisis *low-level moisture transport* (LLMT) serta divergensinya di wilayah kajian. Analisis LLMT dihitung dengan Persamaan 1 [12] dengan menggunakan perintah *vertical Integral* (VINT) pada perangkat lunak GrADS. Perintah tersebut digunakan untuk menghitung vertikal integral dari suatu variabel melalui berbagai level tekanan dalam data tiga dimensi.

$$Q = \frac{1}{g} \int_{pt}^{ps} q V dp \dots\dots\dots (1)$$

Q merupakan LLMT ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$), g merupakan percepatan gravitasi bumi (ms^{-2}), ps adalah ketinggian isobar permukaan (1000 mb), pt merupakan ketinggian isobar 825 mb, dan q merupakan kelembapan spesifik (gkg^{-1}). Adapun V merupakan vektor angin zonal meridional (ms^{-1}) dan dp perubahan ketinggian isobar (mb). Selanjutnya, analisis divergensi LLMT dihitung berdasarkan Persamaan 2 dengan menggunakan metode *finite difference*, yaitu perintah *HDIVG* pada aplikasi GrADS. Nilai divergensi negatif mengindikasikan terjadi konvergensi LLMT pada wilayah tersebut. $\nabla_H \vec{q}\vec{v}$ merupakan divergensi horizontal transpor kelembapan ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$), qu adalah komponen transpor zonal (ms^{-1}) dan qv merupakan komponen transpor meridional (ms^{-1}).

$$\nabla_H \vec{q}\vec{v} = \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$



Selanjutnya, analisis labilitas udara menggunakan analisis CAPE, k-indeks, dan total-total indeks. Kriteria labilitas udara dari masing-masing indeks tersebut ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria labilitas udara dari CAPE, k-Indeks, dan total-total indeks [13]

CAPE	Stabilitas	K- Indeks	Potensi Badai Guntur	Total-total Indeks	Potensi Badai Guntur
0	Stabil	<20	Lemah	44	Badai Guntur
0 – 1000	Labil Ringan	20-35	Sedang	50	Badai Guntur Kuat
1000 – 2500	Labil Sedang	> 35	Kuat	≥ 55	Tornado
2500 – 3500	Sangat Labil				
> 3500	Labil Ekstrem				

Kemudian, analisis fisis awan cumulonimbus yang menjadi penyebab hujan ekstrem menggunakan analisis spasial distribusi awan konvektif dari data citra satelit Himawari-9 band 13 (infrared). Selain itu, analisis *time series* suhu puncak awan menggunakan SATAID. Selanjutnya, analisis *time series* tinggi pasang surut air laut untuk melihat faktor selain dinamika atmosfer yang terkait dengan banjir ROB yang sering terjadi di Semarang. Kemudian, analisis curah hujan stasiun dan spasial di wilayah kajian.

Hasil dan Diskusi

Analisis El-Nino Southern Oscillation (ENSO) dan Dipole Mode (DM)

Hasil identifikasi ENSO pada tanggal 13 Maret 2024 menunjukkan bahwa nilai ONI sebesar 1,1, sehingga ENSO berada pada fase El Nino Sedang (Tabel 2). Adapun nilai IOD sebesar 0,5, sehingga DM positif. Oleh karena itu, kedua fase ENSO dan DM tersebut justru mengurangi suplai kelembapan di wilayah Indonesia, sehingga ENSO dan DM tidak merupakan faktor yang berkontribusi pada kejadian hujan ekstrem di Semarang dan Demak pada tanggal 13 Oktober 2024.

Tabel 2. *Ocean Nino Index* (ONI) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) pada tanggal 13 Maret 2024

Indeks	Nilai	Keterangan
ONI	1,1	El Nino Sedang
IOD	0,5	DM positif

Analisis Madden Jullian Oscillation (MJO)

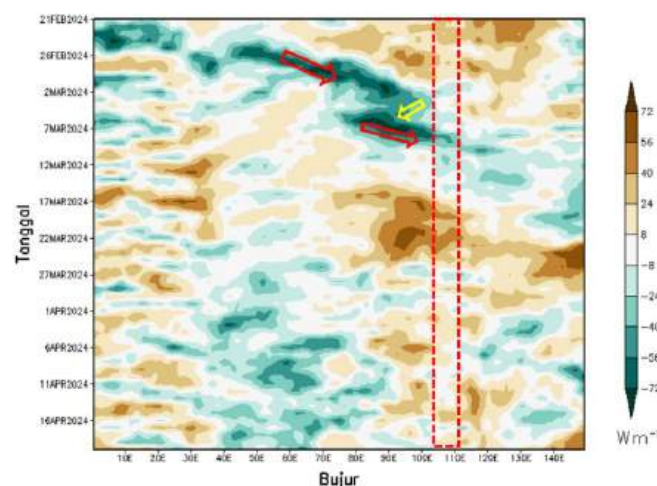
Hasil identifikasi MJO yang ditunjukkan oleh Tabel 3 diperoleh bahwa nilai amplitudo RMM ≥ 1 dari tanggal 28 Februari 2024 hingga 10 April 2024, serta nilai fase MJO berurutan. Data tersebut menunjukkan bahwa pada rentang waktu tersebut MJO dalam kondisi aktif selama 43 hari dan berpropagasi ke timur. Pada tanggal kejadian cuaca ekstrem di wilayah Semarang dan Demak, yaitu pada tanggal 13 Maret 2024, konvektif MJO aktif berada di fase 5, sehingga konvektif MJO berada di wilayah Indonesia.

