

ANALISIS DINAMIKA ATMOSFER PADA SAAT KEJADIAN HUJAN ES DI KOTA PEKANBARU (STUDI KASUS: 25 MARET 2023)

Analysis of Atmospheric Dynamics During The Hail Event in Pekanbaru City (Case Study: March 25, 2023)

Dwiki Anugerah Atmojo¹⁾, Sayful Amri^{1*)}

¹⁾ Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Pondok Betung, Tangerang Selatan, 15221
*E-mail : sayful.amri@stmkg.ac.id

Intisari

Peristiwa cuaca ekstrem, seperti hujan es disertai angin kencang, sering terjadi di sebagian wilayah Indonesia, khususnya pada musim hujan hingga awal musim transisi. Salah satu contoh peristiwa ini terjadi di sebagian Kota Pekanbaru, Provinsi Riau pada 25 Maret 2023, sekitar pukul 17.10 hingga 17.50 WIB (10.00 hingga 10.50 UTC). Penelitian ini mengkaji kejadian hujan es menggunakan metode analisis deskriptif kondisi dinamika atmosfer dari skala global, regional, hingga lokal. Penelitian ini menggunakan data pengamatan sinoptik, data indeks Nino3.4 SST dan DMI, data siklus MJO, data citra satelit Himawari-9 kanal Inframerah (IR), serta beberapa data reanalisis ERA5. Pengaruh cuaca pada skala regional berupa aktifnya MJO selama 91 hari dan adanya konvergensi angin, berdampak terhadap cuaca skala lokal. Hal tersebut memicu terbentuknya awan-awan konvektif seperti awan kumulonimbus yang melampaui titik beku (freezing level) di wilayah Kota Pekanbaru. Oleh karena itu, droplet yang dihasilkan oleh awan konvektif dapat bertumbuh menjadi lebih besar dari normalnya. Dan pada saat turun sebagai hujan, butiran es tersebut belum sepenuhnya mencair.

Kata Kunci : Hujan Es, Kumulonimbus, Himawari-9, Reanalisis ERA5, MJO

Abstract

Extreme weather events, such as hail accompanied by strong winds, often occur in some parts of Indonesia, especially during the rainy season until the early transition season. One example of this event occurred in parts of Pekanbaru City, Riau Province on March 25, 2023, around 17.10 to 17.50 LT (10.00 to 10.50 UTC). This study examines the hail event using a descriptive analysis method of atmospheric dynamics conditions from global, regional, and local scales. This study uses synoptic observation data, Nino3.4 SST and DMI index data, MJO cycle data, Himawari-9 satellite imagery of the Infrared (IR) channel, and several ERA5 reanalysis data. The influence of weather on a regional scale in the form of the active MJO for 91 days and the presence of convergence, affects the local scale weather. It triggers the formation of deep cumulonimbus that exceeds the freezing level in the Pekanbaru City area. Therefore, the droplets produced by the convective clouds can grow larger. When it falls as rain, the hail grains have not completely melted.

Keywords : Hail, Cumulonimbus, Himawari-9, ERA5 Reanalysis, MJO

1. PENDAHULUAN

Kondisi dinamika atmosfer di Benua Maritim Indonesia dipengaruhi oleh banyak faktor, dari skala global hingga lokal, seperti *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) (Hasibuan *et al.*, 2023), *Dipole Mode* (DM) (Zhang *et al.*, 2021), *Madden Jullian Oscillation* (MJO) (Ahn *et al.*, 2020), *Convectively Coupled Equatorial waves* (CCEWs) (Amri *et al.*, 2020), sistem monsun Asia-Australia (Chang *et al.*, 2016), *Cross Equatorial Northerly Surge* (CENS) (Dewi *et al.*, 2023), *Tropical Cyclone* (TC) (Li *et al.*, 2015), *Borneo Vortex* (BV) (Chang *et al.*, 2005), dan fenomena lokal lainnya. Variabilitas iklim tersebut dapat

memicu terjadinya cuaca ekstrem, seperti hujan lebat yang memicu banjir dan tanah longsor (Dewi & Amri, 2022), angin kencang (Asfahanif & Amri, 2022), puting beliung (Anam & Amri, 2021; Febrian & Amri, 2023), dan hujan es (Sanjaya & Amri, 2022).

Kenaikan suhu rata-rata di permukaan bumi ini salah satunya dapat menyebabkan meningkatnya intensitas hujan es (Dessens, 1995) serta beberapa proses mikro fisika awan lainnya yang signifikan (Wang *et al.*, 2010). Indonesia sebagai wilayah tropis mendapat keuntungan geografis berupa sinar matahari yang berlimpah sepanjang tahun. Hal ini menyebabkan wilayah *freezing level* di wilayah khatulistiwa (tropis) lebih tinggi daripada wilayah lintang

menengah dan tinggi, sehingga kejadian seperti hujan es seharusnya jarang terjadi (Syarifullah, 2017). Berdasarkan data observasi pada tahun 1965-1966, di wilayah tropis bukan hanya angin yang berperan besar dalam pembentukan hujan es seperti di daerah lintang menengah. Fenomena hujan es di wilayah tropis lebih banyak dipengaruhi oleh faktor orografis, dataran tinggi, dan faktor lokal lainnya (Frisby & Sansom, 1967).

Hujan es merupakan peristiwa cuaca ekstrem yang disebabkan oleh peristiwa meteorologi, di mana partikel es atau salju dengan diameter 5 sampai 50 mm jatuh ke permukaan bumi. Namun, pada beberapa kejadian ekstrem, diameter butiran es bisa menjadi lebih besar lagi (Fadholi, 2012). Hujan es sering terjadi di daerah non-tropis, namun bisa juga terjadi di daerah tropis seperti Indonesia (Hidayati *et al.*, 2015). Hujan es terjadi karena tumbuhnya jenis awan bersel tunggal berlapis-lapis (kumulonimbus) yang dekat dengan permukaan tanah atau juga bisa berasal dari multisel awan dengan luasan area horizontal sekitar 3-5 Km yang tumbuh vertikal ke atas dengan ketinggian mencapai 30.000 feet atau lebih (Fadholi, 2012). Kejadian hujan es biasanya sangat singkat, yaitu kurang dari satu jam (Zakir, 2008).

Awan kumulonimbus yang tumbuh menjulang sampai mencapai lapisan tropopause disebabkan oleh arus konvektif vertikal (*lifting*) yang kuat. Awan kumulonimbus dengan *lifting* yang kuat dapat menghasilkan hujan es yang sangat besar (Karmini, 2000). Suhu di puncak awan bisa mencapai -60°C , dan uap air biasanya berbentuk *droplet* es. Selain mekanisme *lifting*, awan kumulonimbus dewasa juga dapat menyebabkan aliran turun yang kuat (*dropping*). Saat mencapai permukaan bumi, sebagian kristal es mencair dan jatuh sebagai hujan. Namun, dalam beberapa kasus, hujan bisa saja turun dalam bentuk padat (es). Hal ini tergantung pada jarak dan suhu permukaan. Proses Bergeron-Findeisen yang terjadi di awan kumulonimbus dapat menyebabkan kristal es tumbuh lebih cepat dibandingkan tetesan air, sehingga mengakibatkan peningkatan massa partikel es di dalam awan (HK *et al.*, 2007; D. Wheeler, 1999).

