Analisis kondisi dinamika atmosfer berdasarkan citra satelit, model reanalisis dan data observasi (studi kasus hujan es di Depok pada 10 Januari 2023)

Rendy Syahril Amanu[1], Yahya Darmawan[2]*

[1] Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
[2] Program Studi Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
Jl. Meteorologi No.5, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15221
**email: yahya.darmawan@bmkg.go.id*

Abstrak – Hujan es adalah fenomena cuaca ekstrem dari sistem konvektif seperti awan cumulonimbus (Cb) yang jarang terjadi tetapi berdampak signifikan pada infrastruktur, pertanian, dan keselamatan. Penelitian ini menganalisis dinamika atmosfer yang mempengaruhi hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 UTC menggunakan data satelit Himawari-9, model ERA-5, dan sounding udara atas. Data Himawari-9 dianalisis dengan perangkat lunak SATAID melalui interpretasi saluran IR dan metode RGB *Day Convective Storms* serta *24-hour Microphysics*. Data ERA-5 menghasilkan grafik *timeseries* variabel atmosfer, sementara data sounding divisualisasikan dengan diagram Skew-T log-P dan indeks labilitas atmosfer. Analisis menunjukkan siklus hidup awan cumulonimbus dengan suhu puncak di bawah -60°C. Parameter divergensi mengindikasikan adanya konvergensi signifikan di lapisan bawah, divergensi di lapisan atas, serta kelembaban tinggi di lapisan menengah dan atas, yang mendukung pembentukan kristal es. Indeks labilitas atmosfer seperti TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, dan Showalter Index menunjukkan ketidakstabilan atmosfer dan energi konvektif.

Kata kunci: hujan es, cumulonimbus, Himawari-9, labilitas atmosfer

Abstract – *Hail is an extreme weather phenomenon from convective systems such as cumulonimbus (Cb) clouds that rarely occurs but has a significant impact on infrastructure, agriculture, and safety. This study analyzes the atmospheric dynamics affecting hail in Depok on January 10, 2023, at 08:40 UTC using Himawari-9 satellite data, the ERA-5 model, and upper-air soundings. Himawari-9 data were analyzed using the SATAID software through IR channel interpretation and the RGB Day Convective Storms and 24-hour Microphysics methods. ERA-5 data produces timeseries graphs of atmospheric variables, while sounding data is visualized with Skew-T log-P diagrams and atmospheric instability indices. Analysis shows the life cycle of cumulonimbus clouds with peak temperatures below -60°C. Divergence parameters indicate significant convergence in the lower layer, divergence in the upper layer, and high humidity in the middle and upper layers, which support the formation of ice crystals. Atmospheric instability indices such as TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, and Showalter Index indicate atmospheric instability and convective energy.*

Key words: *hail, cumulonimbus, Himawari-9, atmospheric instability*

PENDAHULUAN

Hujan es merupakan salah satu fenomena atmosfer yang berbentuk presipitasi berbentuk es. Fenomena ini biasanya dikaitkan dengan sistem cuaca konvektif seperti awan *cumulonimbus* (Cb), dengan es yang terbentuk sekitar 5 mm[1]. Pembentukan awan Cb di daerah ekuator dimulai dari tidak stabilnya atmosfer, menyebabkan adanya *updraft* yang kuat menyebabkan pembentukan awan kumulonimbus yang dapat mencapai hingga tropopause yang memungkinkan adanya pembentukan es di awan [2], [3].

Dimana pembentukan es di awan konvektif terjadi setelah melewati pada *freezing level* dalam awan dengan suhu dibawah 0 derajat Celsius yang memungkinkan pembekuan uap air hingga menjadi partikel es [4], [5]. Saat partikel es mulai bergerak turun ke permukaan akibat ada *downdraft*, partikel es tersebut akan melewati lapisan yang lebih hangat sehingga sebagian partikel es meleleh, namun jika suhu udara tetap cukup dingin atau dorongan angin yang kuat ke bawah menyebabkan partikel es tetap dalam bentuk es saat mencapai permukaan bumi [6].

Frekuensi hujan es meskipun relatif rendah dibandingkan jenis presipitasi air umumnya, namun dampak dari hujan es sering kali tidak dapat diabaikan. Kerusakan bangunan Selain itu, hujan es juga dapat merusak atap bangunan, kendaraan, dan fasilitas umum lainnya, serta

menyebabkan gangguan pada jaringan listrik dan telekomunikasi [7], [8]. Beberapa sektor lainnya seperti pertanian dan keselamatan manusia. Dalam sektor pertanian, hujan es dapat merusak tanaman secara langsung, baik yang masih muda maupun yang sudah matang [9]. Dampak lainnya yang tidak kalah penting adalah keselamatan manusia, terutama ketika hujan es turun dengan intensitas tinggi dan butiran es berukuran besar [10]. Oleh karena itu hujan es menjadi fenomena yang tidak dapat dihindari sehingga dapat menghambat kegiatan sehari-hari, dan meningkatkan kerentanan masyarakat terhadap bencana [11].