Diagram hovmoller anomali OLR yang ditunjukkan oleh Gambar 2 dengan meratakan lintang dari 7.5°LS-7.5°LU menunjukkan adanya propagasi anomali negatif OLR $< -55 \text{ Wm}^{-2}$ dari wilayah Samudera Hindia di sekitar 40°BT dan terus berpropagasi ke timur dan masuk wilayah Indonesia hingga bujur 130°BT. Nilai anomali negatif OLR tersebut menunjukkan bahwa nilai radiasi gelombang panjang yang diterima oleh satelit lebih rendah dibandingkan klimatologisnya, sehingga mengindikasikan adanya peningkatan distribusi awan konvektif jika dibandingkan klimatologisnya[14]. Sistem awan konvektif tersebut merupakan konvektif MJO karena berpropagasi ke timur yang ditunjukkan oleh panah merah pada Gambar 2. Pada awal bulan Maret 2024, konvektif MJO mulai masuk ke wilayah Indonesia bagian Barat dan berada di wilayah Indonesia hingga tanggal 14 Maret 2024. Selain itu, terdapat propagasi konvektif ke barat di tanggal 1 Maret 2024 sampai 7 Maret 2024 yang ditunjukkan oleh panah warna kuning merupakan sistem konvektif dari Gelombang Rossby Ekuator. Kondisi tersebut

semakin meningkatkan suplai uap air di wilayah Indonesia, sehingga meningkatkan potensi terbentuknya awan konvektif yang menjadi penyebab hujan ekstrim tersebut.

Tabel 3. Amplitudo RMM dan Fase MJO tanggal 21 Februari 2024 – 20 April 2024 (warna hijau menunjukkan amplitudo RMM ≥ 1).

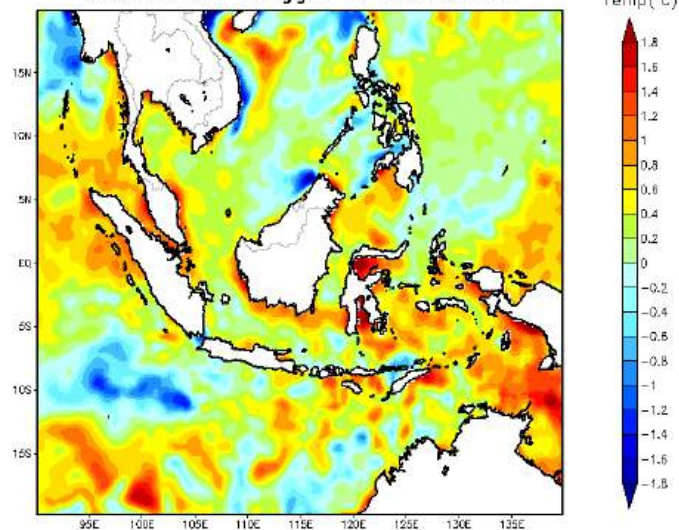
Tanggal	RMM	Fase	Tanggal	RMM	Fase	Tanggal	RMM	Fase
2/21/2024	0.13	5	3/12/2024	2.57	5	4/1/2024	1.16	2
2/22/2024	0.34	6	3/13/2024	2.69	5	4/2/2024	1.29	2
2/23/2024	0.38	6	3/14/2024	2.57	5	4/3/2024	1.24	2
2/24/2024	0.13	7	3/15/2024	2.64	6	4/4/2024	1.26	3
2/25/2024	0.12	3	3/16/2024	2.85	6	4/5/2024	1.18	3
2/26/2024	0.34	3	3/17/2024	2.96	6	4/6/2024	1.11	3
2/27/2024	0.72	3	3/18/2024	2.87	6	4/7/2024	1.36	4
2/28/2024	1.09	3	3/19/2024	2.77	7	4/8/2024	1.30	4
2/29/2024	1.36	3	3/20/2024	2.48	7	4/9/2024	1.38	4
3/1/2024	1.67	3	3/21/2024	2.04	7	4/10/2024	1.12	4
3/2/2024	1.94	3	3/22/2024	1.64	8	4/11/2024	0.83	4
3/3/2024	1.91	3	3/23/2024	1.86	8	4/12/2024	0.75	4
3/4/2024	1.98	3	3/24/2024	2.11	1	4/13/2024	0.55	4
3/5/2024	2.32	4	3/25/2024	2.03	1	4/14/2024	0.52	4
3/6/2024	2.63	4	3/26/2024	1.75	1	4/15/2024	0.27	5
3/7/2024	2.77	4	3/27/2024	1.48	1	4/16/2024	0.17	7
3/8/2024	2.75	4	3/28/2024	1.23	1	4/17/2024	0.28	1
3/9/2024	2.55	4	3/29/2024	1.38	1	4/18/2024	0.40	1
3/10/2024	2.48	4	3/30/2024	1.42	1	4/19/2024	0.54	2
3/11/2024	2.28	4	3/31/2024	1.36	1	4/20/2024	0.80	2



Gambar 2. Diagram Hovmoller anomali OLR dengan rata-rata lintang 7.5°LS-7.5°LU dari tanggal 21 Februari 2024 hingga 20 April 2024 dalam satuan $W m^{-2}$. Garis putus-putus merah menunjukkan bujur Pulau Jawa. Panah merah mengindikasikan propagasi konvektif MJO, sedangkan panah kuning menunjukkan propagasi konvektif ke barat dari Gelombang Rossby Ekuator.

