JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya (2025) Vol. 12 (2): 280 - 294
DOI: 10.24252/jft.v12i2.60115

JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya
p-ISSN: 2302-1497, e-ISSN: 2715-2774
http://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/jft

Analisis Dinamika Vertikal Atmosfer pada Kejadian Hujan Es Menggunakan Profil Vertikal dan Citra Satelit Himawari-9 (Studi Kasus: Kabupaten Bogor, 28 Oktober 2024)

Bima Arzhida[1*], Safri Emanuel M.[1], Dhaifullah Rafif A.[1], Yoseph Darrel[1], Aries Kristianto[1]

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

Email: bimaarzhida.12@gmail.com
**Corresponding Author*

Abstrak

Hujan es merupakan salah satu fenomena cuaca ekstrem yang ditandai pertumbuhan awan kumulonimbus dan proses konveksi dalam waktu singkat. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik awan penyebab hujan es yang terjadi di Kabupaten Bogor pada 28 Oktober 2024. Data yang digunakan dari satelit Himawari-9 band 8, 13, dan 15, data reanalisis ERA5 berupa CAPE (*Convective Available Potential Energy*), CIN (*Convective Inhibition*), *relative humidty*, *temperature, vertical velocity*, *specific humidity*, dan U V *component of wind*. Pengolahan data Himawari-9 dilakukan dengan metode *Cloud Convective Overlay* (CCO) dan data reanalisis ERA5 diolah menggunakan *python*. Hasil penelitian menunjukkan *relative humidity* bernilai lebih dari 85%, profil vertikal vektor angin, kecepatan vertikal, dan divergensi menunjukkan pola *updraft* kuat hingga 2 m/s dan *downdraft* hingga -1,5 m/s. Analisis temporal nilai CAPE mencapai 893 J/kg dan CIN sebesar 62 J/kg mengindikasikan energi konvektif yang cukup besar dengan hambatan atmosfer yang rendah. Interpretasi sebaran awan menggunakan CCO menunjukkan pertumbuhan awan kumulonimbus yang signifikan. Energi konveksi yang kuat, hambatan atmosfer yang rendah, pola *updraft*, dan kelembapan relatif yang signifikan berintegrasi dalam pembentukan awan konvektif yang memicu hujan es. Penelitian ini berkontribusi dalam memperkuat pemahaman peran dinamika vertikal atmosfer, khususnya interaksi CAPE–CIN dan parameter cuaca, dalam pembentukan hujan es di wilayah tropis bertopografi kompleks seperti Kabupaten Bogor, serta mengembangkan pendekatan integratif antara analisis profil vertikal atmosfer dan interpretasi citra satelit Himawari-9 untuk mengidentifikasi awan konvektif dan merepresentasikan proses fisik internal awan.
Kata kunci: *Cross Section*, Hujan Es, Profil Vertikal, Satelit Himawari-9.

Abstract

Hail is an extreme weather phenomenon characterized by the development of cumulonimbus clouds and convective processes in a short duration. This study aims to identify the cloud systems responsible for the hail event that occurred in Bogor Regency on 28 October 2024. The data used were from the Himawari-9 satellite bands 8, 13, and 15, ERA5 reanalysis data in the form of CAPE (Convective Available Potential Energy), CIN (Convective Inhibition), relative humidity, temperature, vertical velocity, specific humidity, and U V component of wind. The Himawari-9 data was processed using the Cloud Convective Overlay (CCO) method, and the ERA5 reanalysis data was processed using

Python. The results of the study show that relative humidity values were above 85%, and the vertical wind vector profile, vertical velocity, and divergence showed a strong updraft up to 2 m/s and a downdraft of up to -1.5 m/s. Temporal analysis of CAPE values reached 893 J/kg and CIN was 62 J/kg, indicating significant convective energy with low atmospheric resistance. Interpretation of cloud distribution using CCO shows significant cumulonimbus growth. Strong convective energy, low atmospheric resistance, updraft, and significant relative humidity integrate in the formation of convective clouds that trigger hail. This study contributes to strengthening the understanding of the role of atmospheric vertical dynamics, particularly the interaction between CAPE–CIN and weather parameters, in the formation of hail in tropical regions with complex topography such as Bogor Regency, as well as developing an integrative approach between atmospheric vertical profile analysis and Himawari-9 satellite image interpretation to identify convective clouds and represent the internal physical processes of clouds.

Keywords: *Cross Section, Hail, Himawari-9 Satellite, Vertical Profile.*

1. PENDAHULUAN

Salah satu peristiwa cuaca ekstrem yang menjadi sorotan adalah yang terjadi di Kabupaten Bogor pada 28 Oktober 2024. Fenomena ini ditandai dengan hujan intensitas tinggi yang disertai angin kencang dalam waktu singkat yang mengakibatkan pohon tumbang, bangunan rusak, dan gangguan transportasi. Daerah Kabupaten Bogor dikenal rawan terhadap bencana hujan lebat karena beberapa faktor seperti letak topografi yang dikelilingi pegunungan dengan beberapa gunung besar seperti Gunung Gede Pangarango dan Gunung Salak. Kondensasi terjadi ketika uap air terangkat naik oleh udara karena faktor topografi seperti gunung, sehingga menimbulkan proses orografik yang mendukung pertumbuhan awan konvektif dan menghasilkan hujan dengan intensitas yang tinggi [1]. Awan konvektif biasanya memiliki waktu presipitasi lebih pendek tetapi kadar airnya lebih tinggi dari awan stratiform. Awan konvektif adalah awan yang terbentuk dari proses konveksi, dimana naiknya udara hangat yang mengandung uap air ke atmosfer, menggantikan tempat udara dingin yang berada di atasnya [2]. Awan konvektif ini terlihat menggumpal padat dan menjulang tinggi dan sangat tebal dengan bagian atas tidak merata sehingga terlihat seperti bunga kol dengan garis-garis batas yang jelas dan tegas. Pertumbuhan awan konvektif memiliki tiga tahap, yaitu tahap pembentukan, tahap matang, dan tahap meluruh [3].

Presipitasi dapat berbentuk cair seperti hujan dan padat seperti hujan es. Hujan es ini terbentuk oleh awan konvektif, dimana berbentuk batu es yang tidak beraturan dengan diameter 5 mm [4]. Kejadian hujan es terjadi ketika awan mengalami *freezing level* yang rendah di suatu wilayah. *Freezing level* merupakan kejadian membekunya tetes air pada saat lapisan atmosfer mencapai suhu 0^{o} C pada ketinggian tertentu [5]. Apabila es jalurnya bersamaan dengan air kemudian mengalami tumbukan dan penggabungan, menyebabkan penyatuan dan penambahan massa es [6]. Hujan dengan instensitas tinggi yang disertai dengan es selalu berkaitan dengan awan kumulonimbus. Indonesia sebagai wilayah maritim yang memiliki wilayah lautan lebih luas dibandingkan dengan daratan sehingga di wilayah Indonesia sangat berpotensi untuk pembentukan awan-awan hujan seperti kumulonimbus

karena tempat penyimpanan bahang (panas) baik yang berupa sensible heat maupun *latent heat* [7].