Sifat lokal dari hujan es dengan distribusi spasial dan temporal yang tidak merata menyebabkan hujan es sulit diprediksi dengan akurat [12]. Analisis hujan es membutuhkan pendekatan ilmiah dengan beberapa data seperti observasi permukaan, data satelit, radar cuaca dan model numerik agar memungkinkan identifikasi pembentukan hujan es [13]. Parameter meteorologi seperti suhu permukaan, kelembaban udara, labilitas atmosfer, konvergensi serta profil vertikal suhu menjadi beberapa parameter yang memiliki kaitan dengan kejadian hujan es [14], [15].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis fenomena hujan es dengan fokus pada faktor-faktor meteorologi yang mempengaruhi pembentukan awan cumulonimbus serta labilitas atmosfer yang berperan dalam terbentuknya es di dalam awan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter meteorologi saat terjadinya hujan es

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah Depok, Jawa Barat, Indonesia, dengan koordinat -6.402905, 106.778419, seperti pada Gambar 1. Waktu penelitian difokuskan pada periode 07 UTC hingga 12 UTC pada tanggal 10 Januari 2023, yang mencakup rentang waktu pertumbuhan awan konvektif dari awal tumbuh hingga luruh.

Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data

Citra satelit Himawari 9 dan Model numerik *Global Spectral Model* (GSM) digunakan untuk menganalisis fenomena awan konvektif dengan memanfaatkan beberapa kanal seperti Tabel 1. Data tersebut diperoleh dari Ja*pan Meteorological Agency* (JMA) [16], yang menyediakan data dan arsip untuk berbagai kebutuhan penelitian atmosfer.

Tabel 1. Data Saluran Satelit Himawari yang digunakan

Band	Saluran	Kategori	*Wavelength* (μm)	Resolusi Spasial
Band 2 (VS)	VS	Spektrum Tampak	0.51-0.88	1 km
Band 7 (MI)	MI	Inframerah Tengah	3.75-4.05	2 km
Band 8 (WV)	WV	Uap Air	6.05-7.05	2 km
Band 13 (IR)	IR	Inframerah	10.3-11.3	2 km
Band 15 (IR)	IR	Inframerah	12.4-13.3	2 km

Penelitian ini menggunakan data reanalisis ERA5, yang diproduksi oleh *Copernicus Climate Change Service* (C3S) di bawah naungan *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [17]. Data ERA5 ini dapat diakses secara daring melalui *Climate Data Store* (CDS) pada tautan https://cds.climate.copernicus.eu/datasets. Dengan data yang digunakan seperti terlampir pada Tabel 2.

Tabel 2. Data ECMWF Reanalisis (ERA 5) yang digunakan [17]

Parameter	Unit	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal
Divergensi	s^{-1}	0.25° (~25 km)	1 jam
Vertical Velocity	Pa/s	0.25° (~25 km)	1 jam
Specific Ice Water Content	kg/kg	0.25° (~25 km)	1 jam
Relative Humidity	%	0.25° (~25 km)	1 jam
U-wind Component	m/s	0.25° (~25 km)	1 jam
V-wind Component	m/s	0.25° (~25 km)	1 jam

Data *sounding upper air* yang diambil dari *Wyoming University* melalui tautan https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html, pada lokasi stasiun meteorologi Soekarno-Hatta (kode stasiun 96749, WIII Jakarta) pada tanggal 10 Januari 2023, digunakan untuk menganalisis kondisi atmosfer vertikal. Pengamatan dilakukan pada dua waktu, yaitu pukul 00 UTC dan 12 UTC.

Metode

Data citra satelit Himawari 9 dilakukan interpretasi menggunakan perangkat lunak SATAID. SATAID (*Satellite Animation and Interactive Diagnosis*) adalah aplikasi yang dikembangkan oleh *Japan Meteorological Agency* (JMA) untuk analisis data satelit meteorologi secara interaktif. Aplikasi ini digunakan oleh peneliti dan praktisi meteorologi untuk memvisualisasikan, menganalisis, dan memantau kondisi atmosfer [16].

Metode RGB (Red-Green-Blue) pada satelit Himawari digunakan untuk visualisasi fenomena cuaca tertentu, seperti badai konvektif siang hari (*Day Convective Storms*) dan mikrofisika awan selama 24 jam (*24-hour Microphysics*).

Untuk *Day Convective Storms* digunakan untuk mengidentifikasi awan konvektif dengan arus naik yang kuat pada siang hari. Dengan konfigurasi menurut Shimizu A (2020).

Tabel 3. Konfigurasi composite imagery Day convective Storms [18]

Day Convective Storm					
	Bands	*Wavelength* (μm)	Min [K/%]	Max [K/%]	Gamma
R	B10-B08	7.3-6.2	-5.0K	36.0K	1
G	B13-B07	10.4-3.9	-1.0K	61.0K	0.5
B	B03-B05	0.64-1.6	-80%	26%	0.95

24-hour Microphysics untuk digunakan untuk menganalisis awan pada siang dan malam hari. Dengan konfigurasi berdasarkan Tabel 4.