Analisis Anomali Sea Surface Temperature

Anomali SST Tanggal 13 Maret 2024

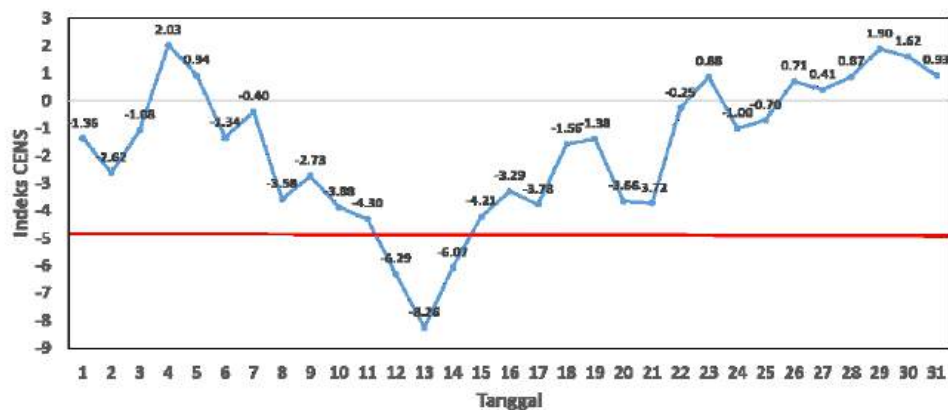


Gambar 3. Peta anomali SST harian Tanggal 13 Maret 2024 dalam °C.

Gambar 3 menunjukkan bahwa anomali SST positif terjadi di sebagian besar perairan di Indonesia. Anomali positif SST juga terjadi di Laut Jawa, yaitu sebesar 1°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada tanggal 13 Maret 2024, SST di perairan Jawa lebih hangat dibandingkan klimatologisnya, sehingga penguapan di perairan tersebut lebih tinggi dibandingkan klimatologisnya. SST di permukaan laut sekitar Sumatera dan Jawa mendukung terbentuknya awan konvektif yang menjadi penyebab hujan ekstrem [15], sebagaimana kejadian hujan ekstrem pada tanggal 13 Maret 2024.

Analisis Cross-Equatorial Northerly Surge (CENS)

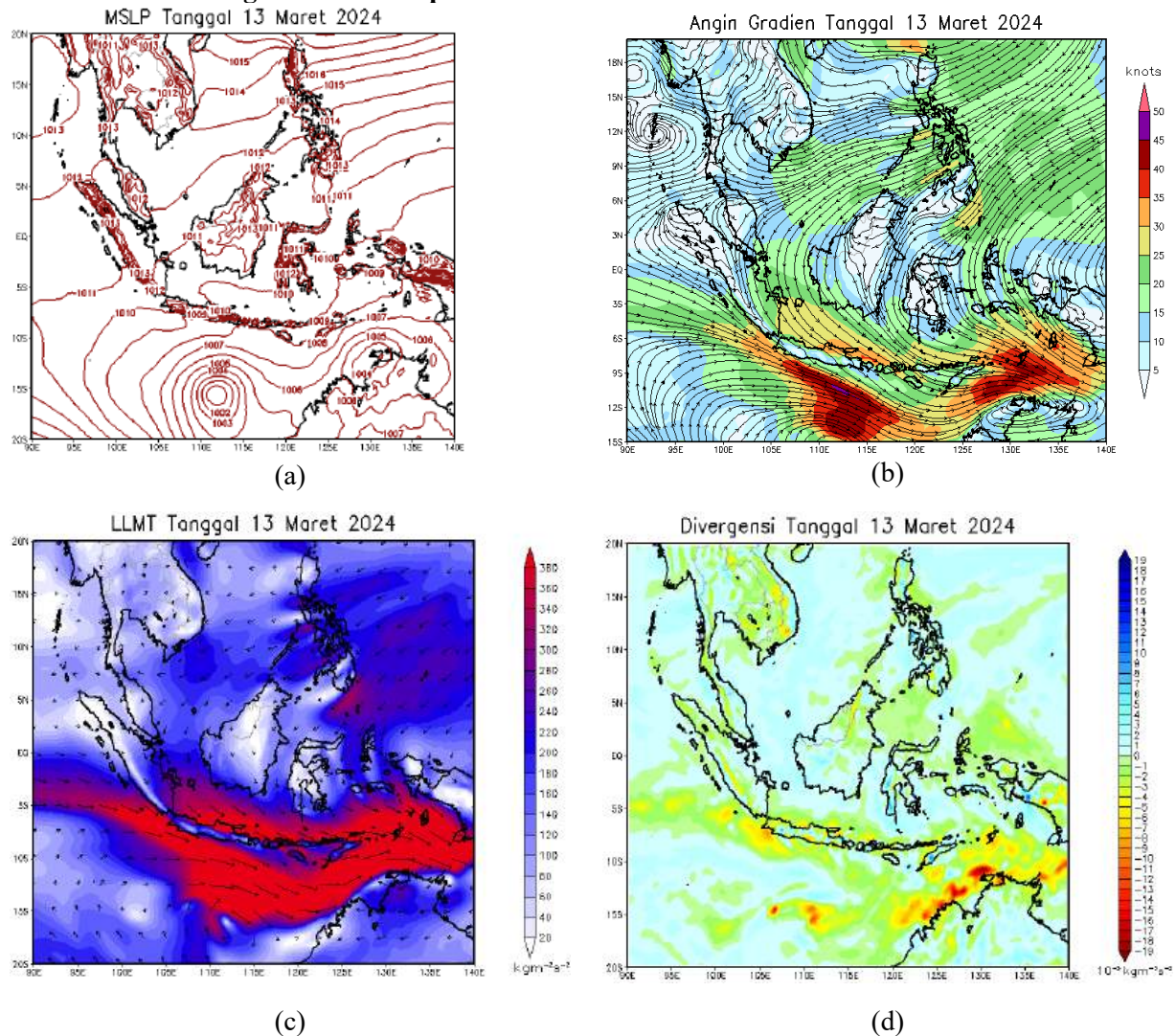
Indeks CENS Bulan Maret 2024



Gambar 4. Peta Indeks CENS Bulan Maret 2024 dalam m/s. Garis merah menunjukkan threshold CENS aktif.