Penelitian yang dilakukan untuk mengkarakterisasi lingkungan atmosfer yang rawan *hail* di wilayah Eropa bagian selatan–tengah pada 2016–2020 saat musim hangat April–Oktober [8]. Data yang digunakan merupakan kombinasi deteksi *overshooting top* (OT) dari citra satelit *Meteosat Second Generation* (MSG–SEVIRI), reanalisis SPHERA (≈2,2 km), serta laporan kejadian hujan es dari *European Severe Weather Database* (ESWD). Metode yang diterapkan adalah pengembangan *proxy* frekuensi hujan es. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu merepresentasikan kejadian hujan es dengan cukup baik, di mana sekitar 63% laporan hail ESWD sesuai secara spasial-temporal dengan OT yang telah difilter, meningkat sekitar 23% dibandingkan pendekatan sebelumnya yang menggunakan reanalisis global resolusi kasar. Frekuensi hujan es tertinggi teridentifikasi pada Juni–Juli sekitar pukul 15 UTC, terutama di wilayah pre-Alpen Italia utara dan Laut Adriatik utara. Penelitian yang dilakukan di Bandung pada 19 dam 23 April 2017 dengan menganalisis kondisi atmosfer skala global, regional, dan lokal menggunakan data citra satelit Himawari-8 [9] . Hasil analisis menunjukkan adanya *shearline* di atas wilayah Bandung dan sirkulasi eddy di Laut Jawa, penurunan suhu puncak awan yang signifikan hingga −74 °C pada 19 April 2017 dan −60 °C pada 23 April 2017, pola kontur suhu puncak awan yang berubah dari lebih hangat menjadi lebih dingin dibanding sekitarnya saat kejadian, penurunan suhu seiring ketinggian, serta kelembapan udara yang tinggi di lapisan bawah dan cenderung kering di lapisan atas kecuali pada level 300 mb.

Penelitian di wilayah Jayawijaya, menguatkan pernyataan sebelumnya, yang menyimpulkan bahwa terjadinya peningkatan curah hujan, suhu puncak awan yang rendah hingga mencapai -65,6 °C, terdapat daerah konvergensi dan *shearline* pada lapisan 700 mb dan 500 mb [10]. Kajian ini juga didukung oleh penelitian [11] tentang perbandingan divergensi dan vortisitas model ECMWF dan luaran SATAID yang menyimpulkan bahwa hasil olahan model ECMWF dan SATAID menunjukkan adanya pola divergensi dan vortisitas negatif dan positif sebelum dan saat terjadi hujan lebat dengan nilai divergensi dan vortisitas model ECMWF yang lebih besar daripada SATAID. Meskipun korelasi antara nilai divergensi dan vortisitas ECMWF dan SATAID tergolong lemah hingga sangat lemah, nilai RMSE yang relatif kecil menunjukkan bahwa perbedaan kedua model lebih disebabkan oleh perbedaan resolusi dan metode interpolasi. Dengan demikian, ECMWF lebih unggul untuk analisis dinamika atmosfer sebelum dan saat hujan lebat, sedangkan SATAID lebih efektif digunakan sebagai alat pemantauan awal dan visualisasi pertumbuhan awan sebelum hujan terjadi, sehingga keduanya bersifat saling melengkapi dalam analisis cuaca ekstrem.

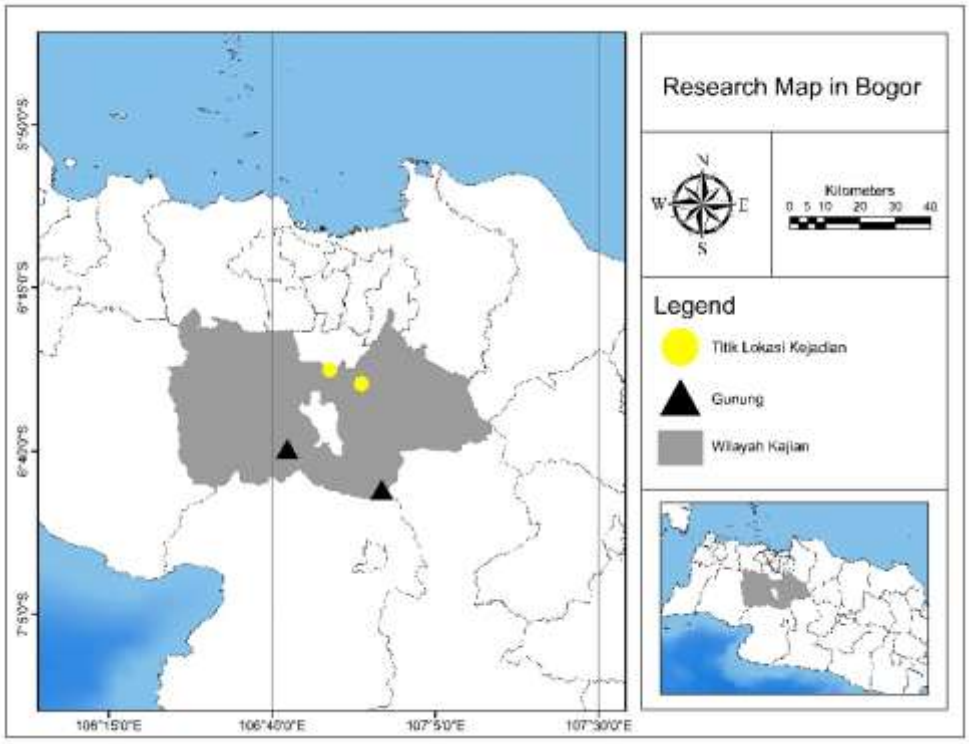
Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji kejadian hujan es dan hujan lebat, kajian-kajian tersebut umumnya masih berfokus pada analisis parameter permukaan atau kondisi atmosfer pada lapisan tertentu, tanpa mengkaji secara rinci struktur dan dinamika profil vertikal atmosfer yang berperan langsung dalam proses pembentukan hujan. Sehingga penelitian ini diposisikan untuk mengisi celah tersebut melalui pendekatan integratif guna memperdalam pemahaman mekanisme dinamika vertikal atmosfer dalam pembentukan awan konvektif dan hujan es. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara kualitatif hasil dari plot dari pengolahan data dan melihat secara kuantitatif nilai yang

dihasilkan oleh parameter yang diolah terhadap awan penyebab hujan lebat di Kabupaten Bogor pada 28 Oktober 2024, dengan menggunakan analisis profil vertikal parameter atmosfer dari citra satelit Himawari-8. Penelitian ini menggunakan tiga langkah dalam menganalisis kejadian. Pertama, menganalisis bagaimana pengaruh dari variable profil vertikal atmosfer yang dalam hal ini meliputi profil *cross section*. Kedua, menganalisis parameter CAPE dan CIN secara *time series* untuk melihat nilai pada rentang waktu yang sudah ditentukan. Ketiga, menganalisis bagaimana hasil interpretasi dari satelit cuaca Himawari-9 dalam melihat persebaran awan yang menggunakan metode CCO (*Cloud Convective Overlays*).

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian terletak di beberapa kecamatan dan kelurahan di wilayah Bogor yang terdiri atas Pondok Rajeb, Cibinong dan Tarikolot, Citereup dengan koordinat -6.41° hingga -6.48° LS dan 106.82° hingga 106.88° BT. Namun, karena penelitian ini memiliki skala spasial maka diambil batasan koordinat antara -5° hingga -8° LS dan 104° hingga 110° BT agar dapat menganalisis lebih luas, dapat dilihat pada gambar 1. Waktu penelitian diambil pada saat sebelum, saat, dan sesudah kejadian pada pukul 07.00 hingga 10.00 UTC tanggal 28 Oktober 2024.