Hujan es terjadi di kota Pekanbaru, Riau pada tanggal 25 Maret 2023 sekitar pukul 17.10 WIB. Hujan es menyebabkan kerugian bagi masyarakat. Laporan BPBD Kota Pekanbaru menyebutkan bahwa peristiwa yang terjadi sekitar sore hari memicu pohon tumbang di beberapa titik yang sempat menghambat akses jalan dan membutuhkan penanganan lintas instansi. BPBD juga menerima laporan warga bahwa terdapat dua rumah mengalami kerusakan pada bagian atap akibat terpaan cuaca ekstrem tersebut (Riau Pos, 2023; RiauOnline, 2023). Dampak yang paling luas dirasakan masyarakat adalah gangguan kelistrikan. PLN Unit Induk Riau dan Kepulauan Riau melaporkan adanya gangguan pada 1.714 gardu, dengan pemulihan bertahap hingga

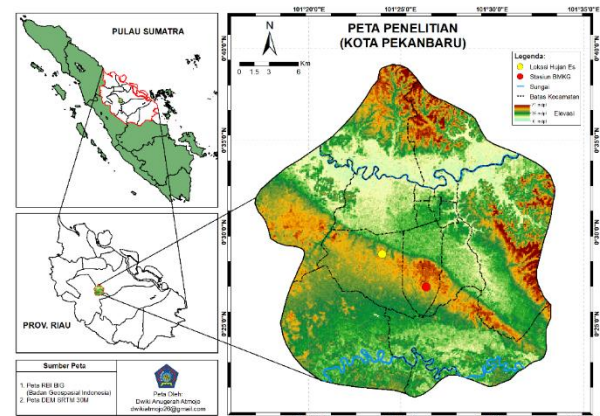
246.873 pelanggan kembali menyala (100%) pada malam hari, serta menjelaskan bahwa cuaca ekstrem menyebabkan banyak pohon tumbang yang mengenai jaringan listrik (Antara, 2023).

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kejadian hujan es dengan menggunakan kejadian hujan es di Kota Pekanbaru tanggal 25 Maret 2023 menggunakan analisis citra satelit Himawari-9. Selain itu, juga dianalisis dinamika atmosfernya, sehingga mendapatkan faktor-faktor yang memicu kejadian hujan es tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan dalam membuat peringatan dini cuaca ekstrem, terutama terkait hujan es.

2. METODE

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Kota Pekanbaru yang terletak di Provinsi Riau. Secara astronomis Kota Pekanbaru terletak di antara $0,25^{\circ}$ – $0,45^{\circ}$ LU dan $101,14^{\circ}$ – $102,34^{\circ}$ BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

2.2. Data

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah analisis kondisi deskriptif dinamika atmosfer yang terbagi dalam skala global, regional, dan lokal dengan menggunakan data sebagai berikut:

1. Data indeks Nino3.4 SST dan indeks DMI pada bulan Mei 2019–November 2023 yang diperoleh dari BOM (*Bureau of Meteorology*) melalui situs <http://www.bom.gov.au/climate/>.
2. Data periode siklus MJO (*Madden Julian Oscillation*) periode bulan Januari–Maret 2023 yang diperoleh dari BOM (*Bureau of Meteorology*) melalui situs <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>.
3. Data citra satelit Himawari-9 kanal Inframerah IR (Band 13) per 10 menit tanggal 25 Maret 2023 melalui situs <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>.
4. Data anomaly *sea surface temperature* dengan resolusi spasial $0,25^{\circ}\times 0,25^{\circ}$ tanggal 25 Maret 2023 yang diperoleh dari NOAA PSL (*National Oceanic and Atmospheric Administration*

Physical Sciences Laboratory) melalui situs <https://psl.noaa.gov/mddb2/>.

5. Data intensitas curah hujan GSMaP (*Global Satellite Mapping of Precipitation*) dengan resolusi spasial 0,1°x0,1° tanggal 25 Maret 2023 yang diperoleh dari JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) melalui situs <https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMaP/>.
6. Data reanalisis ERA5 yang diperoleh dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) dengan resolusi spasial 0,25°x0,25° tanggal 25 Maret 2023 melalui situs <https://cds.climate.copernicus.eu/>.
7. Data harian pengamatan sinoptik Stasiun Meteorologi Sultan Syarif Kasim II tanggal 25 Maret 2023 yang diperoleh melalui situs <https://bmkgsoft.database.bmkg.go.id/>.

Pemilihan periode setiap dataset disesuaikan dengan tujuan analisis multi-skala. Indeks ENSO (Nino3.4 SST) dan IOD (DMI) digunakan dalam rentang Mei 2019–November 2023 untuk menggambarkan kondisi klimatologis beberapa tahun sebelum kejadian hujan es, sehingga dapat dinilai apakah kejadian berlangsung pada fase anomali atau kondisi netral. Data MJO dianalisis pada Januari–Maret 2023 untuk menangkap evolusi intramusiman menjelang dan saat kejadian hujan es pada tanggal 25 Maret 2023. Sementara itu, data citra satelit pada hari kejadian (Himawari-9, ERA5, GSMaP, ASST harian, dan sinoptik harian) digunakan untuk mengkaji proses regional–lokal yang berkaitan langsung dengan pertumbuhan awan konvektif dan terjadinya hujan es.

2.3. Metode

Data indeks Nino3.4 SST dan indeks DMI divisualisasikan ke dalam grafik *timeseries*. Data periode siklus MJO ditampilkan dalam bentuk diagram fase dan tabel dengan pemilihan kejadian MJO aktif didasarkan pada 3 syarat utama (Climate Prediction Center - MJO Composites Information, 2010). Data citra satelit yang digunakan dalam penelitian adalah citra satelit Himawari-9 dengan kanal Inframerah (IR) yang divisualisasikan menggunakan *software* SATAID. Radiasi gelombang panjang yang disebut *brightness temperature* dipancarkan oleh bumi secara terus-menerus dan ditangkap oleh kanal IR. Dengan cara ini, kita dapat melihat sebaran awan di atmosfer, karena awan yang tebal atau tinggi yang bersuhu dingin akan tampak lebih terang daripada awan yang tipis atau rendah yang bersuhu hangat.

Data *anomaly sea surface temperature*, curah hujan GSMaP, dan data reanalisis ERA5 yang berupa suhu permukaan, kelembapan relatif, kecepatan angin zonal, kecepatan angin meridional, kelembapan spesifik dianalisis pada saat kejadian hujan es dengan menggunakan *software* GRADS untuk melihat dinamika atmosfer yang memicu terjadinya hujan es. Selain itu, data pengamatan sinoptik pada tanggal 25 Maret 2023 juga

ditampilkan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan kondisi lokal saat kejadian hujan es.

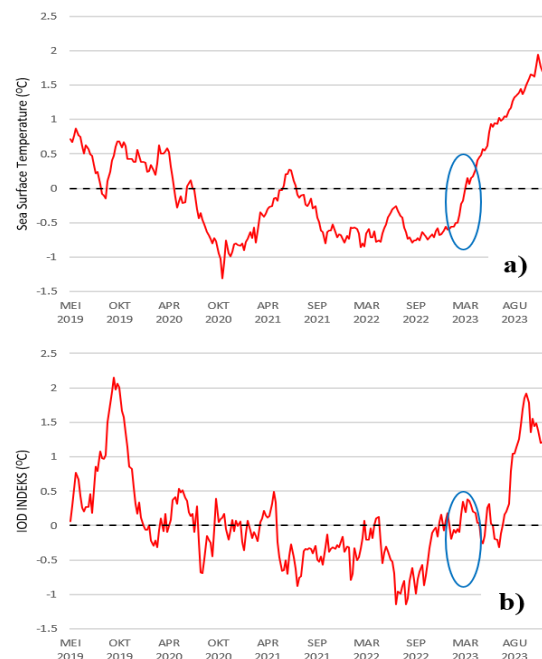
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini pemaparan mengenai analisis hasil dan pembahasan dibagi menjadi 5 tahapan analisis, yaitu analisis pengaruh cuaca skala global, regional, lokal, analisis data citra satelit, analisis model cuaca numerik.