Gambar 4 menunjukkan bahwa dari tanggal 12 Maret 2024 hingga 14 Maret 2024 nilai indeks CENS kurang dari -5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin utara di wilayah CENS (5°LS-Ekuator dan 105°-115°BT) lebih dari 5 m/s, sehingga menunjukkan adanya *cross-equatorial flow* yang kuat. Kondisi dapat memperkuat aliran monsun Asia, sehingga wilayah pesisir Utara Jawa mendapatkan transpor kelembapan yang besar dari Laut Cina Selatan (LCS) (Gambar 5c). Fenomena ini biasanya berdampak pada wilayah pesisir utara Jawa [16] Adanya *cross-equatorial flow* yang kuat ini semakin menambah potensi terbentuknya awan konvektif yang menjadi penyebab hujan ekstrem di wilayah Semarang dan sekitarnya.

Analisis Faktor Regional dan Sinoptik



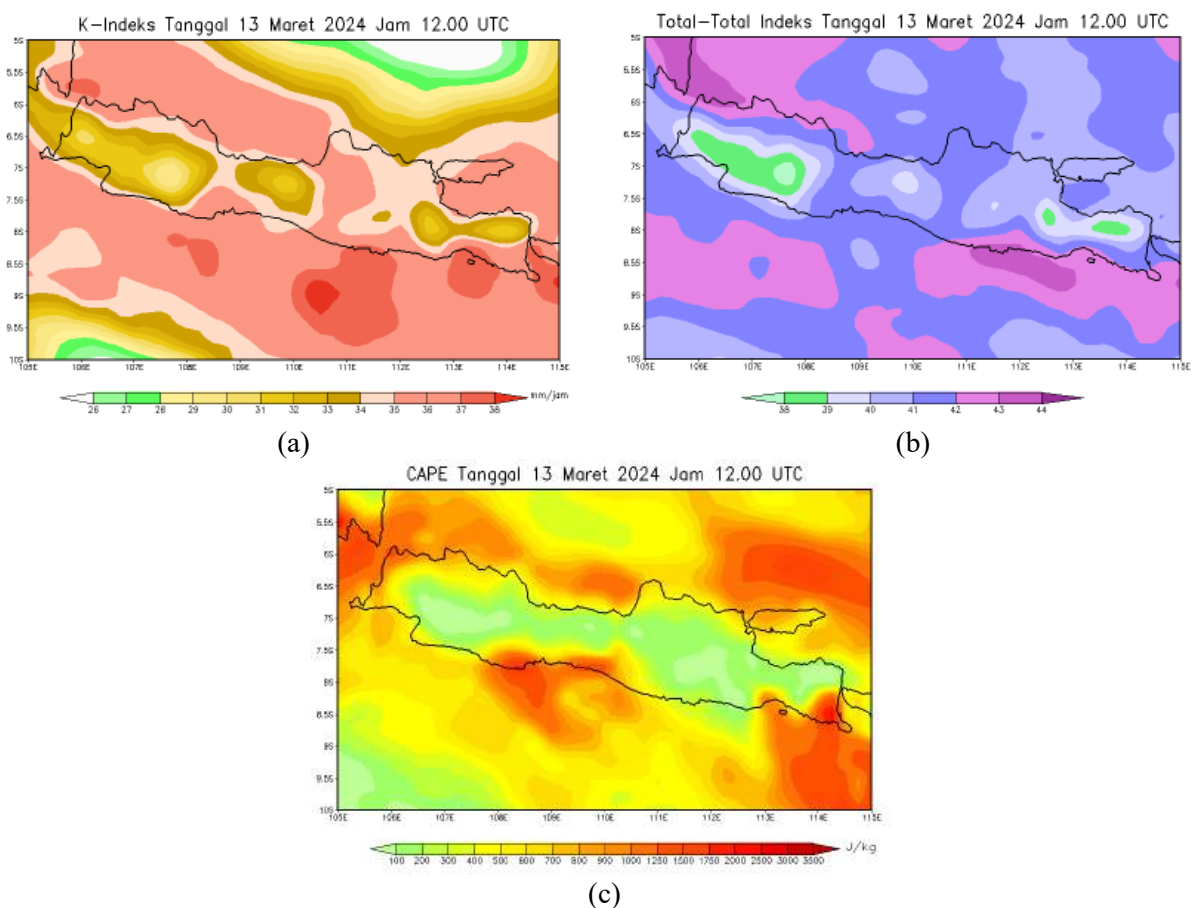
Gambar 5. Peta spasial rata-rata harian tanggal 13 Maret 2024 untuk parameter MSLP dalam mb (a), streamline angin gradien (level 925 mb) dalam knots (b), LLMT dalam $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ (c), dan divergensi LLMT dalam $10^{-5} \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ (d)