Gambar 1. Peta Lokasi di wilayah Bogor. Titik berwarna kuning menunjukkan lokasi dari Pondok Rajeg dan Tarikolot serta simbol segitiga berwarna hitam menunjukkan Gunung Salak dan Gunung Gede Pangrango.

2.2 Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data satelit Himawari-9, didapatkan melalui *filezilla* pada bagian *remote site /himawari_vol/himawari6/netcdf/Indonesia* dengan memanfaatkan kanal 13 (IR1), kanal 15 (IR2), dan kanal 8 (IR3). Selanjutnya, data reanalisis ERA5 *hourly data on single levels from 1940 to present* dari *Climate Data Store Copernicus* berupa nilai dari CAPE (*Convective Available Potential Energy*) dan CIN (*Convective Inhibition*) untuk periode waktu 24 jam pada tanggal 28 Oktober 2024 dengan batas koordinat yang sudah ditentukan. Plot data untuk data CAPE dan CIN menggunakan variasi temporal berupa *timeseries*. Pertumbuhan konvektif yang menembus LFC (*level of free convection*) dapat dilihat dari nilai CAPE yang besar dan CIN yang kecil [12], [13]. Tujuan dari penggunaan data ini adalah melihat bagaimana pengaruh energi dari CAPE dan CIN pada waktu kejadian.

Data reanalisis ERA5 *hourly data on pressure levels from 1940 to present* dari *Climate Data Store Copernicus* berupa nilai dari *relative rumidty*, *temperature, vertical velocity*, *specific humidity*, dan U V *component of wind*. Data ini diambil dengan lapisan *pressure level* dari 1000 milibar sampai dengan 100 milibar. Plot data ini menggunakan variasi spasial berupa *longitude* dan *latitude* dibandingkan dengan ketinggian perlapisan. Sehingga bisa dianalisis terhadap perubahan nilai tiap lapisan untuk melihat bagaimana interpretasi dari profil vertikal parameter perlapisan pada saat terjadinya hujan. Meskipun penelitian ini memanfaatkan data reanalisis ERA5 dan citra satelit Himawari-9, terdapat limitasi. Data ERA5 merupakan produk reanalisis berbasis model dan resolusi spasial data satelit yang digunakan sebesar 0.25° tergolong relatif kasar untuk kajian studi kasus berskala lokal.

2.3 Pengolahan Data

Data satelit ini dianalisis menggunakan metode CCO untuk mengidentifikasi sebaran awan konvektif dengan dua algoritma yang memanfaatkan kanal 13 (IR1), kanal 15 (IR2), dan kanal 8 (IR3). Algoritma yang digunakan pertama adalah metode *Split Windows* (SP=BTD[IR1-IR2]) untuk mendeteksi keberadaan dari awan konvektif dan awan cirrus tipis dengan *threshold* (S3=BTD[IR1-IR2] < 2). Selanjutnya algoritma yang kedua yaitu dengan metode *Dual Channel Difference* (BTD[IR1-IR3]) untuk membedakan awan konvektif dari awan rendah dengan threshold (BTD[IR1-IR3] < 3). Data satelit Himawari-9 diolah menggunakan *Grads* untuk memvisualisasikan bagaimana persebaran awan untuk wilayah yang menjadi kajian dalam penelitian ini [14].

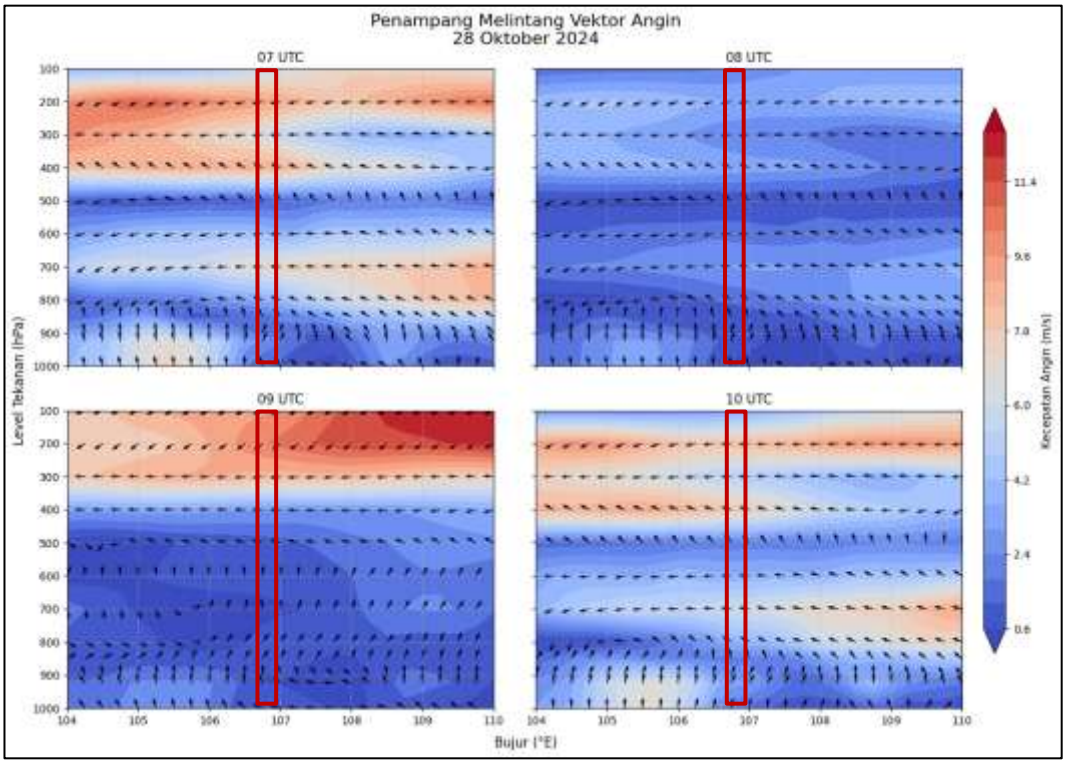
Data reanalisis akan diunduh dalam satu file yang berisi semua data yang diperlukan. Data model dari ERA5 akan dianalisis menggunakan *python* untuk dapat merepresentasikan gambar dan hasil yang sesuai dengan kejadian. Visualisasi profil vertikal diperoleh dari hasil perataan spasial data ERA5 pada wilayah Bogor yang meliputi Pondok Rajeg, Cibinong, dan Tarikolot (Citereup) dengan batas koordinat 6.41°– 6.48° LS dan 106.82°– 106.88° BT. Nilai kelembapan relatif dirata-ratakan pada dimensi lintang dan bujur untuk wilayah Bogor untuk setiap lapisan tekanan sehingga merepresentasikan kondisi atmosfer vertikal wilayah kejadian hujan es. Waktu yang digunakan adalah dalam bentuk UTC, hal ini digunakan

karena menyesuaikan dari sumber data yang diambil dan sesuai dengan standar internasional. Metode yang digunakan untuk analisis profil vertikal atmosfer sepenuhnya berbasis keluaran model tanpa dukungan observasi *in-situ*, serta metode CCO yang menggunakan *threshold* tertentu berpotensi menimbulkan *under-detection* atau *over-detection* dalam identifikasi awan konvektif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Wind Vector Cross Section*