Tabel 4. Konfigurasi composite imagery 24-hours microphysics [18]

24 Hours Microphysics					
	Bands	*Wavelength* (μm)	Min [K/%]	Max [K/%]	Gamma
R	B13-B15	10.4-12.4	-3.0K	7.5K	1
G	B11-B13 /B11-B14	8.6-10.4 /8.6-11.2	0.8K -0.4K	5.8K 6.1K	1.3 1.1
B	B13	10.4	248.6K	6.1K	1

Pengolahan data ERA 5 dilakukan menggunakan perangkat lunak GrADS. Data atmosfer berupa divergensi, kecepatan vertikal (*vertical velocity*), *specific ice water content*, dan kelembapan relatif (*relative humidity*) diinterpretasikan menjadi grafik *timeseries* menggunakan GrADS, dimana nilai masing masing variabel diekstrak dari koordinat lokasi kejadian [19].

Data *sounding upper air* dari *Wyoming University* divisualisasikan dalam diagram Skew-T log-P untuk menunjukkan profil vertikal suhu, kelembaban, dan kecepatan angin di atmosfer. Diagram ini memberikan informasi tentang labilitas atmosfer, keberadaan inversi suhu, lapisan jenuh, dan potensi konveksi pada tanggal tersebut, yang penting untuk memahami dinamika cuaca [20].

Data labilitas atmosfer dibandingkan dengan hasil penelitian dan ambang batas dari Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2014), Prasetyo dkk. (2020), dan Fibriantika dan Mayangwulan (2020) pada Tabel 3.

Tabel 5. Indeks labilitas atmosfer [21], [22], [23]

Indeks	Lemah	Moderate	Kuat
TT Indeks	< 42	42 - 46	> 46
K Indeks	< 29	29 - 37	> 37
SWEAT	< 135	135 - 239	> 239
CAPE	< 1000	1000 - 2500	> 2500
LI Indeks	> -2	-2 s/d -6	< -6
Showalter Indeks	> 4	4 s/d -4	< -4

dengan persamaan masing masing indeks labilitas sebagai berikut

$$TT\ Indeks = (T_{850} - T_{500}) + (T_{d850} - T_{d500} \quad (1)$$

$$K\ Indeks = (T_{850} - T_{500}) + T_{d85} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (2)$$

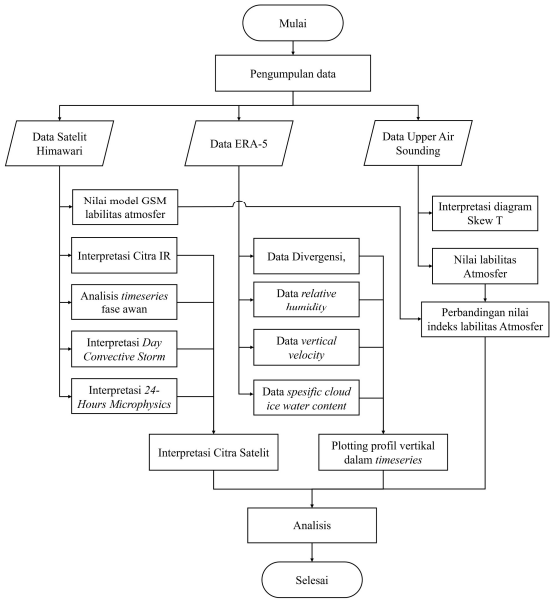
$$SWEAT = 20\,(TTI - 49) + 12\,T_{d1} + 2f_1 + f_2 + 125(Sin\ \alpha + 0.2) \quad (3)$$

$$CAPE = g \int_{zLFC}^{zEL} \left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}}\right) dz \quad (4)$$

$$LI\ Indeks = T_{env} - T_{lift} \quad (5)$$

$$\text{Showalter Indeks} = T_{500}\,hPa - T_{850hPa-500\,hP} \quad (6)$$

Metode pada penelitian kali ini dijelaskan dengan diagram alir pada Gambar 2.



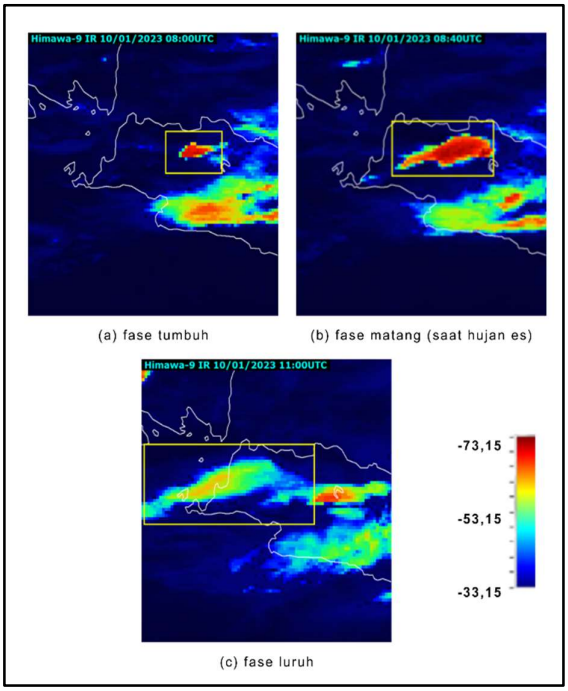
Gambar 2. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Interpretasi Inframerah Satelit Himawari