Pada tanggal 13 Maret 2024, terdapat pusat tekanan rendah di perairan Selatan Jawa, dengan nilai MSLP sebesar 1001 mb (Gambar 5a). Berdasarkan data *Tropical Cyclone Warning Center* (TCWC) Jakarta pada tanggal 13 Maret 2024 tersebut merupakan bibit siklon tropis 91S. Kondisi ini memicu penguatan angin meridional ke Selatan ekuator, sehingga pada tanggal 12 Maret 2024 hingga 14 Maret 2024 terdeteksi gangguan sinoptik berupa CENS (Gambar 4). Pola angin gradien pada tanggal 13 Maret 2024 juga menunjukkan bahwa wilayah Indonesia masih dominan dipengaruhi oleh aliran monsun Asia (Gambar 5b), dimana wilayah Jawa dan sekitarnya arah anginnya dari Barat Laut. Pada wilayah perairan Selatan Jawa terdapat kecepatannya mencapai 45-50 knots. Hal ini disebabkan oleh adanya bibit siklon tropis 91S di wilayah tersebut. Kondisi dimana aliran monsun Asia masih dominan disertai dengan penguatan *cross-equatorial flow* karena adanya bibit siklon tropis tersebut menyebabkan wilayah pesisir Utara Jawa mendapatkan transpor kelembapan dari LCS dengan nilai lebih dari $380 \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ (Gambar 5c). Selain itu, di pesisir Utara Jawa Tengah, termasuk Semarang dan sekitarnya terjadi konvergensi sebesar $7 \times 10^{-5} \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ (nilai divergensi = $-7 \times 10^{-5} \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$). Kondisi ini semakin memicu potensi terbentuknya awan konvektif, sehingga menyebabkan hujan ekstrim di wilayah Semarang dan sekitarnya.



Analisis Labilitas Udara Atas

Berdasarkan data pengamatan udara permukaan stasiun meteorologi Ahmad Yani Semarang, hujan ekstrim terjadi pada tanggal 13 Maret 2024 pukul 12 UTC. Oleh karena, labilitas udara atas di wilayah Semarang dianalisis menggunakan 3 indeks labilitas udara pada pukul 12 UTC, yaitu k-indeks, total-total indeks, dan CAPE (Gambar 6). Nilai k-indeks di wilayah Semarang pada tanggal 13 Maret 2024 pukul 12 UTC sebesar 35-36 (Gambar 6a), sedangkan nilai total-total indeksnya sebesar 42 (Gambar 6b). Kondisi ini menunjukkan bahwa potensi terbentuknya badai guntur kuat. Selain itu, nilai CAPE di wilayah Semarang dan sekitarnya berkisar 1000-1250 J/kg. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi udara atas di wilayah Semarang labil, sehingga dari analisis lokal dari labilitas udaranya mendukung potensi terbentuknya awan konvektif di wilayah dan sekitarnya.