Pada gambar 2, didapatkan beberapa analisis dan informasi bahwa angin mengalami perubahan pada setiap waktunya. Pada pukul 7 UTC angin memiliki kecepatan yang kencang di atas lapisan 400 milibar yang menunjukkan adanya ketidakstabilan atmosfer. Penguatan kecepatan angin pada pukul 08.00 UTC di lapisan bawah hingga menengah pada 700-850 mb menunjukkan adanya peningkatan adveksi kelembapan yang diindikasikan dengan panah yang lebih rapat. Pada pukul 09.00 UTC pola angin menunjukkan pergeseran arah dan menunjukkan adanya konvergensi lokal yang meningkatkan pengangkatan udara untuk dapat mempercepat proses kondensasi. Pola pada pukul 10.00 menunjukkan angin yang lebih stabil di lapisan bawah. Faktor yang memicu adanya perubahan dan pergerakan dari vektor angin di lapisan bawah disebabkan oleh adanya konvergensi di lapisan bawah dan diperkuat oleh adanya pengaruh dari efek topografi berupa pegunungan dalam pengangkatan udara [15].

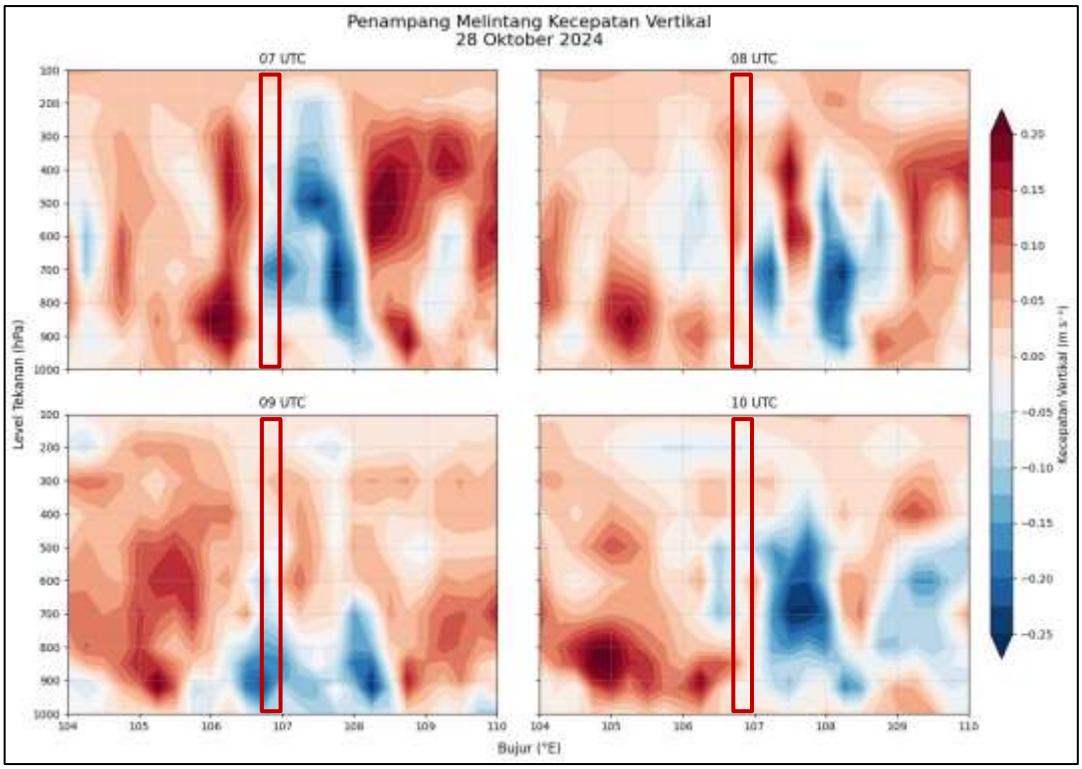


Gambar 2. Vektor angin vertikal.

3.2 *Vertical Velocity Cross Section*

Kecepatan aliran vertikal diamati dalam melihat apakah terdapat kondisi pengangkatan aliran udara ke atas atau *updraft* dan juga penurunan aliran udara atau *downdraft* pada saat kejadian divisualisasikan pada gambar 3. Pada pukul 07.00 UTC terlihat *updraft* yang mulai terbentuk di lapisan bawah yang menunjukkan indikasi awal pembentukan awan konvektif pada wilayah lain sebelah barat. Pada pukul 08.00 UTC terdapat pengangkatan udara yang cukup signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pembentukan awan konvektif berkembang dengan cepat dan dengan *updraft* yang tinggi secara terus menerus dapat mengindikasikan pembentukan partikel es.

Pada pukul 09.00 UTC terdapat pola *downdraft* yang signifikan. Pola ini menunjukkan bahwa di wilayah tersebut terjadi presipitasi dan angin yang kencang karena *downdraft* diikuti oleh aliran udara keluar dari awan konvektif sehingga mampu mengakibatkan fenomena angin kencang dan hujan es bisa terjadi karena ia dipaksa turun dengan cepat ke permukaan [16]. Pada pukul 10.00 UTC kedua aliran udara sudah mulai melemah dimana *updraf*t yang sudah melemah mengindikasikan bahwa intensitas awan konvektif juga melemah dan adanya *downdraft* yang melemah juga menunjukkan penyebaran sisa aliran udara dingin dari presipitasi. Aliran udara ke atas pada konsisi signifikannya yaitu pukul 08.00 dan 09.00 UTC juga bisa terpengaruh oleh proses *lifting* dari topografi pegunungan.