3.1. Analisis Pengaruh Cuaca Skala Global

3.1.1. El-Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD)

Grafik ENSO menggunakan indeks NINO3.4 SST (Gambar 2a) dan grafik IOD menggunakan indeks DMI (Gambar 2b) sama-sama memiliki nilai yang fluktuatif dengan kecenderungan untuk tetap pada keadaan netral (lingkaran berwarna biru). Ketika kedua fenomena ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) dan IOD (*Indian Ocean Dipole*) dalam keadaan netral, biasanya wilayah Pulau Sumatra mengalami kondisi iklim yang relatif normal (Bramawanto & Abida, 2017). Oleh karena itu, baik ENSO maupun IOD tidak berperan dalam terjadinya hujan es tersebut.

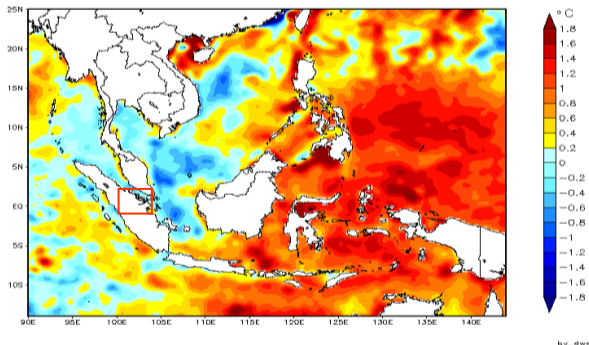


Gambar 2. Grafik ENSO dan IOD. a) Variasi ENSO (Indeks NINO3.4) Mei 2019–November 2023, dan b) Variasi IOD (Indeks DMI) Mei 2019–November 2023.

3.1.2. Anomaly Sea Surface Temperature (ASST)

Saat terjadinya hujan es pada tanggal 25

Maret 2023 (Gambar 3), keadaan *anomaly sea surface temperature* di sekitar wilayah Sumatra bagian Tengah (ditunjukkan pada kotak merah), khususnya Provinsi Riau berada pada rentang nilai $-0,4^{\circ}\text{C}$ – 0°C . Rentang nilai anomali tersebut termasuk ke dalam kategori normal, sehingga kondisi *sea surface temperature* tidak menyebabkan penguapan besar yang memicu pembentukan awan konvektif di wilayah Pekanbaru.



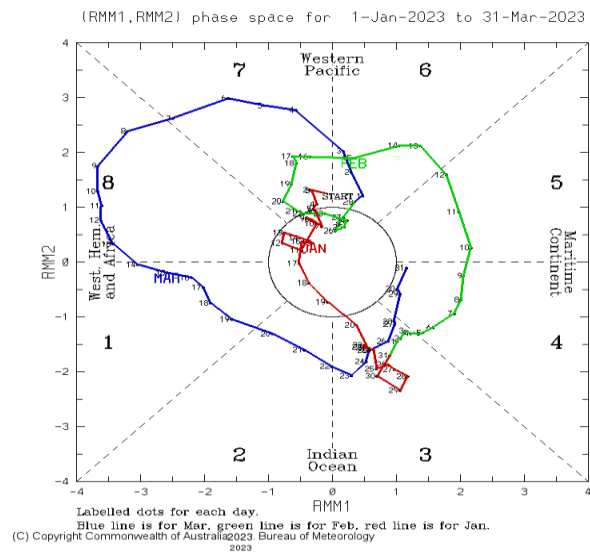
Gambar 3. *Anomaly Sea Surface Temperature* (ASST) Tanggal 25 Maret 2023. Kotak merah menunjukkan wilayah Sumatra bagian Tengah.

3.2. Analisis Pengaruh Cuaca Skala Regional

3.2.1. Madden Julian Oscillation (MJO)

Diagram fase *Madden Julian Oscillation* (MJO) pada Gambar 4, memperlihatkan pada Bulan Maret 2023 (garis berwarna biru) nilai indeks MJO berada di luar lingkaran tengah ($\text{RMM} > 1$), sehingga dapat dikategorikan kuat/aktif pada

fase 3 (konvektif MJO pada wilayah Sumatra) (Lafleur et al., 2015). Hal tersebut sejalan dengan hasil pemilihan siklus periode MJO aktif pada Tabel 1. Pemilihan kejadian MJO aktif didasarkan pada 3 syarat utama.



Gambar 4. Diagram Fase MJO Periode Januari - Maret 2023.

(Sumber: <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>)

Pertama, MJO haruslah memiliki amplitudo lebih besar dari satu pada pentad (periode waktu 5 harian) yang berurutan. Kedua, MJO harus mencakup pada fase-fase yang berurutan secara numerik (fase 2,3,5,6,8,1,2). Ketiga, MJO harus berlangsung lebih dari lima pentad (25 hari) dan tidak boleh diam dalam satu fase lebih dari empat pentad (20 hari) (Wheeler & Hendon, 2004).

Tabel 1. Pemilihan Periode Siklus MJO Aktif (Climate Prediction Center - MJO Composites Information, 2010)

Nama Siklus	Panjang (Hari)	Urutan Fase Yang Dilewati	Jumlah Fase Yang Dilewati	Valid	S1	S2	S3	S4
s106	47	2,3,4,5,6,7,8,1,2,3,4,5,6	13	✓	✓	✓	✓	✓
s107	39	2,3,5,6,7,8,1,2	8	✓	✓	✓	✓	✓
s108	42	1,2,1,2,3	5	✗	✗	✗	✗	✗
s109	42	5,6,7	3	✓	✓	✓	✗	✗
s110	26	6,7	2	✓	✓	✗	✗	✗
s111	60	8,1,2,3,4,5,6,7,8,1,2,3	12	✓	✓	✓	✓	✓
s112	37	1,2,3,4,5,6	6	✓	✓	✓	✓	✗
s113	32	6,7,8	3	✓	✓	✓	✗	✗
s114	27	6,7,8,1,2	5	✓	✓	✓	✗	✗
s115	31	6,7,6,7,6,7,8	6	✗	✗	✗	✗	✗
s116	34	3,4,5,6,7	5	✓	✓	✓	✗	✗
s117	91	6,7,8,1,2,3,4,5,6,7,8,1,2,3,4,5,6,7,8	19	✓	✓	✓	✓	✓
s118	32	3,4,3,4,5,6	6	✗	✗	✗	✗	✗

Keterangan:

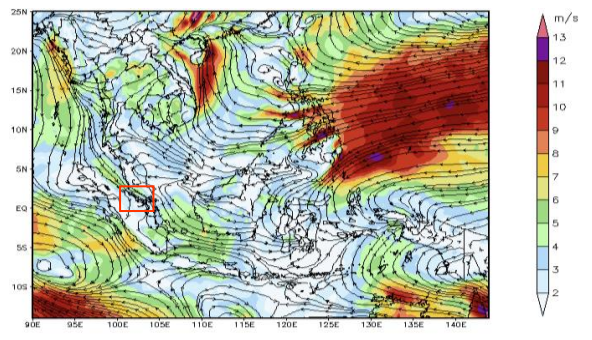
-Valid = Identifikasi apakah siklus membentuk bilangan fase yang berurutan.

- Skenario1 (S1) = Valid aktif, membentuk bilangan fase berurutan.
- Skenario2 (S2) = Valid aktif dan MJO melewati minimal 3 fase dan total semua fase yang dilewati memiliki panjang ≥ 25 hari.
- Skenario3 (S3) = Valid aktif dan MJO melewati minimal 5 fase dan total semua fase yang dilewati memiliki panjang ≥ 25 hari.
- Skenario4 (S4) = Valid aktif dan MJO melewati minimal 8 fase dan total semua fase yang dilewati memiliki panjang ≥ 25 hari.
- s117 = Siklus MJO aktif saat fenomena hujan es (25 Maret 2023) berlangsung di wilayah Pekanbaru.
- s108, s115, s118 = Siklus MJO aktif yang terjadi pada fase yang tidak berurutan.