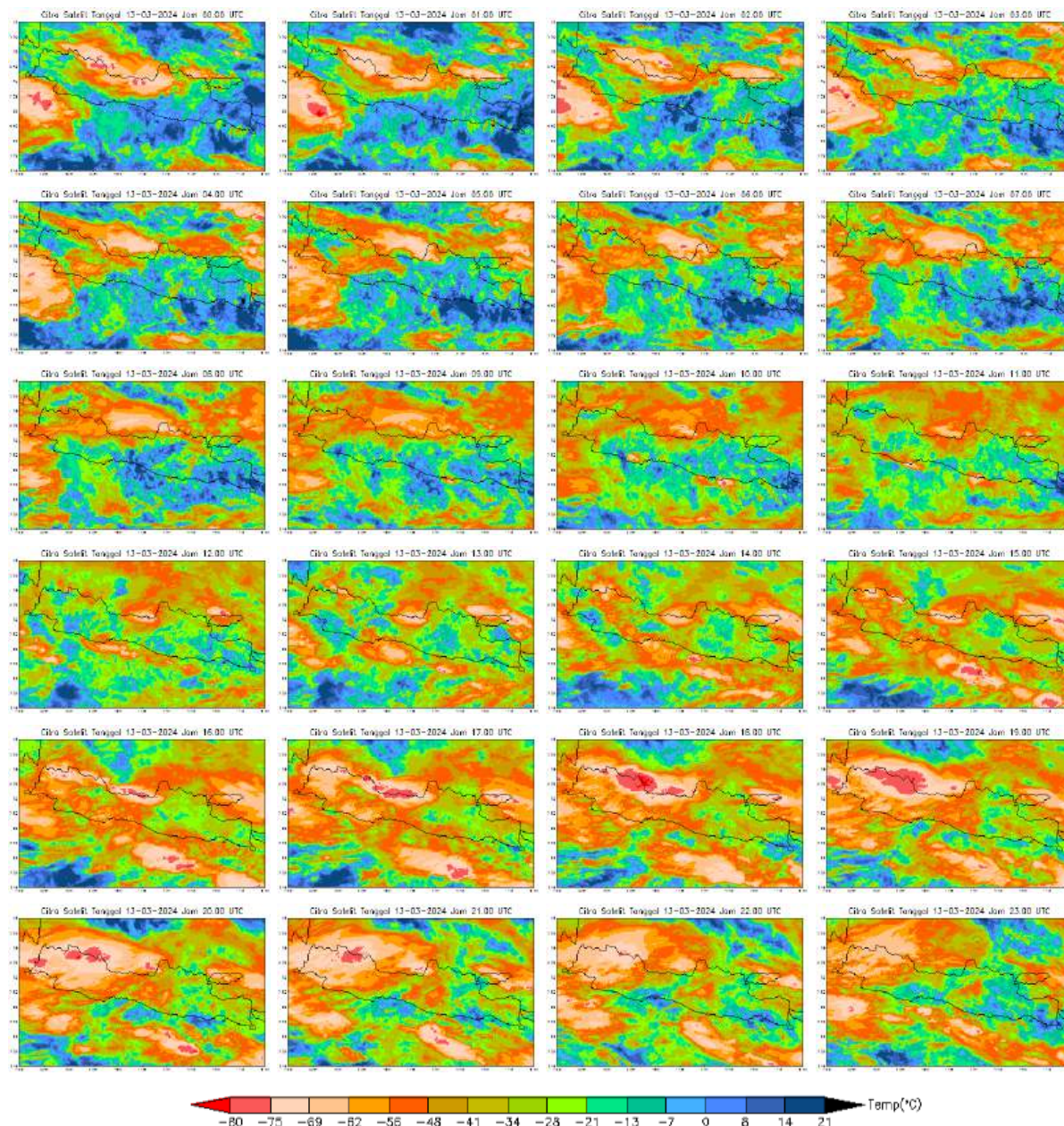


Gambar 6. Peta indeks stabilitas udara atas tanggal 13 Maret 2024 jam 12 UTC yaitu k-indeks (a), total-total indeks (b), dan CAPE (c)

Analisis Fisis Awan

Gambar 7 menunjukkan citra satelit Himawari-9 band 13 (infrared) pada tanggal 13 Maret 2024 dari pukul 00 UTC (07.00 WIB) hingga 23 UTC (tanggal 14 Maret 2024 pukul 06.00 WIB). Sesuai dengan data pengamatan udara permukaan Stasiun Meteorologi Ahmad Yani Semarang yang menunjukkan bahwa hujan terjadi di sepanjang hari pada tanggal 13 Maret 2024, sebaran awan dari citra satelit tersebut juga terlihat dari pukul 00-23 UTC. Sebaran awan konvektif yang termasuk dalam *Mesoscale Convective System* (MCS) sudah terlihat dari pukul 00 UTC di wilayah pesisir utara Jawa Tengah. MCS tersebut terus bertahan hingga pukul 10 UTC, MCS tersebut mulai melemah. Namun, adanya mekanisme *cold pool* pada MCS memicu terbentuknya MCS baru pada pukul 11 UTC di wilayah Semarang dan sekitarnya. Nilai *Temperature Black Body* (TBB) yang menunjukkan suhu puncak awan pada MCS ini hingga mencapai -80°C . Nilai tersebut di atas nilai rata-ratanya, sehingga

menunjukkan bahwa awan cumulonimbus (CB) yang terbentuk adalah *deep convective*. Hasil pengolahan menggunakan SATAID menunjukkan bahwa pada pukul 12 UTC tinggi puncak awan mencapai ketinggian 52499 *feet* atau 15986 meter. Ketinggian puncak awan CB ini mencapai ketinggian *tropopause*, dimana rata-rata ketinggian *tropopause* di wilayah tropis adalah 16 km. MCS ini terus bertahan di wilayah Semarang dan sekitarnya hingga pukul 22 UTC dan selanjutnya MCS tersebut sudah mulai bergeser ke wilayah Jawa bagian Barat.

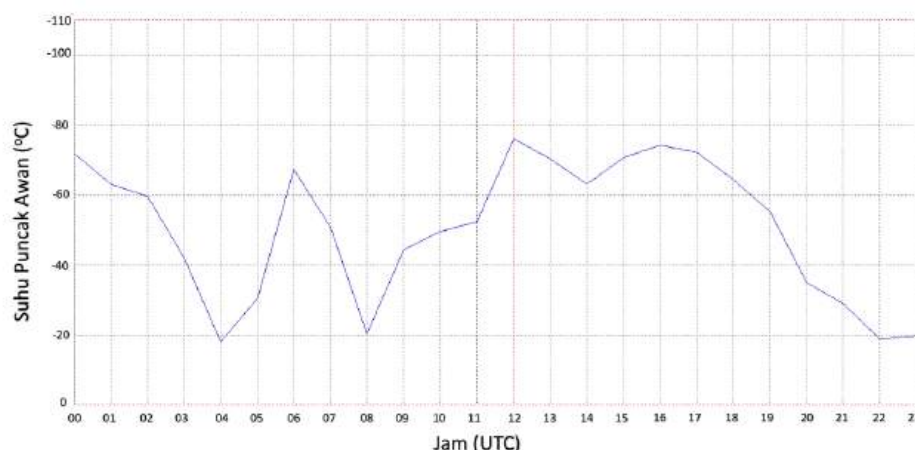


Gambar 7. Citra satelit Himawari-9 band 13 (infrared) tanggal 13 Maret 2024 pukul 00 UTC-23 UTC

Nilai suhu puncak awan terdingin di wilayah Semarang yang diperoleh dari Gambar 7 berada pada lokasi dengan 6,96°LS dan 110,3°BT. Oleh karena itu, analisis *time series* suhu puncak awan pada tanggal 13 Maret 2024 dilakukan pada lokasi tersebut (Gambar 8). Hasilnya menunjukkan bahwa pada pukul 00 UTC awan konvektif sudah terbentuk di Kota Semarang dan meluruh mulai pada pukul 03 UTC. Adanya mekanisme *cold pool* menyebabkan sistem awan konvektif mulai terbentuk kembali di kota Semarang dari pukul 05 UTC dan mulai penuh pada pukul 08 UTC. Pada pukul 11 UTC, MCS