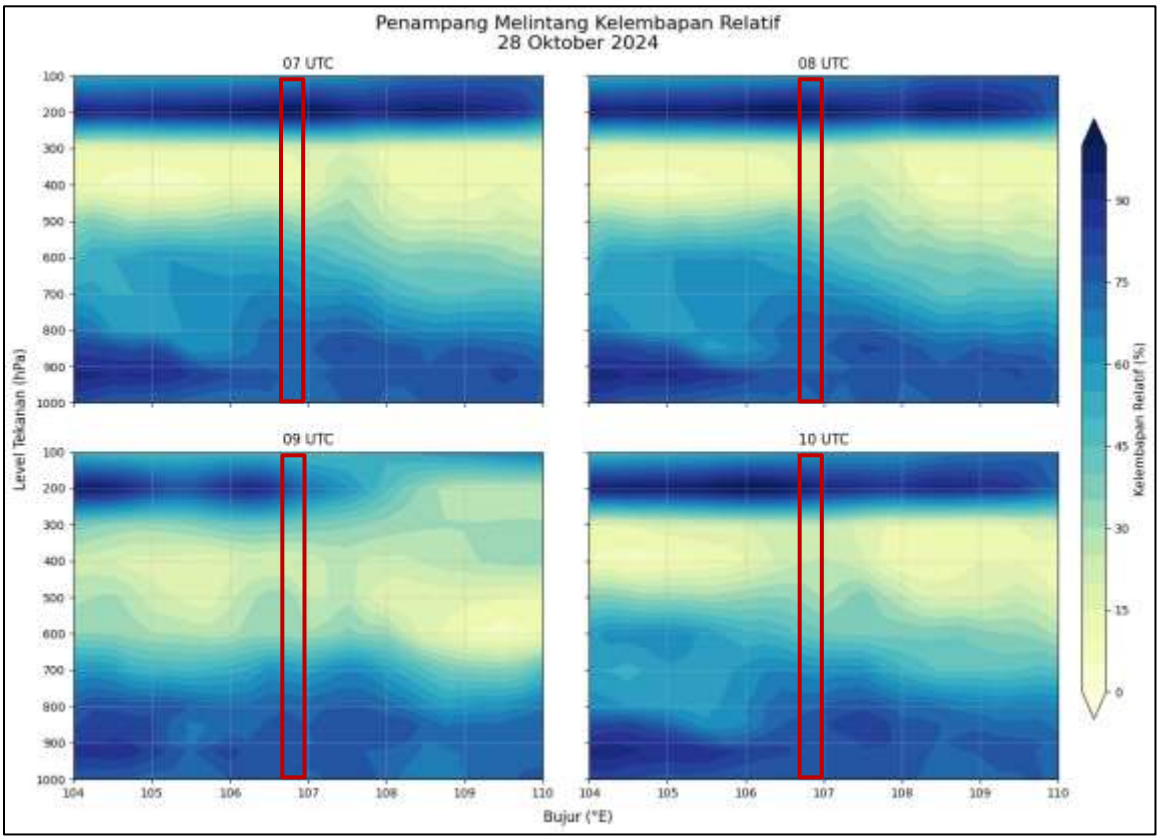


Gambar 3. Kecepatan aliran angin vertikal.

3.3 *Relative Humidity Cross Sectioin*

Kondisi kelembapan relatif perlu diamati untuk melihat tingkat kejenuhan dari udara dalam proses pembentukan awan konvektif. Kelembapan di lapisan bawah dan atas akan mendukung bagaimana proses awan konvektif dan menjadi faktor dalam mengindikasikan terjadinya hujan [17]. Pukul 07.00 UTC pada lapisan bawah memiliki kelembapan yang relatif rendah sehingga dapat membatasi pembentukan awan karena kondisi yang kurang jenuh. Pada pukul 08.00 UTC terdapat peningkatan kelembapan relatif di lapisan bawah yang mengindikasi adanya permulaan dalam pembentukan awan konvektif.

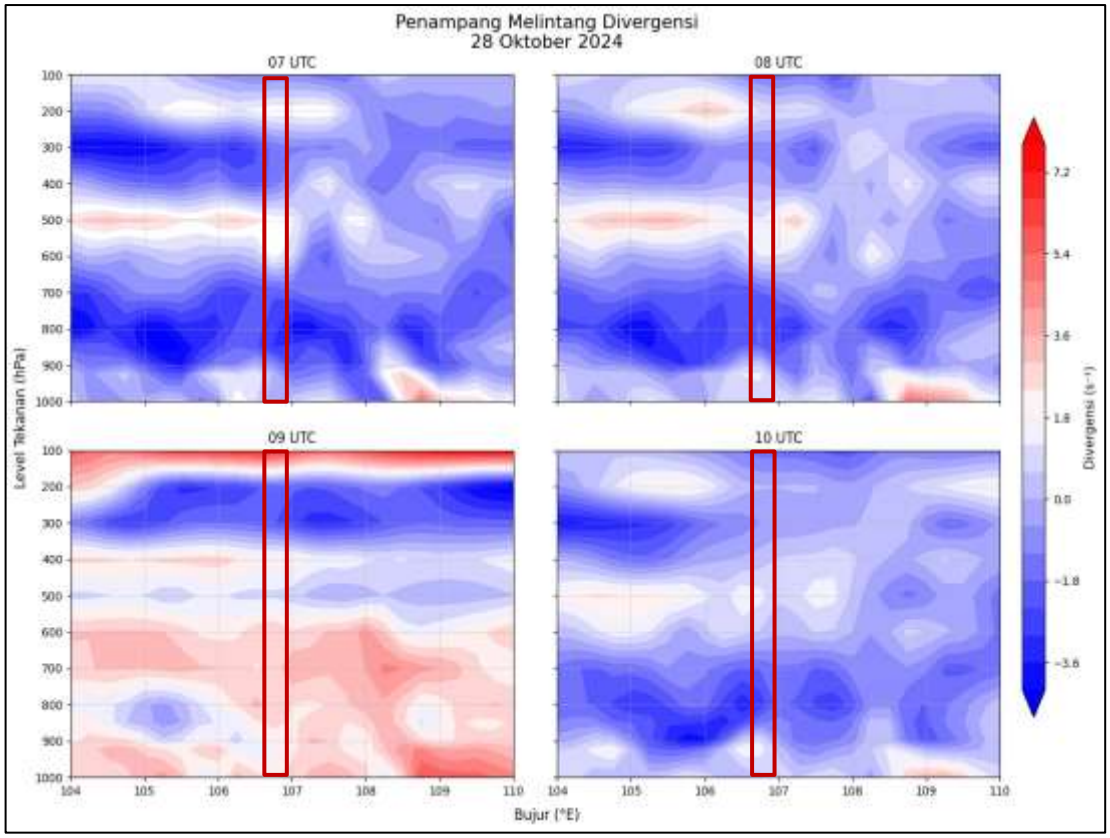
Pada lapisan menengah, kelembapan relatif semakin luas dengan persentase yang relaitf tinggi sejalan dengan penguatan *updraft*. Pada pukul 09.00 UTC di lapisan bawah didominasi menunjukkan adanya konvergensi uap air dan pada lapisan menengah tetap memiliki nilai kelembapan relatif yang konsisten dimana ini menunjukkan fase matang dari awan konvektif. Dari ketiga waktu tersebut, pada lapisan atas memiliki kelembapan relatif yang tinggi di atas 85%. Kelembapan ini mengindikasikan bahwa kondisi ini mendukung adanya pembentukan partikel es di awan tinggi dan terdapat penguatan secara konsisten dalam aktivitas konvektif [17]. Pada pukul 10.00 UTC kelembapan udara baik di lapisan menengah dan bawah mulai melemah dan normal kembali yang menunjukkan bahwa aktivitas konvektif mulai melemah.



Gambar 4. Kelembapan relatif.