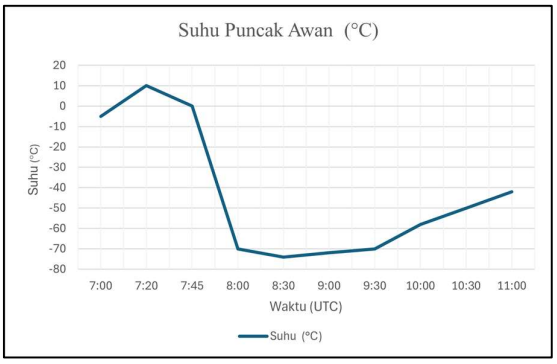
Interpretasi citra IR dari satelit Himawari-9 pada Gambar 3 merupakan tiga fase ini siklus hidup awan cumulonimbus selama kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023. Dengan gambar (a) Fase Tumbuh (08:00 UTC), gambar (b) Fase Matang (08:40 UTC) dan gambar (c) Fase Luruh (11:00 UTC).

Pada fase tumbuh, citra menunjukkan awal pembentukan sel awan konvektif yang ditandai oleh area dengan warna kuning hingga oranye. Mengindikasikan bahwa awan mulai berkembang ke arah vertikal dengan puncak awan yang dingin. Pada fase matang, citra IR memperlihatkan intensifikasi aktivitas sel awan konvektif. Warna merah pekat mendominasi, area awan cumulonimbus menunjukkan suhu puncak awan yang rendah. Pada fase luruh, aktivitas konvektif mulai melemah, yang terlihat dari menurunnya suhu puncak awan dari sel awan cumulonimbus.



Gambar 3. Intepretasi Citra IR (a) saat sel awan konvektif mulai terbentuk, (b) saat terjadi hujan es dan (c) saat sel awan konvektif mulai luruh

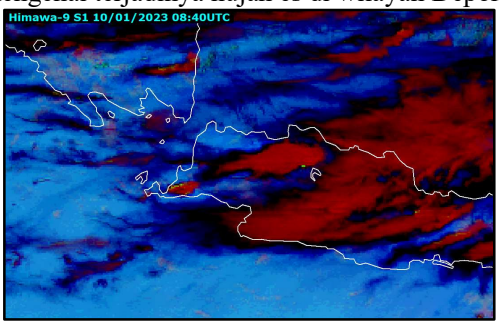
Pada Gambar 4. Menunjukkan data *timeseries* suhu puncak awan di Depok dari pukul 07.00 UTC – 11.00 UTC. Aktivitas vertikal yang tinggi pada awan cumulonimbus fase pertumbuhan yang cepat sekitar pukul 07.30 UTC hingga mencapai puncaknya di sekitar pukul 08:00 dan berlanjut hingga pukul 09:30 UTC bertepatan dengan waktu kejadian hujan es di Depok pada pukul 08.40 UTC, menunjukkan penurunan suhu puncak awan hingga di bawah -60°C menunjukkan bahwa puncak awan telah mencapai ketinggian di mana suhu atmosfer berada di bawah titik beku, sehingga memungkinkan terbentuknya partikel es.



Gambar 4. *Timeseries* suhu puncak awan di Depok

Berdasarkan citra *composite 24-Hours microphysics* Himawari dalam Gambar 5, wilayah Depok terlihat didominasi oleh warna merah gelap (#930000) pada Tabel 6, yang menunjukkan keberadaan awan tebal, tinggi, dan dingin, sesuai dengan klasifikasi pada tabel interpretasi. Awan jenis ini merupakan ciri khas dari awan yang terbentuk pada ketinggian yang sangat tinggi dengan suhu puncak awan yang rendah.

Awan es yang tebal dan tinggi dapat terbentuk pada sistem cuaca yang sangat aktif, seperti badai petir atau cumulonimbus. Awan jenis ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan hujan deras, angin kencang, dan bahkan hujan es jika terdapat kondisi atmosfer yang mendukung. Oleh karena itu pada pukul 08.40 UTC, ditemukan indikasi yang kuat mengenai terjadinya hujan es di wilayah Depok.



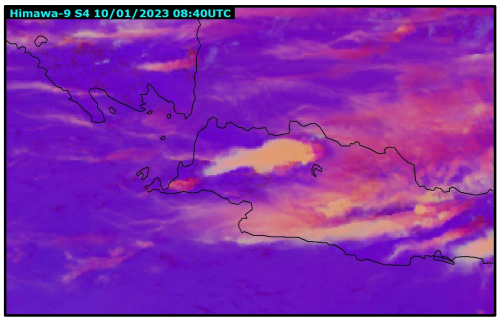
Gambar 5. Himawari-8 RGB composite imagery 24-Hours Microphysics

Tabel 6. Interpretasi warna metode 24-Hours Microphysics

Color	Interpretation	RGB Value	HTML
	Thick, high and cold ice clouds	147,0,0	#930000
	Thick water clouds	157,99,40	#9D6328
	Clouds with small particles	32,180,125	#20B47D
	Thin cirrus clouds	0,0,0	#000000
	Dust (Yellow sand)	255,0,146	#FF0092
	Sands with quartz mineral	207,239,239	#CFEFEF

Pada citra composite *Day Convective Storm* Himawari pukul 08.40 UTC pada Gambar 6, wilayah Depok didominasi oleh warna kuning (#FFFF64) seperti padapada Tabel 7 dengan sedikit warna merah pada sel awan cumulonimbus tersebut.