Kejadian MJO aktif saat fenomena hujan es pada tanggal 25 Maret 2023 di wilayah Pekanbaru merupakan siklus ke-117 sejak tahun 1991 yang berada pada fase 3 dengan nilai amplitudo sebesar 1,709223. Siklus ke-117 tersebut terjadi selama 91 hari dan melewati sebanyak 19 fase MJO. Siklus MJO aktif ke-117 dikatakan valid karena memenuhi skenario 1, 2, 3, dan 4, serta memenuhi ketiga syarat utama. Oleh karena itu, MJO merupakan salah satu faktor yang menyebabkan terbentuk awan *deep convective* yang memicu terjadinya hujan es di wilayah Pekanbaru.

3.2.2. Peta Streamline Angin Gradien

Peta *streamline* angin gradien lapisan 925mb (Gambar 5) menunjukkan bahwa, saat kejadian hujan es tanggal 25 Maret 2023 pukul 08.50 UTC–11.10 UTC terdapat *shearline* di sekitar wilayah Pekanbaru (kotak merah). *Shearline* merupakan kondisi di mana pada daerah tersebut terdapat perubahan arah dan penurunan kecepatan angin secara tiba-tiba, sehingga menyebabkan penumpukan massa udara yang akan mengakibatkan kondisi cuaca ekstrem. Kecepatan angin yang tinggi pada *shearline* dapat menyebabkan hujan es dibandingkan kecepatan angin yang lebih rendah (Tuovinen *et al.*, 2015). Kondisi ini dapat mendukung proses *lifting* dan pertumbuhan awan konvektif seperti awan kumulonimbus yang bisa tumbuh lebih tinggi melampaui titik bekunya, sehingga dapat menyebabkan uap air mendingin menjadi partikel-partikel es.



Gambar 5. Streamline Angin Gradien (925mb) Tanggal 25 Maret 2023 Saat Kejadian Hujan Es.

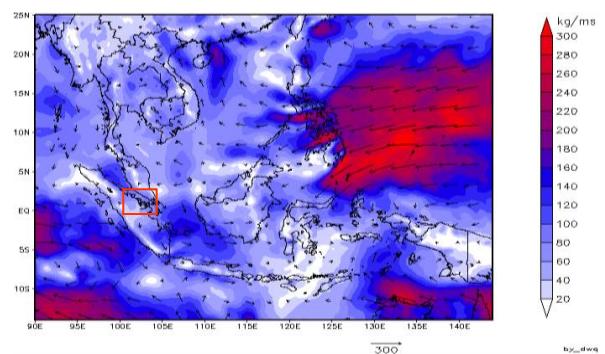
Pada Gambar 5 juga menunjukkan bahwa kondisi konvergensi lapisan bawah (925mb) di wilayah Pulau Sumatra khususnya Pekanbaru didominasi oleh Monsun Asia dengan nilai angin

berkisar 2-7 m/s yang ditandai dengan warna biru muda hingga kuning, sehingga membawa cukup banyak transpor kelembapan dari Benua Asia (Gambar 6).

3.2.3. Transpor Kelembapan Lapisan Bawah

Peta transpor kelembapan pada lapisan 1000 hingga 925 mb (Gambar 6) menunjukkan secara jelas mengenai distribusi massa udara pada tanggal 25 Maret 2023. Pada saat awal hingga berakhirnya fenomena hujan es sekitar pukul 08.50 UTC–11.10 UTC wilayah Pulau Sumatra khususnya Pekanbaru (ditunjukkan pada kotak merah) mendapat transpor kelembapan yang cukup besar, baik dari Samudra Hindia maupun perairan Laut Cina Selatan. Hal tersebut terlihat pada Gambar 6 yang menunjukkan nilai transpor kelembapan pada wilayah tersebut hanya berkisar pada 40–100 kg/ms yang ditandai dengan warna ungu hingga biru.

Dari banyaknya transpor kelembapan yang terbawa, dapat disimpulkan bahwa MJO memiliki peran sebagai pengangkut massa udara dari Benua Asia ke Indonesia. Juga, dari transpor kelembapan tampak bahwa ketika pola MJO sedang aktif, ada transpor kelembapan dari Samudra Hindia khususnya di bagian barat Pulau Sumatra.



Gambar 6. Transpor Kelembapan Lapisan Bawah Tanggal 25 Maret 2023 Saat Kejadian Hujan Es.

3.3. Analisis Pengaruh Cuaca Skala Lokal

3.3.1. Data Pengamatan Sinoptik

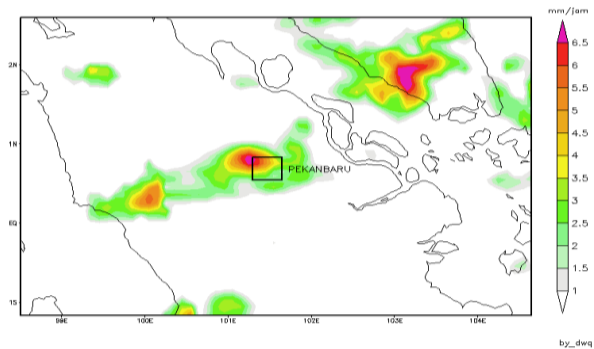
Data pengamatan sinoptik yang ditampilkan pada Tabel 2 diperoleh dari Stasiun Meteorologi Sultan Syarif Kasim II yang terletak di wilayah Pekanbaru, Provinsi Riau pada koordinat

0,45°LU–101,44°BT. Kejadian fenomena hujan es yang terjadi di wilayah Pekanbaru terjadi pada koordinat 0,48°LU–101,40°BT. Walaupun letak antara stasiun dengan lokasi kejadian hujan es tidak pada koordinat yang sama, tetapi posisinya masih berdekatan, di mana Stasiun Meteorologi Sultan Syarif Kasim II mewakili pengamatan sinoptik untuk seluruh wilayah di Provinsi Riau termasuk Pekanbaru.

Tabel 2 menunjukkan saat kejadian fenomena hujan es sekitar pukul 09.00–11.00 UTC terjadi penurunan suhu secara drastis dari 30,7°C menjadi 23,4°C. Selain terjadinya penurunan suhu secara drastis, kecepatan angin dan kelembapan udara (RH) yang terjadi di wilayah Pekanbaru menurut data pengamatan sinoptik mengalami peningkatan secara signifikan. Pukul 09.00 UTC kecepatan angin bernilai 5 knot dan naik secara drastis menjadi 22 knot pada pukul 10.00 UTC (pada saat kejadian). Kondisi kelembapan udara mengalami hal yang sama, di mana kelembapan udara mengalami peningkatan secara signifikan dari 76% hingga 99%. Berdasarkan analisis data pengamatan sinoptik tersebut, terdapat ciri-ciri terbentuknya awan konvektif pada wilayah Pekanbaru yang dapat memicu terjadinya hujan es.

3.3.2. Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP)

Hujan yang terjadi di wilayah sekitar Pekanbaru pada tanggal 25 Maret 2023 saat kejadian hujan es (Gambar 7) ditampilkan dalam bentuk peta dengan menggunakan data dari Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP). Terdapat adanya hujan di wilayah Pekanbaru dengan rentang nilai curah hujan 3–>6,5 mm/jam.