3.4 *Divergence Cross Section*

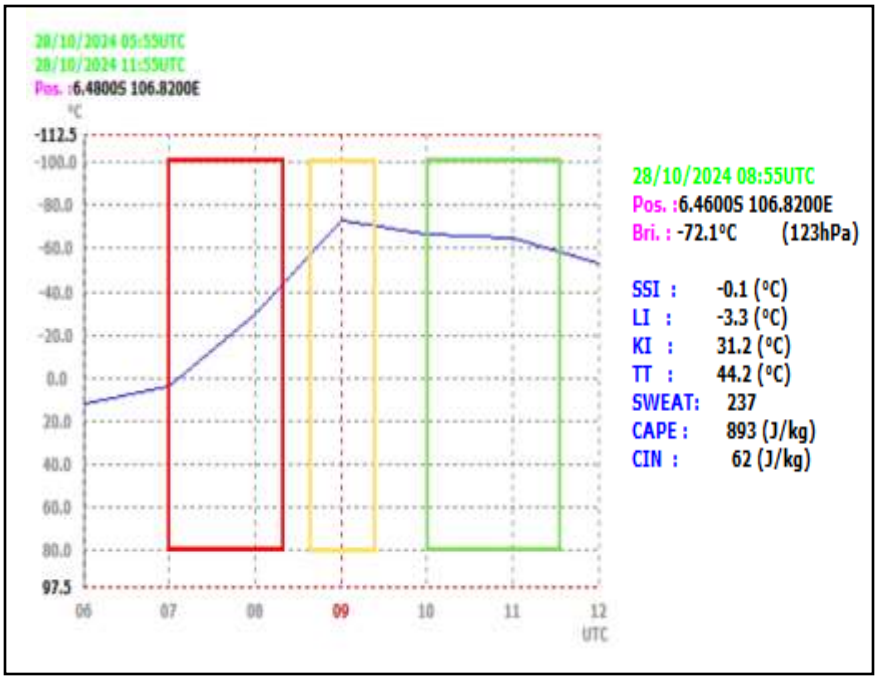
Analisis pola divergen dan konvergen dari massa udara akan digunakan untuk melihat bagaimana massa udara mempengaruhi proses konvektif dan melihat bagaimana hubungan antara pola divergen dan konvergen dalam kejadian. Berdasarkan gambar 5, Pada pukul 07.00 UTC konvergensi terjadi di lapisan bawah kemungkinan akibat pengaruh dari topografi dan untuk lapisan di atas 850 milibar masih terdapat area divergensi yang kecil menunjukkan bahwa arus *updraft* belum terlalu kuat. Pada pukul 08.00 UTC terlihat bahwa konvergensi mulai meningkatkan intensitasnya dimana ini menunjukkan adanya penguatan arus naik yang memicu pembentukan awan konvektif. Divergensi berkembang pada lapisan di atas 850 milibar menunjukkan bahwa terdapat pelepasan energi dari udara yang naik. Pada pukul 09.00 UTC intensitas dari divergensi pada lapisan di atas 850 milibar mengalami maksimum. Hal ini menunjukkan adanya arus naik yang kuat sehingga mendukung pembentukan awan konvektif yang kuat, sedangkan konvergensi tetap signifikan di lapisan bawah yang mendukung adanya surplus energi [18]. Pada pukul 10.00 UTC divergensi mulai melemah di lapisan atas dan konvergensi di lapisan bawah juga melemah. Pada lapisan atas sistem konvektif mulai melemah seiring dengan berkurangnya energi pengangkatan akibat konvergensi dari bawah.



Gambar 5. Divergensi

3.5 Indeks Stabilitas Atmosfer

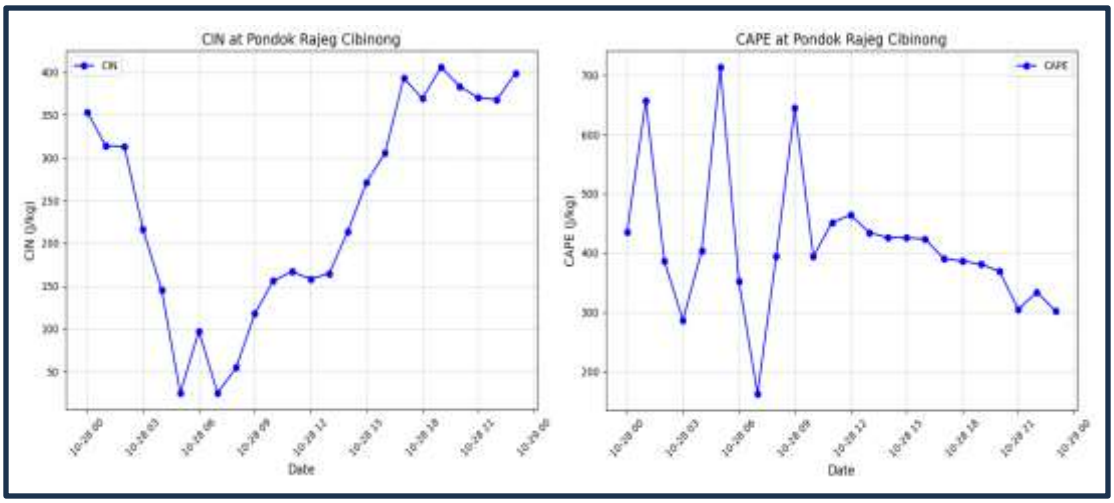
Pada gambar 6, suhu puncak awan terendah di Pondok Rajeg terjadi pada pukul 09.00 UTC dengan nilai -72,1°C. Suhu awan yang rendah mengindikasikan adanya tutupan jenis awan tinggi atau awan konvektif. Nilai indeks CAPE selama 24 jam di Pondok Rajeg terdapat pada gambar 7. Untuk nilai CAPE total berada pada kategori lemah dengan nilai 893 J/kg menandakan energi yang tersedia untuk memungkinkan untuk pembentukan awan-awan konvektif cukup besar. Kemudian nilai CIN bernilai 62 J/Kg yang tergolong rendah. Nilai CIN yang semakin rendah menunjukkan bahwa hambatan energi yang digunakan untuk melakukan gerakan vertikal udara ke atas semakin kecil [19].



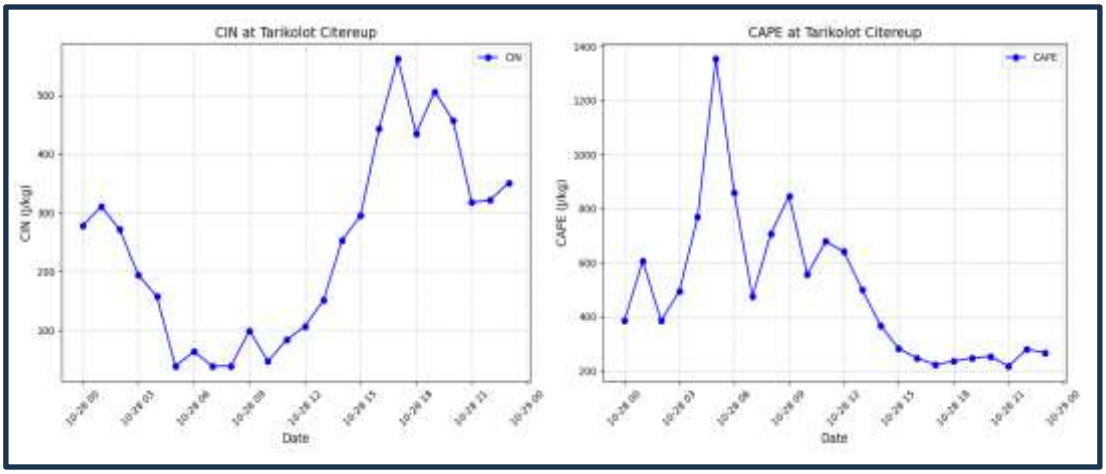
Gambar 6. *Timeseries* pembentukan awan konvektif di Pondok Rajeg, Cibonong. Fase tumbuh (merah), fase matang (kuning), fase meluruh (hijau).