Warna kuning menunjukkan keberadaan awan cumulonimbus (Cb) dengan partikel es kecil yang mengalami arus naik kuat. Awan ini berpotensi menghasilkan fenomena cuaca ekstrem, termasuk hujan es dan petir. Sementara itu, warna merah menunjukkan adanya awan hujan dalam dengan partikel es besar di lapisan atas atmosfer.



Gambar 6. Himawari-8 RGB composite imagery Day Convective Storm

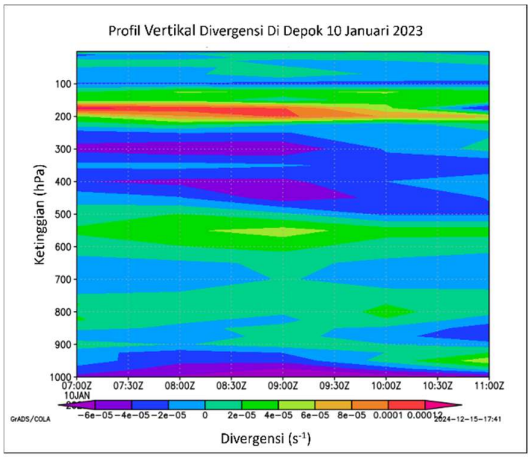
Tabel 7. Interpretasi warna metode Day Convective Storm

Color	Interpretation	RGB Value	HTML
	Deep precipitating cloud (precip. not necessarily reaching the ground) - high-level cloud, large ice particles	225,38,14	#E1260E
	Deep precipitating cloud (Cb cloud with strong updrafts and severe weather)* - high-level cloud, small ice particles *or thick, high-level lee cloudiness with small ice particles	255,255,100	#FFFF64
	Thin Cirrus cloud (large ice particles)	170,40,90	#AA285A
	Thin Cirrus cloud (small ice particles)	170,60,175	#AA3CAF
	Ocean	60,0,170	#3C00AA
	Land	86,6,255	#5606FF

Analisis Profil Vertikal Parameter Meteorologi Data Model ERA 5

Pada Gambar 7. menginterpretasikan profil vertikal divergensi menunjukkan pola konvergensi yang signifikan di lapisan atmosfer bawah hingga menengah (sekitar 800-400 hPa) pada pukul 08.40 UTC. Konvergensi udara di lapisan ini mendukung peningkatan massa udara ke atas, yang memperkuat proses konveksi. Pada lapisan atas (200–100 hPa), terdapat pola divergensi yang kuat, menunjukkan keluarnya massa udara dari puncak awan cumulonimbus.

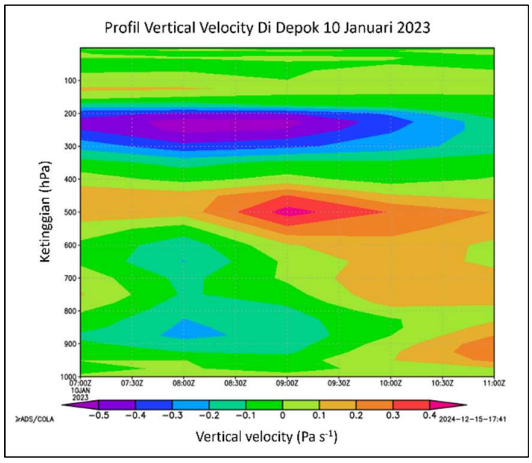
Konvergensi di lapisan bawah dan divergensi di lapisan atas menciptakan kondisi ideal untuk pertumbuhan awan konvektif intensif. Kombinasi ini mendukung pembentukan awan cumulonimbus yang besar, yang berpotensi menghasilkan hujan es di wilayah Depok.



Gambar 7. Profil vertikal divergensi saat kejadian hujan es

Berdasarkan grafik profil kecepatan vertikal (vertical velocity) di Depok pada tanggal 10 Januari 2023, terlihat adanya pola dinamika vertikal atmosfer yang signifikan di beberapa lapisan pada rentang waktu 07.00 hingga 11.00 WIB.

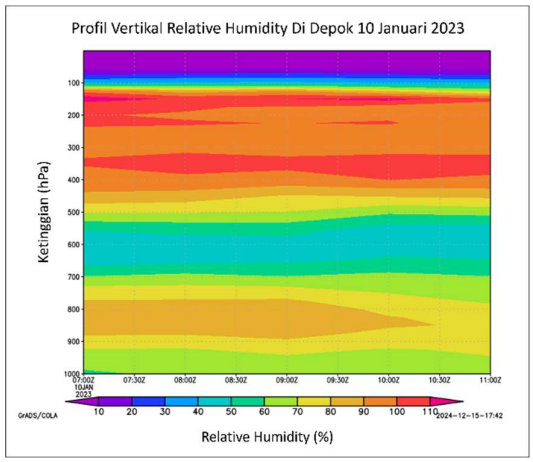
Pada waktu kejadian hujan es, yaitu sekitar pukul 08.40 WIB, profil menunjukkan adanya nilai kecepatan vertikal negatif yang kuat pada lapisan 500–300 hPa. Nilai kecepatan vertikal negatif ini mengindikasikan adanya pengangkatan massa udara secara intensif. Profil kecepatan vertikal yang menunjukkan nilai negatif yang dominan pada lapisan tengah hingga atas atmosfer secara langsung mendukung aktivitas konveksi intensif yang berujung pada pembentukan hujan es di Depok pada pukul 08.40 WIB, 10 Januari 2023.