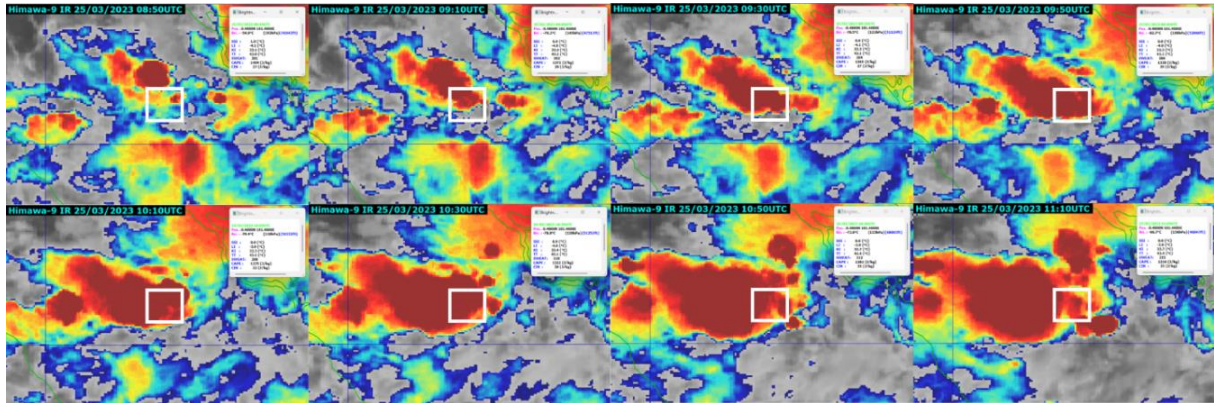
Gambar 7. Peta Intensitas Curah Hujan GSMaP Tanggal 25 Maret 2023 Saat Kejadian Hujan Es.

3.4. Analisis Data Citra Satelit

Hujan umumnya terjadi setelah awan mencapai pada titik jenuh konveksinya. Awan yang mengalami konveksi ini sendiri dapat mengakibatkan presipitasi yang umumnya berupa hujan lebat (*heavy rain*), hujan (*rain*), gerimis (*drizzle*), salju (*snow*) dan hujan es (*hail*) (Bayong, 1999). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Karmini, (2000) terkait dengan identifikasi awan, cara yang dapat digunakan untuk mengetahui awan konvektif atau awan kumulonimbus yaitu dengan memperhatikan luasan daerah yang tertutup awan konvektif dapat mencapai suhu puncak awan konvektif yang sangat dingin, yaitu kurang dari -50°C. Awan lain biasanya berada pada ketinggian yang sama dengan puncak awan konvektif memiliki suhu puncak awan yang lebih hangat dan tidak sedingin awan konvektif atau awan kumulonimbus. Selain memiliki suhu puncak yang sangat dingin, awan konvektif dapat juga ditandai dengan puncak awan yang terlihat sangat tinggi, di mana jika dimasukkan ke dalam persamaan suhu bisa mencapai minus puluhan derajat Celsius dan berwujud padat (Karmini, 2000).

Tabel 2. Data Pengamatan Sinoptik Stasiun Meteorologi Sultan Syarif Kasim II Tanggal 25 Maret 2023

Jam (UTC)	Suhu (°C)	Arah Angin	Kec. Angin (knot)	RH (%)	Jam (UTC)	Suhu (°C)	Arah Angin	Kec. Angin (knot)	RH (%)
00	23.9	Selatan	6	99	12	23.8	Utara	6	100
01	24.9	Tenggara	6	96	13	23.5	Utara	0	100
02	26.2	Tenggara	6	90	14	23.8	Utara	0	100
03	27.7	Barat Daya	6	83	15	23.6	Tenggara	5	100
04	29	Barat Daya	5	75	16	23.6	Utara	4	100
05	30.3	Utara	0	69	17	23.7	Utara	0	100
06	31.7	Barat Laut	5	61	18	23.3	Utara	0	100
07	31.1	Barat Daya	5	70	19	23.2	Utara	0	100
08	32.1	Selatan	5	67	20	23	Utara	0	100
09	30.7	Selatan	5	76	21	23	Utara	0	100
10	24.9	Barat Laut	22	92	22	22.8	Utara	0	100
11	23.4	Utara	0	99	23	22.8	Utara	0	100

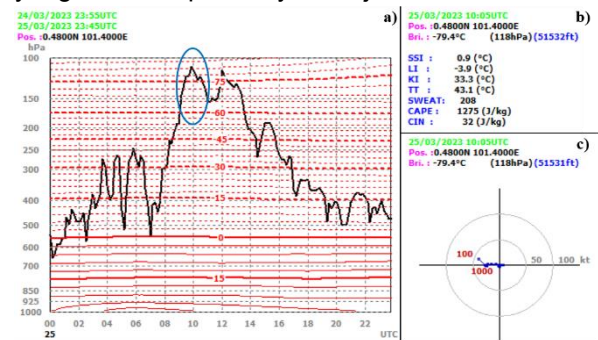


Gambar 8. Citra Satelit Perkembangan Awan Konvektif Pada Saat Kejadian Hujan Es Tanggal 25 Maret 2023 Pukul 08.50 UTC-11.10 UTC.

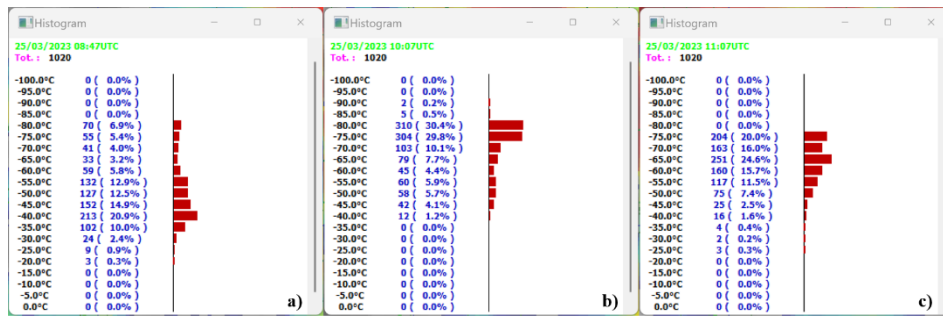
Gambar 8 merupakan kondisi citra satelit pada hari kejadian hujan es pada tanggal 25 Maret 2023. Bibit awan konvektif mulai tampak pada pukul 08.50 UTC dengan suhu puncak awan -54,9°C. Bibit awan tersebut terus mengalami perkembangan yang seiring bertambahnya waktu semakin pekat dan membesar (ditunjukkan oleh kotak putih). Pada saat waktu kejadian yaitu tepat pada pukul 10.10 UTC puncak awan konvektif berada pada suhu -79,4°C. Pada saat kejadian hujan es sedang berlangsung, sebaran pola awan konvektif mencapai pada area maksimum cakupannya sekitar 68 Km pada pukul 10.50 UTC. Kejadian hujan es berlangsung selama kurang lebih 60 menit dan berakhir pada pukul 11.10 UTC dengan suhu puncak awan konvektif yang berada pada suhu -66,7°C, serta perkembangan awan konvektif pada lokasi kejadian juga sudah mulai meluruh dan bergerak ke arah barat hingga barat laut.

Suhu puncak awan konvektif di lokasi kejadian hujan es yang diinterpolasikan berdasarkan ketinggian ditunjukkan dalam grafik *timeseries* pada Gambar 9a. Pada saat bibit awan konveksi muncul yaitu pada pukul 08.50 UTC, awan berada pada ketinggian 193mb dengan suhu puncak awan mencapai rentang nilai <-50°C. Awan konvektif terus berkembang naik hingga pada ketinggian 118mb diikuti dengan penurunan suhu yang drastis mencapai rentang <-75°C saat awal kejadian hujan es yang terjadi pukul 10.10 UTC. Suhu puncak awan mulai mengalami peningkatan pada rentang <-60°C ketika puncak awan konvektif berangsur-angsur turun pada ketinggian 148mb pukul 11.10 UTC. Pada Gambar 9b memberikan penjelasan lebih rinci terkait labilitas udara atas pada ketinggian 118mb. *Convective Available Potential Energy* (CAPE) dan *Convective Inhibition* (CIN) pada awan konvektif saat kejadian hujan es termasuk dalam kategori sedang dengan nilai berturut-turut 1275 J/kg dan 32 J/kg. CAPE dan CIN merupakan faktor penting dalam mendefinisikan konveksi