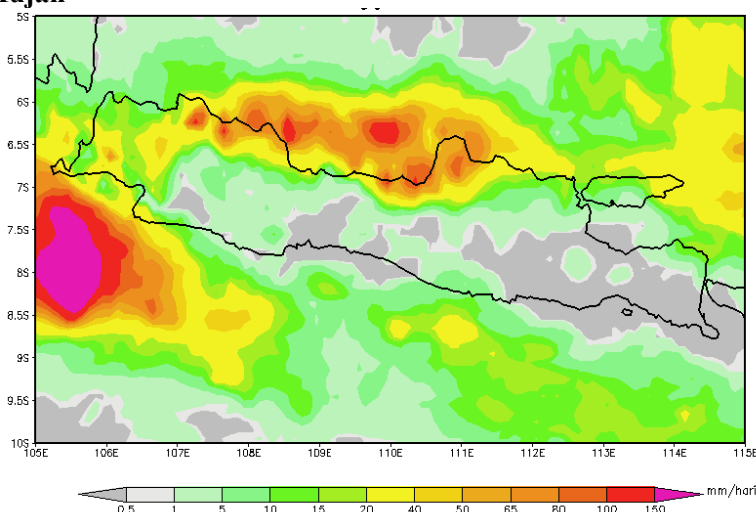


tersebut terbentuk kembali di kota Semarang dan mencapai puncaknya pada pukul 12 UTC, suhu puncak awannya mencapai $-75,9^{\circ}\text{C}$. Nilai tersebut jauh di bawah *freezing level*nya, sehingga mengindikasikan bahwa awan CB yang terbentuk termasuk *deep convective*. Sistem konvektif tersebut terus bertahan di kota Semarang dan mulai meluruh pada pukul 20 UTC.



Gambar 8. *Time series* TBB atau suhu puncak awan di kota Semarang ($6,96^{\circ}\text{LS}$ dan $110,3^{\circ}\text{BT}$) pada tanggal 13 Maret 2024 dalam satuan $^{\circ}\text{C}$.

Analisis Curah Hujan



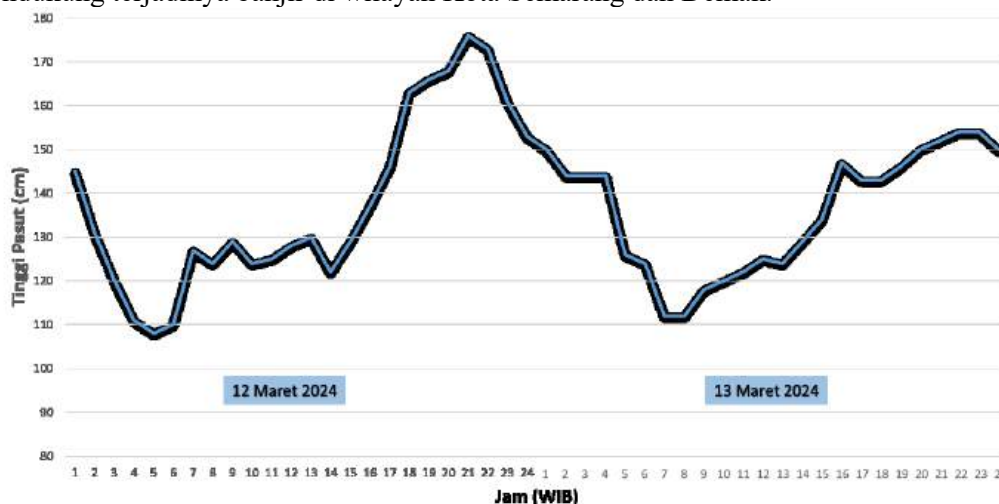
Gambar 9. Curah hujan harian satelit GsMap produk NRT 0,1 Gauge tanggal 13 Maret 2024 dalam mm

Berdasarkan data yang diperoleh dari laporan pengamatan udara permukaan Stasiun Meteorologi Ahmad Yani Semarang pada tanggal 13 Maret 2024 menunjukkan bahwa hujan ekstrim disertai petir dan angin kencang terjadi antara pukul 12-15 UTC (pukul 19-22 WIB). Pada rentang waktu tersebut, curah hujannya sebesar 132 mm. Nilai ini masuk kategori dalam hujan ekstrim. Adapun curah hujan harian pada tanggal 13 Maret 2024 di Stasiun Ahmad Yani Semarang sebesar 196 mm. Selain itu, curah hujan tertinggi di kota Semarang terjadi di Wonodri dengan curah hujannya sebesar 238 mm. Adapun sebaran curah hujan satelit GsMap pada tanggal 13 Maret 2024 ditunjukkan oleh Gambar 9. Meskipun nilai curah hujan satelit ini sedikit *under estimate* dari data curah hujan observasi, namun nilainya masih berkisar 100-150 mm/hari. Selain itu, sebaran hujan ekstrim menunjukkan bahwa MCS yang terbentuk di kota Semarang dan sekitarnya menyebabkan hujan ekstrim di pesisir utara Jawa Tengah, termasuk wilayah Semarang dan Demak. Oleh karena itu, faktor hujan ekstrim tersebut merupakan salah satu faktor pemicu utama terjadinya banjir dan tanah longsor di Kota Semarang dan Demak yang terjadi pada tanggal 13 Maret 2024.



Analisis Pasang Surut Air Laut

Gambar 10 menunjukkan bahwa pada tanggal 12 Maret 2024 terjadi pasang maksimum pada pukul 21 WIB dengan ketinggian 175 cm. Nilai ini di atas nilai normalnya, yaitu 130 cm. Kondisi ini turut mendukung terjadinya banjir di wilayah Kota Semarang dan Demak.