Gambar 8. Profil *vertical velocity* saat kejadian hujan es

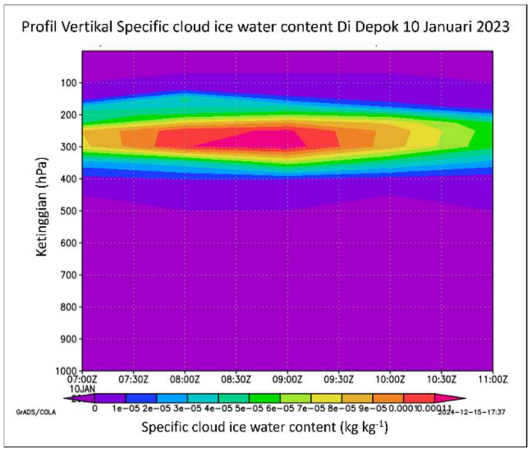
Hasil analisis relative humidity seperti pada Gambar 9. Pada ketinggian 300-500 hPa ditemukan kelembaban relatif sebesar 70-90%, yang menunjukkan saturasi parsial dan mendukung pembentukan awan. Di atas 200 hPa, kelembaban relatif melebihi 90%, mengindikasikan kemungkinan terbentuknya awan yang dapat mendukung proses pembekuan partikel air. Sebaliknya, di lapisan bawah (700-900 hPa) kelembaban relatif lebih rendah, berkisar 40-60%, yang mendukung proses evaporasi dan pendinginan lokal, berkontribusi pada pembentukan butiran es saat terjadi konveksi kuat.

Gradien kelembaban yang signifikan antara lapisan atas dan bawah mencerminkan ketidakstabilan atmosfer yang memicu konveksi. Peningkatan kelembaban tajam di lapisan menengah (400-600 hPa) pada pukul 08.00-09.00 UTC memperkuat potensi pertumbuhan awan cumulonimbus yang mendukung terjadinya hujan es.



Gambar 9. Profil vertikal *relative humidity* saat kejadian hujan es

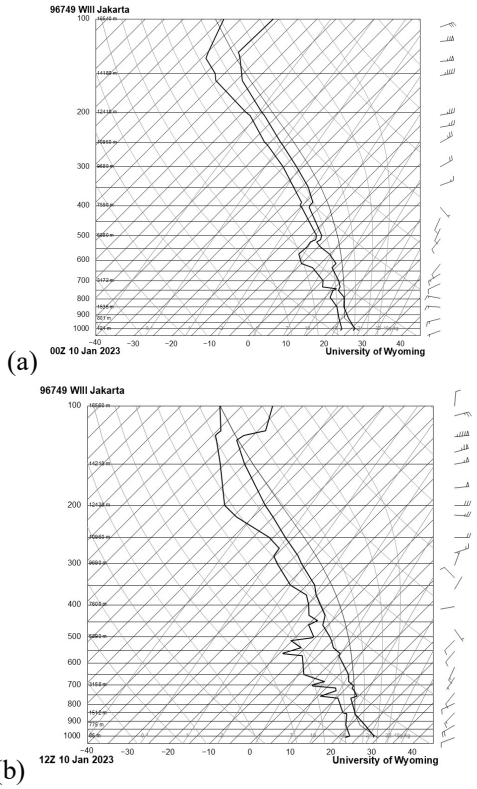
Analisis kandungan es awan menunjukkan bahwa konsentrasi tertinggi terletak di sekitar 300-400 hPa, dengan nilai maksimum mencapai 1.0×10^{-3} kg/kg sekitar pukul 08.00 UTC hingga 09.00 UTC. Konsentrasi ini menunjukkan adanya kristal es yang signifikan pada lapisan tersebut dan sesuai pada waktu kejadian hujan es di Depok pukul 08.40 UTC, memperkuat indikasi proses pembentukan hujan es melalui pengangkatan dan pembekuan di puncak awan konvektif.



Gambar 10. Profil vertikal *spesific cloud ice water content* saat kejadian hujan es

Konsentrasi ini menunjukkan adanya kristal es yang signifikan pada lapisan tersebut, memperkuat indikasi proses pembentukan hujan es melalui pengangkatan dan pembekuan di puncak awan konvektif.

Analisis Labilitas Atmosfer Berdasarkan Data Model GSM dan Data Pengamatan Udara Atas Di Jakarta



Gambar 11. Diagram Skew-T dari pengamatan Upper Air Di Jakarta (a) pukul 00 UTC dan (b) pukul 12 UTC

Pada pukul 00Z, profil atmosfer menunjukkan kelembaban relatif yang cukup tinggi di lapisan menengah (300–500 hPa) dengan suhu yang mendekati titik beku. Lapisan ini menjadi kunci dalam proses pembentukan kristal es di awan. Selain itu, di lapisan bawah (700–900 hPa), kelembaban relatif yang lebih rendah mendukung proses evaporasi yang mendinginkan udara dan memperkuat ketidakstabilan lokal.