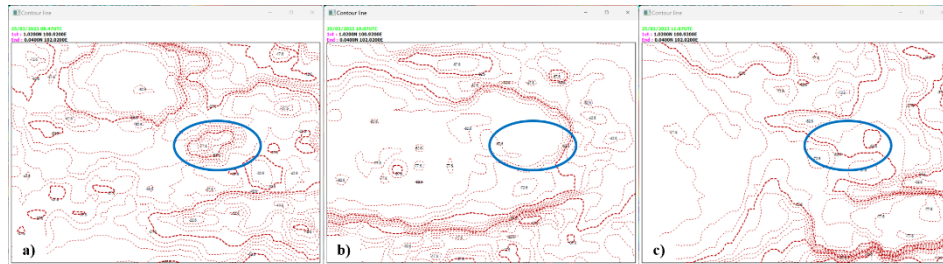
tropis dan berfungsi sebagai indeks ketidakstabilan untuk menilai potensi konvektif atmosfer dan curah hujan (Kishore *et al.*, 2016; Meukaleuni *et al.*, 2016). CAPE mewakili energi potensial yang dimiliki oleh aliran udara ke atas yang mengandung uap air, dan nilai CAPE yang lebih tinggi menghasilkan konveksi yang lebih besar. CIN adalah indikator indeks ketidakstabilan, dengan nilai CIN yang lebih tinggi menghasilkan lebih sedikit konveksi (DeAngelis *et al.*, 2015). Terlihat juga pada Gambar 9c perubahan kecepatan angin di setiap lapisan udara mengalami peningkatan. Pada saat awan konvektif mencapai pada ketinggian puncaknya, kecepatan awan konvektif tersebut hampir mencapai 50 knot atau 92,6 Km/h. Ketiga kondisi tersebut yang telah diidentifikasi menggunakan citra satelit Himawari-9 menandakan adanya terbentuk awan konvektif seperti awan kumulonimbus yang melampaui titik beku (*freezing level*) hingga suhu -79,4°C dengan kecepatan awan konvektif mencapai 50 knot atau 92,6 Km/h. Oleh karena itu, *droplet* yang dihasilkan oleh awan konvektif dapat bertumbuh menjadi lebih besar dan saat mencapai permukaan tanah masih dalam bentuk butiran es yang belum sepenuhnya menjadi cair.



Gambar 9. a) *Timeseries* Interpolasi Suhu Puncak Awan Berdasarkan Ketinggian, b) CAPE dan CIN Pada Puncak Awan Konvektif, c) Perubahan Kecepatan Angin Lapisan Udara.



Gambar 10. Histogram Pola Sebaran Suhu Puncak Awan Konveksi Saat Kejadian Hujan Es. a) Awal Munculnya Bibit Awan Konvektif, b) Saat Kejadian Hujan Es, c) Akhir Kejadian Hujan Es.



Gambar 11. Counturline Suhu Puncak Awan. a) Awal Munculnya Bibit Awan Konvektif, b) Saat Kejadian Hujan Es, c) Akhir Kejadian Hujan Es.

Gambar 10 menunjukkan pola sebaran suhu puncak awan konveksi tanggal 25 Maret 2023 di Pekanbaru. Pada awal munculnya bibit awan konvektif sebaran suhu puncak awan konveksi berada pada rentang -80°C hingga -20°C dengan sebaran terbanyak berada pada suhu -40°C sebanyak 20,9%. Saat kejadian hujan es berlangsung, sebaran suhu puncak awan konveksi turun pada rentang -90°C hingga -40°C dengan sebaran suhu -80°C sebanyak 30,4% sebagai sebaran terbanyak. Di akhir kejadian, rentang sebaran suhu puncak awan konveksi kembali meningkat secara berangsur-angsur dari -75°C hingga -25°C dengan suhu -65°C sebagai sebaran suhu terbanyak sebesar 24,6%.

Pada Gambar 11 suhu puncak awan juga di analisis menggunakan garis kontur. Daerah yang di lingkari warna biru merupakan lokasi yang terdampak kejadian hujan es. Terlihat pada lokasi kejadian, awalnya suhu puncak awan bernilai lebih rendah dari daerah sekitarnya. Suhu tersebut secara konstan menurun hingga lebih rendah lagi dibanding dengan kondisi sekitarnya. Pukul 08.50 UTC sebagai awal munculnya awan konvektif, garis kontur suhu puncak awan bernilai $-77,6^{\circ}\text{C}$ dan dikelilingi oleh garis kontur dengan suhu $-52,6^{\circ}\text{C}$. Saat hujan es terjadi pukul 10.10 UTC cakupan wilayah garis kontur membesar dengan suhu puncak awan terus menurun secara signifikan yang mencapai kisaran $-82,6^{\circ}\text{C}$. Seluruh lokasi kejadian hujan es dipenuhi oleh sebaran garis kontur dengan suhu yang rendah. Ketika hujan es berakhir pukul 11.10 UTC cakupan garis kontur suhu puncak awan mulai mengecil dengan nilai suhu $-62,6^{\circ}\text{C}$. Nilai suhu puncak awan yang sangat rendah ini sejalan dengan temuan studi hujan es di Indonesia. Studi

yang dilakukan oleh Ariwibowo *et al.*, (2018) pada kejadian hujan es di Depok menunjukkan suhu puncak awan mencapai hingga -73°C . Hal ini diperkuat dengan penelitian yang dilakukan oleh Auliya & Mulya, (2022) di Malang menunjukkan suhu puncak awan mencapai -68°C pada fase konvektif. Dengan demikian, nilai suhu puncak awan yang mencapai $-79,4^{\circ}\text{C}$ pada kejadian hujan es di Pekanbaru menunjukkan kondisi *deep convective* yang mendukung pembentukan partikel es di dalam awan.

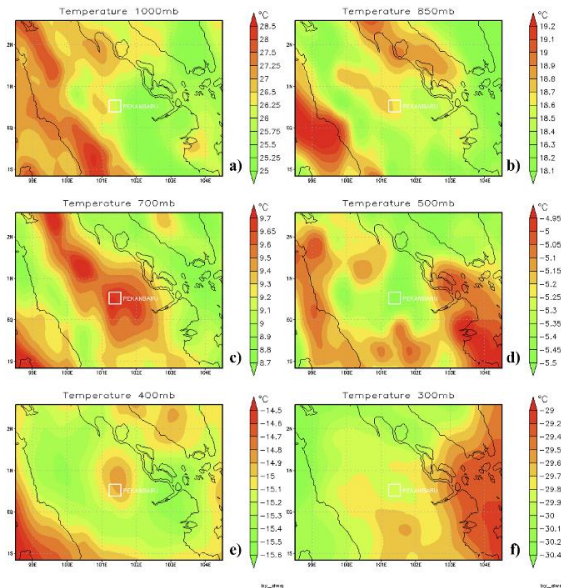
3.5. Analisis Model Cuaca Numerik

Analisis model cuaca numerik pada penelitian ini berupa analisis variabel suhu dan kelembapan udara. Kedua variabel tersebut akan dianalisis berdasarkan ketinggian lapisan udara yaitu pada ketinggian 1000mb, 850mb, 700mb, 500mb, 400mb dan 300mb.

3.5.1. Suhu Udara

Saat kejadian fenomena hujan es pada tanggal 25 Maret 2023 di sekitar wilayah Pekanbaru, suhu udara pada ketinggian 1000mb berkisar pada rentang $25,75^{\circ}\text{C}$ – $26,5^{\circ}\text{C}$. Di ketinggian 850mb suhu udara berkisar $18,6^{\circ}\text{C}$ – $18,8^{\circ}\text{C}$. Ketinggian berikutnya yaitu 700mb suhu udara memiliki nilai dengan rentang $9,6^{\circ}\text{C}$ – $>9,7^{\circ}\text{C}$. Pada ketinggian 500mb suhu kembali mengalami penurunan dengan rentang nilai $<-5,5^{\circ}\text{C}$ – $-5,4^{\circ}\text{C}$. Pola yang sama juga terjadi pada ketinggian 400mb, suhu udara berada pada kisaran -15°C – $-14,8^{\circ}\text{C}$. Dan pada ketinggian 300mb suhu mencapai titik terendahnya yaitu pada nilai $-29,9^{\circ}\text{C}$ – $-29,8^{\circ}\text{C}$. Terlihat dari Gambar 12 variasi bentuk suhu udara berdasarkan ketinggian lapisan udaranya mengalami penurunan secara konstan di setiap lapisannya.