Pada Gambar 8, suhu puncak awan terendah di Tarikolot terjadi pada pukul 10.00 UTC dengan nilai −60,7 °C, yang menunjukkan fase konveksi matang dengan pertumbuhan awan vertikal yang kuat. Suhu puncak awan yang sangat rendah mengindikasikan perkembangan awan hingga lapisan atas troposfer dan berpotensi menghasilkan presipitasi intens. Berdasarkan Gambar 9, nilai CAPE total di Tarikolot tercatat sebesar 893 J/kg, sebanding dengan nilai CAPE di Pondok Rajeg, Cibinong, yang menunjukkan ketersediaan energi konvektif yang cukup besar. Sementara itu, nilai CIN sebesar 65 J/kg tergolong rendah, sehingga hambatan terhadap pengangkatan massa udara relatif kecil dan mendukung terjadinya inisiasi konveksi. Selama periode 24 jam, indeks CAPE di Tarikolot mengalami fluktuasi, dengan nilai tertinggi terjadi pada pukul 05.00 UTC. Peningkatan kembali CAPE pada pukul 09.00 UTC menunjukkan meningkatnya ketidakstabilan atmosfer, dimana udara dekat permukaan lebih hangat dan ringan dibandingkan udara di lapisan atas [20]. Kondisi

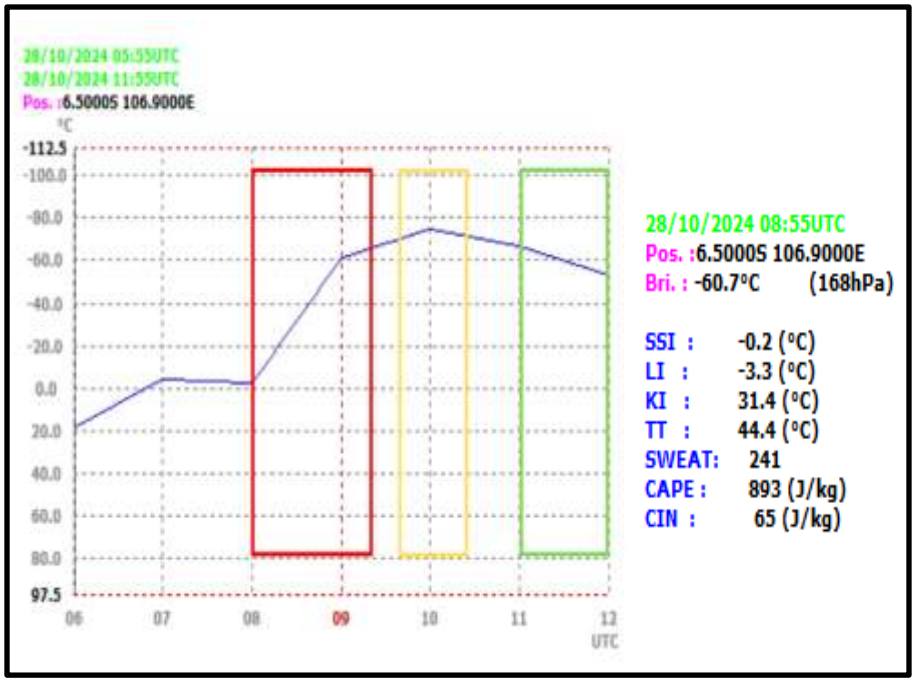
ini mendukung terjadinya konveksi vertikal yang kuat dan berpotensi memicu pembentukan awan kumulonimbus. Indeks CIN juga berfluktuasi, dengan nilai minimum pada pukul 04.00 dan 07.00 UTC, yang menandakan berkurangnya hambatan konveksi. Peningkatan CIN pada pukul 09.00 UTC menunjukkan mulai meningkatnya stabilitas lapisan bawah.



. **Gambar 7.** *Timeseries* indeks stabilitas atmosfer di Pondok Rajeg, Cibonong pada 28 Oktober 2024 pukul 00.00 hingga 23.00 UTC. Gambar indeks CIN (kiri) dan CAPE (kanan).



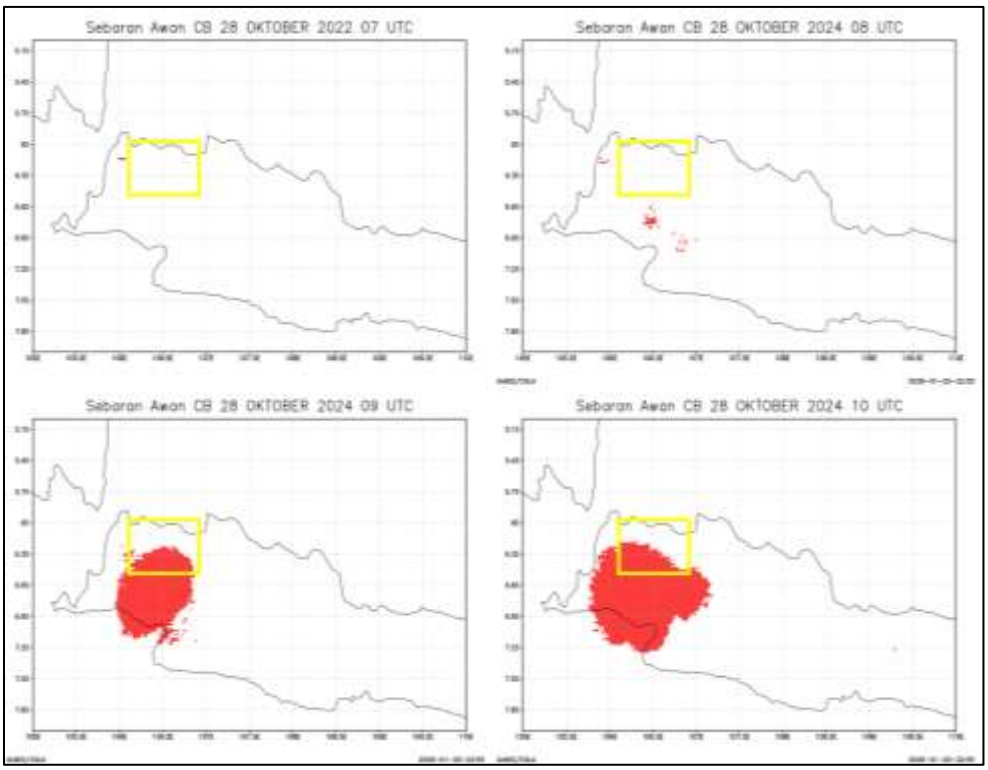
Gambar 8. *Timeseries* pembentukan awan konvektif di Tari Kolot, Citereup. Fase tumbuh (merah), fase matang (kuning), fase luruh (hijau).



Gambar 9. *Timeseries* indeks stabilitas atmosfer di Tari Kolot, Citereup pada 28 Oktober 2024 pukul 00.00 hingga 23.00 UTC. Gambar indeks CIN (kiri) dan CAPE (kanan).

3.6 Metode *Cloud Convective Overlay* (CCO)

Sebaran awan kumulonimbus (CB) pada Gambar 10, pukul 07.00 UTC masih belum terdapat titik-titik yang menandakan adanya pertumbuhan awan. pukul 08.00 UTC masih terbatas dan terlihat dalam bentuk titik-titik kecil dengan intensitas rendah, menandakan tahap awal pembentukan. Namun, dalam satu jam berikutnya, yaitu pada 09.00 UTC, awan CB mengalami pertumbuhan signifikan, baik dari segi luas cakupan maupun intensitas, yang ditunjukkan oleh area merah yang lebih pahdat. Pukul 10.00 UTC awan CB masih mengalami pertumbuhan yang didominasi menuju kearah barat dan barat daya ditandai dengan area merah yang meluas.