Pada pukul 12Z, terjadi peningkatan pemanasan di lapisan bawah, yang memperkuat ketidakstabilan atmosfer. Nilai CAPE (Convective Available Potential Energy) yang meningkat menunjukkan akumulasi energi yang cukup besar untuk memicu konveksi kuat. Gradien suhu yang tajam di lapisan menengah memperkuat proses konveksi, memungkinkan butiran air terdorong ke ketinggian yang lebih dingin dan membeku menjadi kristal es.

Perubahan kondisi atmosfer dari 00Z ke 12Z menegaskan adanya ketidakstabilan yang mendukung terbentuknya awan cumulonimbus dengan updraft yang kuat. Struktur vertikal atmosfer ini berperan dalam menciptakan lingkungan yang kondusif untuk pembentukan es di awan dan presipitasi berbentuk hujan es.

Tabel 8. Indeks labilitas atmosfer data model GSM Himawari dan Observasi radiosonde Stasiun Meteorologi Soekarno Hatta

Indeks Labilitas Atmosfer		Nilai	Stabilitas
TT	GSM Himawari	44.4	Moderate
	Obs 00 UTC	47.3	
	Obs 12 UTC	46.8	
KI	GSM Himawari	33	Moderate
	Obs 00 UTC	36.4	
	Obs 12 UTC	30.3	
SWEAT	GSM Himawari	217	Moderate
	Obs 00 UTC	234.8	
	Obs 12 UTC	218.79	
CAPE	GSM Himawari	944	Lemah
	Obs 00 UTC	1510.74	Moderate
	Obs 12 UTC	1731.68	
LI	GSM Himawari	-3.2	Moderate
	Obs 00 UTC	-4.1	
	Obs 12 UTC	-4.48	
Showalter Indeks	Obs 00 UTC	-2.07	Moderate
	Obs 12 UTC	-1.55	

Kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 WIB dapat dijelaskan melalui analisis parameter atmosfer yang menunjukkan tingkat ketidakstabilan signifikan. Total Totals Index (TT) berada pada kategori Moderate dengan nilai 44.4–47.3, mengindikasikan potensi konveksi sedang hingga kuat. *K-Index* (KI) juga berada pada kategori Moderate (33–36.4), mencerminkan kelembaban cukup di lapisan menengah. Nilai *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) mencapai 234.8, menunjukkan adanya potensi cuaca buruk meskipun dalam kategori Lemah hingga Moderate. Selain itu, *Convective Available Potential Energy* (CAPE) yang sangat tinggi (1731.68 J/kg) dan *Lifted Index* (LI) negatif (-4.8) menguatkan adanya ketidakstabilan atmosfer dan energi konvektif besar yang mendukung pembentukan awan cumulonimbus. *Showalter Index* (SI) juga berada dalam kategori Moderate (-2.0 hingga -1.55), menambah bukti kuat akan ketidakstabilan atmosfer. Parameter-parameter ini secara kolektif menunjukkan kondisi atmosfer yang sangat mendukung konveksi kuat, dinamika vertikal yang intens, dan pembentukan awan cumulonimbus yang menghasilkan hujan es. Analisis ini menegaskan pentingnya pemantauan parameter atmosfer untuk meningkatkan prediksi cuaca ekstrem di wilayah tropis.

KESIMPULAN

Kejadian hujan es di Depok pada 10 Januari 2023 pukul 08.40 UTC merupakan hasil dari kombinasi faktor-faktor atmosfer yang menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan. Analisis citra IR Himawari-9 dan RGB composite imagery menunjukkan siklus hidup awan cumulonimbus dengan suhu puncak di bawah -60°C, keberadaan partikel es, serta potensi presipitasi es. Profil vertikal ERA-5 mengindikasikan konvergensi kuat, kelembaban tinggi di lapisan menengah dan atas, serta dinamika vertikal udara yang mendukung pembentukan kristal es. Nilai indeks labilitas atmosfer (TT, KI, SWEAT, CAPE, LI, dan Showalter Index) menunjukkan ketidakstabilan atmosfer dan terdapat energi konvektif, yang memicu pembentukan awan cumulonimbus aktif. Secara keseluruhan, kombinasi faktor termodinamika, dinamika atmosfer, dan kondisi mikrofisika awan mendukung pembentukan hujan es pada waktu tersebut

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan rekan rekan, atas dukungan yang diberikan. Serta kepada rekan-rekan yang telah membantu dan mendukung penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Tjasyono, “Klimatologi,” 2004, *Bandung: ITB*.

[2] B. H. K. Tjasyono, S. W. B. Harijono, and B. Sri Woro, “Atmosfer Ekuatorial,” Puslitbang, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2013.

[3] W. Sulistiyono, R. S. Ramadhan, and Y. Donni, “Kajian Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Lebat Di Kota Surakarta Menggunakan Analisis Skala Meteorologi,” *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 7, no. 1, pp. 32–45, Jun. 2023, doi: 10.37478/optika.v7i1.2626.