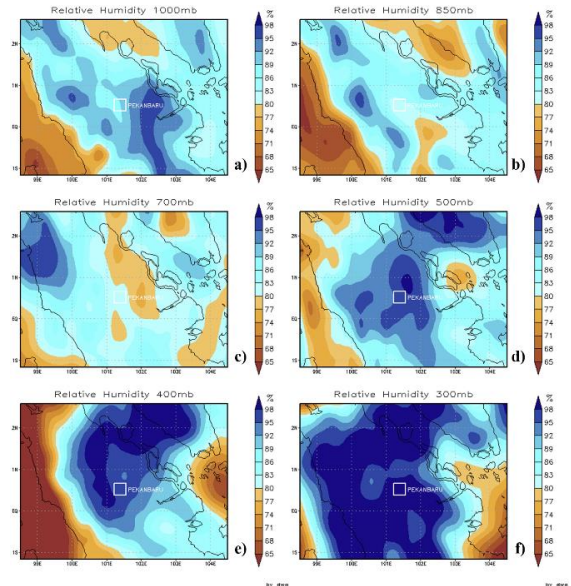
Semakin tinggi lapisan udara, maka suhu udara semakin rendah. Hal tersebut sejalan dengan analisis menggunakan citra satelit pada Gambar 9a yang juga menunjukkan pola yang sama.



Gambar 12. Variasi Profil Suhu Udara Berdasarkan Ketinggian Lapisan Udara. a) 1000mb, b) 850mb, c) 700mb, d) 500mb, e) 400mb, f) 300mb.

3.5.2. Kelembapan Udara

Gambar 13 menunjukkan profil kelembapan udara di setiap ketinggian atmosfer pada tanggal 25 Maret 2023 secara keseluruhan cukup basah dengan rentang nilai >80%. Kelembapan udara pada lapisan 1000mb berkisar pada nilai 86–91%. Pada lapisan udara berikutnya, yaitu lapisan 850mb dan 700mb kelembapan udara sedikit menurun dengan nilai berkisar 80–83%. Kelembapan udara mulai meningkat kembali pada lapisan udara 500mb dan 400mb dengan rentang nilai kelembapan 94–97%. Pada lapisan udara yang lebih tinggi lagi yaitu lapisan udara 300mb mengalami nilai puncaknya dengan nilai kelembapan udara lebih dari 100%.



Gambar 13. Variasi Profil Kelembapan Udara Berdasarkan Ketinggian Lapisan Udara. a) 1000mb, b) 850mb, c) 700mb, d) 500mb, e) 400mb, f) 300mb.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pengaruh cuaca dan dinamika atmosfer yang dilakukan dalam skala global, regional, dan lokal menggunakan beberapa data dari parameter meteorologi dan citra satelit Himawari-9 kanal Inframerah (IR), tanggal 25 Maret 2023 di Pulau Sumatra khususnya wilayah Kota Pekanbaru berada pada siklus MJO fase aktif (fase 3) selama 91 hari. Kondisi ini dapat meningkatkan konvergensi angin yang memengaruhi siklus curah hujan harian di wilayah Sumatra (Kamimera *et al.*, 2012; Seiki *et al.*, 2021).

Faktor tersebut menjadi penyebab paling berpengaruh terhadap pembentukan awan konvektif dan menyebabkan terjadinya perubahan arah serta penurunan kecepatan angin secara tiba-tiba (*shearline*) di lapisan bawah sekitar 925mb, sehingga menyebabkan penumpukan massa udara. Penelitian yang dilakukan oleh (Fitria *et al.*, 2022) juga menyatakan bahwa pada saat terjadinya konvergensi angin di pesisir timur Sumatra (Selat Malaka) akan berperan dalam pembentukan awan konvektif di wilayah Pekanbaru. Selain itu, transpor kelembapan yang cukup besar, baik dari Samudra Hindia maupun perairan Laut Cina Selatan mendukung terbentuknya awan *deep convective* (awan kumulonimbus) yang melampaui titik beku (*freezing level*) puncak awan hingga -79,4°C (pukul 10.10 UTC) dengan cakupan maksimum awan secara horizontal sekitar 68 km (pukul 10.50 UTC), serta ketinggian puncak awan yang mencapai sekitar 118mb.

Puncak awan yang sangat dingin jauh melampaui *freezing level* sehingga mendukung pembentukan dan pertumbuhan partikel es di

dalam awan sebelum jatuh ke permukaan sebagai butiran es. Karakteristik ini konsisten dengan kajian hujan es di Indonesia yang menekankan peran konveksi dalam dan suhu puncak awan yang sangat rendah sebagai prasyarat terbentuknya hujan es (Frystine *et al.*, 2021; Hidayati *et al.*, 2015; Sanjaya & Amri, 2022). Oleh karena itu, *droplet* yang dihasilkan oleh awan konvektif dapat bertumbuh menjadi lebih besar dan saat mencapai permukaan tanah masih dalam bentuk butiran es yang belum sepenuhnya menjadi cair. Akibatnya di wilayah Kota Pekanbaru terjadi hujan es (*hail*) yang berlangsung dari pukul 17.10 hingga 17.50 WIB (10.00 hingga 10.50 UTC).