Gambar 10. *Cloud Convective Overlay*. Warna merah adalah awan kumulonimbus. Daerah penelitian ditandai dengan kotak kuning.

4. SIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi awan penyebab hujan es di Kabupaten Bogor pada 28 Oktober 2024 menggunakan analisis profil vertikal parameter atmosfer dan citra satelit Himawari-9. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai CAPE yang tinggi dan CIN yang rendah mengindikasikan adanya energi konvektif yang cukup besar dengan hambatan atmosfer yang sedikit, memungkinkan terjadinya proses konveksi yang intensif. Suhu puncak awan yang sangat rendah, yaitu mencapai −72,1°C di Pondok Rajeg dan −60,7°C di Tarikolot, menunjukkan perkembangan awan konvektif hingga lapisan atas. Pola vertikal vektor angin menunjukkan penguatan *updraft* pada pukul 08.00 UTC yang diikuti *downdraft* signifikan pada pukul 09.00 UTC, serta adanya konvergensi di lapisan bawah dan divergensi di lapisan atas yang mendukung arus naik kuat. Kelembapan relatif yang tinggi, terutama di lapisan atas dengan nilai >85%, mendukung pembentukan partikel es di dalam awan. Metode *Cloud Convective Overlays* (CCO) menunjukkan pertumbuhan dan persebaran awan kumulonimbus yang signifikan pada pukul 09.00–10.00 UTC, sebelum akhirnya meluruh. Semua parameter yang dianalisis menginterpretasikan dengan baik proses terjadinya hujan es.

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa penggunaan data reanalisis ERA5 dan citra satelit Himawari-9 dengan resolusi spasial 0,25° yang relatif kasar untuk kajian berskala lokal, keterbatasan data observasi *in situ*, analisis profil vertikal atmosfer yang sepenuhnya

berbasis keluaran model, serta penerapan metode CCO berbasis *threshold*. Kejadian hujan es masih dapat diteliti menggunakan metode-metode lainnya yang lebih akurat seperti penggunaan radar ataupun pemodelan yang lebih optimal, sehingga diharapkan penelitian ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya dalam menganalisis hujan es.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] R. A. Houze, "Orographic effects on precipitating clouds," *Reviews of Geophysics*, vol. 50, no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1029/2011RG000365.

[2] A. N. Efendi & S. Kuncorojati, "Analisis Hujan dan Angin Kencang di Melawi Menggunakan Data Radar dan Satelit Cuaca (Studi Kasus Tanggal 29 Desember 2018) Stasiun Meteorologi Nanga Pinoh-Melawi 2)," *Jurnal Widya Climago*, vol. 2, no. 1, 2020.

[3] C. D. Ahrens, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 9th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole Cengage Learning, 2009.

[4] Bayong Tjasyono H. K., *Meteorologi Indonesia*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2012.

[5] Wicaksono, H., Sadarang, F. R., & Fadlan, A., "Analisis Hujan Es di Kota Lubuklinggau dengan Memanfaatkan Data Citra Satelit Himawari-8 dan Radiosonde," *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)*, 2018. https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v3i0.28526

[6] E. Hermawan, "Analisis Struktur Vertikal MJO Terkait dengan Aktivitas Super Cloud Clusters (SCCs) di Kawasan Barat Indonesia," *Jurnal Sains Dirgantara*, vol. 8, no. 1, 2010.

[7] E. Hermawan & D. M. Husni, "Perbandingan antara Equatorial Atmosphere Radar dengan Middle and Upper Atmosphere Radar dalam Pemantauan Angin Zonal dan Angin Meridional," *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 3, no. 1, pp. 45–51, 2002.

[8] Giordani, A., Kunz, M., Bedka, K. M., Punge, H. J., Paccagnella, T., Pavan, V., Cerenzia, I. M. L., & Di Sabatino, S, "Characterizing hail-prone environments using convection-permitting reanalysis and overshooting top detections over south-central Europe," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 7, pp. 2331–2357, 2024. doi: 10.5194/nhess-24-2331-2024.

[9] A. M. Hidayat, U. Efendi, H. Nur, R., "Hail Phenomena Identification Based on Wheater Factor Analysis, Satellite Data and Numerical Model using GrADS Application (Case study of hail on 19th and 23rd of April 2017 in Bandung)," in *Seminar Nasional Penginderaan Jauh*, 2017.

[10] M. J. Fadhilah & A. Mulya, "Analisis Dinamika Atmosfer dan Identifikasi Sebaran Awan Konvektif Menggunakan Metode RGB pada Citra Satelit Himawari-8 Terkait Banjir di Kabupaten Jayawijaya," *Jurnal Teknik SILITEK*, vol. 1, no. 2, pp. 121–134, 2022. https://doi.org/10.51135/jts.v1i02.17

[11] A. Sri Asmita & J. Daud Malago, "Perbandingan Divergensi dan Vortisitas Model ECMWF dan Luaran SATAID saat Kejadian Hujan di Mamuju," *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, vol. 12, no. 4, pp. 658–665, 2023, doi: 10.25077/jfu.12.4.658-665.2023.
[12] Paul. Markowski & Yvette. Richardson, *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, 2010.
[13] J. M. Wallace & P. V Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd ed. San Diego: Academic Press (Elsevier), 2006.
[14] M. I. Hastuti & A. Mulsandi, "Pemantauan Sebaran Awan Konvektif Menggunakan Metode Cloud Convective Overlays dan RGB Convective Storms pada Satelit Himawari-8," *Seminar Nasional Penginderaan Jauh ke-4*, 2017.
[15] S. Alfiandy, R. C. H. Hutauruk, & D. S. Permana, "Peran Dinamika Laut dan Topografi terhadap Pola Hujan Tipe Lokal di Wilayah Kota Palu," *Depik*, vol. 9, no. 2, pp. 173–183, 2020, doi: 10.13170/depik.9.2.16106.
[16] A. Fadholi, "Analisa Kondisi Atmosfer pada Kejadian Cuaca Ekstrem Hujan Es (Hail)," *SIMETRI, Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, vol. 1, no. 2, pp. 74–80, 2012.
[17] H. Arrashid, D. Sucahyono, Y. D. Haryanto, & L. N. Qomariyatuzzamzami, "Kondisi Dinamika Atmosfer Saat Hujan Lebat di Kalimantan Selatan (Periode 12–17 Januari 2021)," *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, 2023.
[18] B. E. Mapes & R. A. , Jr. Houze, "Diabatic Divergence Profiles in Western Pacific Mesoscale Convective Systems," *J. Atmos. Sci.*, 1995, doi: 10.1175/1520-0469(1995)052<1807:DDPIWP>2.0.CO;2.
[19] A. Azizah Azani & N. Kusumawardani, "Kajian Indeks Stabilitas Atmosfer terhadap Kejadian Hujan Lebat di Kota Bitung (Studi Kasus Tahun 2020–2021)," *Jurnal Widya Climago*, vol. 4, no. 1, 2022.
[20] Maulidianto, N. F. R. Tempo, & 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, 2024, doi: 10.24252/jft.v11i1.45152.