[4] S. W. Borland et al., “The structure and mechanisms of hailstorms,” *Hail: A review of hail science and hail suppression*, pp. 1–47, 1977.

[5] A. Ali and U. Saâ, “Implementasi Metode Deteksi Hujan Es Berbasis Data Radar Cuaca Menggunakan Algoritma Severe Hail Index (SHI),” *Jurnal Fisika Unand*, vol. 11, no. 3, pp. 380–386, 2022.

[6] D. Ardiansyah, “Labilitas Atmosfer Terkait Kejadian Hujan Es (Studi Kasus Hujan Es Di Sindang Dataran Bengkulu Tanggal 25 Juni 2021),” *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, vol. 2, no. 2, pp. 34–48, 2022.

[7] A. Irwan, “Analisa Respon Mekanik Genteng Dari Bahan Beton Busa Diperkuat Serat Tkks Akibat Beban Impak Hujan Es Dengan Menggunakan Impactor Batang Aluminium,” *Journal Of Mechanical Engineering Manufactures Materials And Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 57–63, 2019.

[8] R. L. Lucy and S. E. Petty, “Hail Damage Assessments to Low-Sloped Roof Systems,” in *Forensic Engineering, CRC Press*, 2021, pp. 111–148.

[9] M. Battaglia, C. Lee, W. Thomason, J. Fike, and A. Sadeghpour, “Hail Damage

Impacts on Corn Productivity: A Review," Crop Sci, vol. 59, no. 1, pp. 1–14, Jan. 2019, doi: 10.2135/cropsci2018.04.0285.

[10] K. Liu, P. Li, and Z. Wang, "Statistical modeling of random hail impact," *Extreme Mech Lett*, vol. 48, p. 101374, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.eml.2021.101374.

[11] T. Púčik et al., "Large Hail Incidence and Its Economic and Societal Impacts across Europe," *Mon Weather Rev*, vol. 147, no. 11, pp. 3901–3916, Nov. 2019, doi: 10.1175/MWR-D-19-0204.1.

[12] F. Blasina, A. Echarri, G. Farber, F. Molina, S. Machín, and N. Pérez, "Implementation and evaluation of a hail-impact simulation device," *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, no. 23, pp. 135–150, 2022.

[13] Maulidianto, N. F. R. Tempo, and Yosafat Donni Haryanto, "Analisis Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Es Menggunakan Data Observasi, Data Pemodelan Numerik, dan Data Satelit Cuaca (Studi Kasus: Kejadian Hujan Es di Wilayah Kapan, Kabupaten Timor Tengah Selatan Tanggal 29 November 2023)," *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya*, vol. 11, no. 1, pp. 60–77, Aug. 2024, doi: 10.24252/jft.v11i1.45152.

[14] E. Diniyati, D. Q. Syofyan, and A. Mulya, "Analisis Hujan Es di Kabupaten Ngawi Berdasarkan Citra Satelit Himawari-8 dan Data Reanalisis Copernicus ECMWF," *Jurnal Geografi : Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian,* vol. 18, no. 2, pp. 69–75, Dec. 2021, doi: 10.15294/jg.v18i2.28010.

[15] N. Ayasha, "Analisis Parameter Vertical Velocity dan Kaitannya dengan Kondisi Parameter Cuaca saat Kejadian Hujan ES (Vertical Velocity Parameter and Its Relationship with Weather Parameter Condition in the Hail Event)," *Buletin GAW Bariri*, vol. 3, pp. 17–24, Jun. 2022.

[16] K. Bessho et al., "An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites," *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, vol. 94, no. 2, pp. 151–183, 2016.

[17] H. Hersbach et al., "The ERA5 global reanalysis," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999–2049, Jul. 2020, doi: 10.1002/qj.3803.

[18] A. Shimizu, "Introduction to Himawari-8 RGB composite imagery," *Meteorological Satellite Center Technical Note*, vol. 65, p. 42, 2020.

[19] F. Berman et al., "The GrADS Project: Software Support for High-Level Grid Application Development," Int J High Perform Comput Appl, vol. 15, no. 4, pp. 327–344, Nov. 2001, doi: 10.1177/109434200101500401.

[20] C. J. Nixon, J. T. Allen, and M. Taszarek, "Hodographs and Skew Ts of Hail-Producing Storms," *Weather Forecast*, vol. 38, no. 11, pp. 2217–2236, Nov. 2023, doi: 10.1175/WAF-D-23-0031.1.

[21] S. Wirjohamidjojo and Y. S. Swarinoto, "Indeks dan peredaran atmosfer tropik". Puslitbang Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2014.

[22] S. Prasetyo, I. Rumahorbo, U. Hidayat, and N. Sagita, "Analisis Kondisi Atmosfer pada Kejadian Hujan Es (Studi kasus: Bogor, 23 September 2020)," *in Seminar Nasional Kahuripan*, 2020, pp. 295–300.

[23] E. Fibriantika and D. Mayangwulan, "Analisis Spasial Indek Stabilitas Udara Di Indonesia," *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 21, no. 1, pp. 1–12, 2020.