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, M.-S., Kim, D., Ham, Y.-G., and Park, S. (2020): Role of Maritime Continent Land Convection on the Mean State and MJO Propagation, *Journal of Climate*, **33**(5), 1659–1675. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0342.1>
- Amri, S., Fajary, F. R., and Hadi, T. W. (2020): Analysis of Synoptic Disturbance in Maritim Continent Using Spherical Harmonics Transformation Method, *Agromet*, **34**(2), 89–99. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.34.2.89-99>
- Anam, A. R., and Amri, S. (2021): Analisis Kejadian Angin Puting Beliung Menggunakan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus Kota Bogor, Jawa Barat 21 September 2021), *Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah Indonesia*, **6**(2), 1456. <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v6i2.5276>
- Antara (26 March 2023): PLN Riau Pulihkan Listrik Akibat Terjangkan Hujan Badai, retrieved March 3, 2026, from internet: <https://www.antaraneews.com/berita/3457470/pln-riau-pulihkan-listrik-akibat-terjangkan-hujan-badai>.
- Ariwibowo, F. S., Nur, A. A. K., and Indra (2018): Identifikasi Fenomena Hujan Es Berbasis Analisis Faktor Cuaca Menggunakan Citra Satelit Himawari-8 Dan Data Upper Air Sounding (Studi Kasus : Kejadian Hujan Es Tanggal 20 Maret 2018 di Depok), *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, **2**(2). <https://doi.org/10.24198/jiif.v2i2.19729>
- Asfahanif, F., and Amri, S. (2022): Analisis Peristiwa Angin Kencang dengan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Bangkalan, 17 Oktober 2021), *Jurnal Geografi : Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*, **19**(2), 83–91. <https://doi.org/10.15294/jg.v19i2.34826>
- Auliya, M. N., and Mulya, A. (2022): Identifikasi Hail Berdasarkan Analisis Faktor Cuaca dan Pemanfaatan Teknik RGB serta SWA pada Citra Satelit Himawari 8 (Studi Kasus Kejadian Hujan Es di Kabupaten Malang pada 2 Maret 2021).
- Bayong, T. (1999): *Klimatologi Umum*, Penerbit ITB Bandung.
- Bramawanto, R., and Abida, R. F. (2017): Tinjauan Aspek Klimatologi (ENSO dan IOD) terhadap Produksi Garam Indonesia, *Jurnal Kelautan Nasional*, **12**(2), 91–99.
- Chang, Chih-Pei, Lu, M.-M., and Lim, H. (2016): Monsoon Convection in the Maritime Continent: Interaction of Large-Scale Motion and Complex Terrain, *Meteorological Monographs*, **56**, 6.1-6.29. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPH-S-D-15-0011.1>
- Chang, C-P., Harr, P. A., and Chen, H.-J. (2005): Synoptic Disturbances over the Equatorial South China Sea and Western Maritime Continent during Boreal Winter, *Monthly Weather Review*, **133**(3), 489–503. <https://doi.org/10.1175/MWR-2868.1>
- Climate Prediction Center - MJO Composites Information. (2010): , retrieved March 3, 2026, from internet: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/pr ecip/CWlink/MJO/Composites/Temperature/readme.shtml>.
- DeAngelis, A. M., Qu, X., Zelinka, M. D., and Hall, A. (2015): An Observational Radiative Constraint on Hydrologic Cycle Intensification, *Nature*, **528**(7581), 249–253. <https://doi.org/10.1038/nature15770>
- Dessens, J. (1995): Severe Convective Weather in the Context of a Nighttime Global Warming, *Geophysical Research Letters*, **22**(10), 1241–1244. <https://doi.org/10.1029/95GL00952>
- Dewi, B., and Amri, S. (2022): Pengaruh Cross-Equatorial Northerly Surge terhadap Kejadian Banjir di Jakarta (Studi Kasus 31 Desember 2019 - 1 Januari 2020), *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, **6**(1), 41–52. <https://doi.org/10.24198/jiif.v6i1.37914>
- Dewi, B., Amri, S., Robi, M., Dpo, V., and Novria, S. (2023): The Influence of Cross-Equatorial Northerly Surge in the Western Maritime Continent, *E3S Web of Conferences*, **464**, 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346402005>
- Fadholi, A. (2012): Analisa Kondisi Atmosfer pada Kejadian Cuaca Ekstrem Hujan Es.
- Febrian, A., and Amri, S. (2023): Analisis Citra Satelit Himawari-8 Terkait Kejadian Puting Beliung di Kabupaten Bogor (Studi Kasus 02 November 2021), *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, **10**(1), 34–39.
- Fitria, N. I., Sagita, N., and Cahyani, A. I. (2022): Identification of Tropical Squall Line Using Infrared Channel Himawari-8 Satellite Imagery (Case Study Of 6-7 December

- 2020 in the Indian Ocean), *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, **23**(3), 31. <https://doi.org/10.31172/jmg.v23i3.808>
- Frisby, E. M., and Sansom, H. W. (1967): Hail Incidence in the Tropics, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **6**(2), 339–354.
- Frystine, M., Mulya, A., Kristianto, A., and Maulidiah, M. P. (2021): Analysis of Atmospheric Condition on Hail Event at Pelalawan (Case Study: September 23rd, 2019), **23**(3).
- Hasibuan, M. A., Atmojo, D. A., Wahyujati, H., Hakim, F. N., and Giarno, G. (2023): Analisis Korelasi Statistik Fenomena Kejadian ENSO dan MJO terhadap Kondisi Klimatologis di Provinsi Riau, *GEOGRAPHIA: Jurnal Pendidikan Dan Penelitian Geografi*, **4**(2), 104–111.
- Hidayati, R., Ramalis, T. R., and Mujtahiddin, M. I. (2015): Analisis Kejadian Hujan Es di Wilayah Bandung Berdasarkan Kondisi Atmosfer dan Citra Satelit, *Fibusi (Jurnal Online Fisika)*, **3**(1).
- HK, B. T., Juaeni, I., and Harijono, S. W. B. (2007): Proses Meteorologis Bencana Banjir di Indonesia, *J. Meteorol. Dan Geofis*, **8**(2), 1–13.
- Kamimera, H., Mori, S., Yamanaka, M. D., and Syamsudin, F. (2012): Modulation of Diurnal Rainfall Cycle by the Madden-Julian Oscillation Based on One-Year Continuous Observations with a Meteorological Radar in West Sumatera, *SOLA*, **8**(0), 111–114. <https://doi.org/10.2151/sola.2012-028>
- Karmini, M. (2000): Hujan Es (Hail) di Jakarta, 20 April 2000, *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, **1**(1), 27–32.
- Kishore, P., Jyothi, S., Basha, G., Rao, S. V. B., Rajeevan, M., Velicogna, I., and Sutterley, T. C. (2016): Precipitation Climatology Over India: Validation with Observations and Reanalysis Datasets and Spatial Trends, *Climate Dynamics*, **46**(1–2), 541–556. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2597-y>
- Lafleur, D. M., Barrett, B. S., and Henderson, G. R. (2015): Some Climatological Aspects of the Madden-Julian Oscillation (MJO), *Journal of Climate*, **28**(15), 6039–6053. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00744.1>
- Li, Z., Yu, W., Li, K., Liu, B., and Wang, G. (2015): Modulation of Interannual Variability of Tropical Cyclone Activity over Southeast Indian Ocean by Negative IOD Phase, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **72**, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.10.006>
- Meukaleuni, C., Lenouo, A., and Monkam, D. (2016): Climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) in ERA-Interim reanalysis over West Africa, *Atmospheric Science Letters*, **17**(1), 65–70.
- Riau Pos (27 March 2023): Pemko Tangani Pohon Tumbang dan Rumah Rusak, , retrieved March 3, 2026, from internet: <https://riaupos.jawapos.com/pekanbaru/2253580069/pemko-tangani-pohon-tumbang-dan-rumah-rusak>.
- RiauOnline (26 March 2023): Rumah Warga Pekanbaru Rusak Diterjang Hujan Es Disertai Angin Kencang, , retrieved March 3, 2026, from internet: <https://www.riauonline.co.id/kota-pekanbaru/read/2023/03/27/rumah-warga-pekanbaru-rusak-diterjang-hujan-es-disertai-angin-kencang>.
- Sanjaya, W., and Amri, S. (2022): Analisis Citra Satelit Himawari 8/9 Terkait Kejadian Hujan Es di Wilayah Klaten Tanggal 21 Oktober 2021, *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, **9**(2), 111–119.
- Seiki, A., Yokoi, S., and Katsumata, M. (2021): The Impact of Diurnal Precipitation over Sumatra Island, Indonesia, on Synoptic Disturbances and its Relation to the Madden-Julian Oscillation, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **99**(1), 113–137. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-007>
- Syaifulah, M. D. (2017): Analisis Kondisi Udara Atas Wilayah Indonesia dengan Data Radiosonde, *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, **18**(1).
- Tuovinen, J.-P., Rauhala, J., and Schultz, D. M. (2015): Significant Hail Producing Storms in Finland: Convective Storm Environment and Mode, *Weather and Forecasting*, **30**(4), 1064–1076. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00159.1>
- Wang, P. K., Lin, H.-M., and Su, S.-H. (2010): The Impact of Ice Microphysical Processes on the Life Span of a Midlatitude Supercell Storm, *Atmospheric Research*, **97**(4), 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.05.006>
- Wheeler, D. (1999): *Atmosphere, Weather and Climate*, Wiley Online Library.
- Wheeler, M. C., and Hendon, H. H. (2004): An All-Season Real-Time Multivariate MJO Index: Development of an Index for Monitoring and Prediction, *Monthly Weather Review*, **132**(8), 1917–1932. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2)
- Zakir, A. (2008): Modul Praktis Analisis dan Prakiraan Cuaca, *BMKG, Jakarta*.
- Zhang, L., Han, W., Meehl, G. A., Hu, A., Rosenbloom, N., Shinoda, T., and Mcphaden, M. J. (2021): Diverse Impacts of the Indian Ocean Dipole on El Niño–Southern Oscillation, *JOURNAL OF CLIMATE*, **34**.