Gambar 10. Grafik ketinggian pasang surut air laut di Kota Semarang Tanggal 12-13 Maret 2024

Kesimpulan

Adanya MJO aktif dan gelombang Rossby Ekuator menyebabkan peningkatan kelembapan di wilayah Indonesia. Selain itu, adanya bibit siklon tropis 91S, semakin menguatkan aliran monsun Asia, sehingga terjadi *cross equatorial flow* dan meningkatkan transpor kelembapan di wilayah pesisir Utara Jawa. Adanya konvergensi transpor kelembapan, SST yang hangat, serta kondisi udara atas di wilayah pesisir Semarang dan Demak yang labil semakin memicu terbentuknya MCS yang *sustain*, sehingga awan CB yang terbentuk adalah *deep convective*. Sistem awan konvektif yang menjadi pemicu hujan ekstrim yang disertai badai guntur dan angin kencang di beberapa wilayah pesisir Utara Jawa Tengah, termasuk Semarang dan Demak. Selain faktor cuaca ekstrim, pasang maksimum yang di atas normalnya juga turut menjadi salah satu faktor terjadinya bencana hidrometeorologi di Semarang dan Demak pada tanggal 13 Maret 2024.

Daftar Pustaka

- [1] A. BMKG, *Pemutakhiran Zona Musim di Indonesia*. BMKG, 2022.
- [2] J. Slingo, "MONSOONS | Overview," dalam *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Elsevier, 2003, hlm. 1365–1370. doi: 10.1016/B0-12-227090-8/00235-9.
- [3] M.-S. Ahn, D. Kim, Y.-G. Ham, dan S. Park, "Role of Maritime Continent Land Convection on the Mean State and MJO Propagation," *Journal of Climate*, vol. 33, no. 5, hlm. 1659–1675, Mar 2020, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0342.1.
- [4] Z. Li, W. Yu, K. Li, B. Liu, dan G. Wang, "Modulation of interannual variability of tropical cyclone activity over Southeast Indian Ocean by negative IOD phase," *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, vol. 72, hlm. 62–69, Des 2015, doi: 10.1016/j.dynatmoce.2015.10.006.
- [5] S. C. Peatman, J. Schwendike, C. E. Birch, J. H. Marsham, A. J. Matthews, dan G.-Y. Yang, "A local-to-large scale view of Maritime Continent rainfall: control by ENSO, MJO and equatorial waves," *Journal of Climate*, hlm. 1–52, Sep 2021, doi: 10.1175/JCLI-D-21-0263.1.
- [6] S. Amri, F. R. Fajary, dan T. W. Hadi, "Analysis of Synoptic Disturbance in Maritim Continent Using Spherical Harmonics Transformation Method," *J.Agromet*, vol. 34, no. 2, hlm. 89–99, Sep 2020, doi: 10.29244/j.agromet.34.2.89-99.
- [7] E. Puspapertiwi, "Banjir Semarang, Berikut Sejumlah Wilayah yang Tergenang dan Terdampak Longsor," 2024. Diakses: 8 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada:



- <https://www.kompas.com/tren/read/2024/03/14/124500065/banjir-semarang-berikut-sejumlah-wilayah-yang-tergenang-dan-terdampak?page=all>
- [8] N. Zaidi, "Banjir Demak: 88 Desa Terdampak, 12.982 Orang Mengungsi," 2024. Diakses: 8 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://regional.kompas.com/read/2024/03/17/201812478/banjir-demak-88-desa-terdampak-12982-orang-mengungsi>
- [9] B. Puspita Dewi, "Pengaruh Cross-Equatorial Northerly Surge terhadap Kejadian Banjir di Jakarta (Studi Kasus 31 Desember 2019 - 1 Januari 2020)," *JIIIF*, vol. 6, no. 1, hlm. 41–52, Feb 2022, doi: 10.24198/jiif.v6i1.37914.
- [10] F. Asfahanif dan S. Amri, "Analisis Peristiwa Angin Kencang dengan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Bangkalan, 17 Oktober 2021)," 2022.
- [11] R. Hidayat dan S. Kizu, "Influence of the Madden–Julian Oscillation on Indonesian rainfall variability in austral summer," *Intl Journal of Climatology*, vol. 30, no. 12, hlm. 1816–1825, Okt 2010, doi: 10.1002/joc.2005.
- [12] M. I. Lélé, L. M. Leslie, dan P. J. Lamb, "Analysis of Low-Level Atmospheric Moisture Transport Associated with the West African Monsoon," *Journal of Climate*, vol. 28, no. 11, hlm. 4414–4430, Jun 2015, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00746.1.
- [13] comet meted, "Tephigram Mastery," 2013. Diakses: 8 Agustus 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/tephigram/navmenu.php?tab=2&page=5-1-0&type=flash>
- [14] S. Y. Lim, C. Marzin, P. Xavier, C.-P. Chang, dan B. Timbal, "Impacts of Boreal Winter Monsoon Cold Surges and the Interaction with MJO on Southeast Asia Rainfall," *Journal of Climate*, vol. 30, no. 11, hlm. 4267–4281, Jun 2017, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0546.1.
- [15] G. Giarno dan Z. Nanaruslana, "The Precursors of High Rainfall Intensity During June in Southern Central Java: A Case Study of Flash Floods 18 June 2016 in Purworejo," *MAUSAM*, vol. 73, no. 4, hlm. 877–896, Sep 2022, doi: 10.54302/mausam.v73i4.5375.
- [16] B. Dewi, S. Amri, M. Robi, V. Dpo, dan S. Novria, "The influence of cross-equatorial northerly surge in the western maritime continent," *E3S Web Conf.*, vol. 464, hlm. 02005, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346402005.