



# Analisis Kejadian Hujan Es di Kabupaten Tabanan Menggunakan Citra Satelit Himawari, Radar Cuaca, dan Model ECMWF

I Dewa Gede Loka Maheswara<sup>1\*</sup>, Ahmad Hanif Al'Aziz<sup>1</sup>, Rayhan Rafi<sup>2</sup>, Yosafat Donni Haryanto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/geoscienceed.v6i3.1166>

## Article Info

Received: 17 June 2025

Revised: 15 August 2025

Accepted: 31 August 2025

Correspondence:

Phone:

**Abstract:** A Hujan es merupakan fenomena cuaca ekstrem yang terjadi dalam waktu singkat dan dapat menimbulkan dampak signifikan terhadap aktivitas masyarakat. Fenomena ini umumnya dipicu oleh pertumbuhan awan Cumulonimbus (Cb) yang kuat akibat kondisi atmosfer yang labil dan lembap. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis dinamika atmosfer yang menyebabkan kejadian hujan es di Kabupaten Tabanan pada tanggal 1 November 2024. Penelitian ini menggunakan metode analisis deskriptif dengan menggunakan data citra satelit Himawari-8, citra radar cuaca, dan data reanalisis dari ECMWF. Hasil analisis menunjukkan bahwa kejadian hujan es didahului oleh kondisi atmosfer yang sangat labil, adanya belokan angin dan konvergensi di lapisan bawah atmosfer, serta suplai kelembapan yang melimpah. Pertumbuhan awan secara vertikal teridentifikasi melalui penurunan suhu puncak awan dan kemunculan awan Cumulonimbus. Citra radar cuaca menunjukkan pola reflektivitas yang mengindikasikan adanya presipitasi intens yang mendukung terbentuknya butiran es di dalam awan. Penelitian ini menunjukkan bahwa kejadian hujan es di wilayah tropis merupakan hasil dari interaksi kompleks antara ketidakstabilan atmosfer, dinamika angin, dan kandungan uap air, serta menekankan pentingnya pemanfaatan data penginderaan jauh dan model numerik untuk mendukung sistem peringatan dini cuaca ekstrem.

**Keywords:** Hujan Es; data model, satelit, Himawari, Prediksi Cuaca Numerik

**Citation:** Maheswara, I. D. G. L., Al'Aziz, A. H., Rafi, R., & Haryanto, Y. D. (2025). Analisis Kejadian Hujan Es di Kabupaten Tabanan Menggunakan Citra Satelit Himawari, Radar Cuaca, dan Model ECMWF. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd)*, 6(3), 1553-1560. doi: <https://doi.org/10.29303/geoscienceed.v6i3.1166>

## Pendahuluan

Hujan es merupakan salah satu bentuk presipitasi berupa batu-batu es transparan berbentuk bulat, kerucut atau tidak beraturan dengan diameter berkisar 5 mm atau lebih (Lutgens, Tarbuck, & Herman, 2018). Hujan es disebabkan oleh awan Cumulonimbus (Cb) yang memiliki *updraft* yang kuat, sehingga tetesan air terdorong ke atas melewati lapisan isotherm dan mengalami pembekuan menjadi es (Mason, 1971; Paski, Permana, Prayudha, & Pertiwi, 2022; Suwignyo, Syaidi, Redha, & Novvria, 2022). Partikel es yang terbentuk kemudian dapat mengalami proses pembekuan berulang hingga ukurannya

membesar, sebelum akhirnya terbawa turun oleh arus turun (*downdraft*) yang kuat dan mencapai permukaan dalam keadaan belum mencair sepenuhnya (Ardiansyah, 2022; Mason, 1971; Suwignyo et al., 2022). Hujan es termasuk fenomena cuaca ekstrem karena terjadi dalam durasi singkat dan berpotensi menimbulkan ancaman signifikan bagi masyarakat (Maulidianto, Tempo, & Haryanto, 2024).

Di wilayah Indonesia, kejadian hujan es tergolong jarang terjadi, namun memiliki dampak yang signifikan. Salah satu kejadian hujan es di Indonesia terjadi di Kabupaten Tabanan pada tanggal 1 November 2024 sekitar pukul 13.00 WITA. Kejadian ini

Email: [maheswaradewaloka@gmail.com](mailto:maheswaradewaloka@gmail.com)

mengakibatkan gangguan aktivitas masyarakat, seperti pengendara mobil terpaksa berhenti akibat butiran-butiran es menimpa kaca dan atap kendaraan serta suara keras yang timbul akibat butiran-butiran es yang menimpa atap seng masyarakat. Melihat dampak yang ditimbulkan, pemahaman komprehensif mengenai dinamika atmosfer yang menyebabkan kejadian hujan es menjadi penting dalam upaya mitigasi terhadap dampak yang ditimbulkan.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh, baik menggunakan satelit cuaca, radar cuaca, dan model numerik, seperti ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) memungkinkan dilakukannya analisis fenomena cuaca ekstrem secara komprehensif. Satelit cuaca menyediakan data observasi dengan resolusi spasial dan resolusi temporal yang baik. Di sisi lain, radar cuaca menyediakan informasi reflektivitas pengamatan pada area luas secara *realtime* dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi (Mason, 1971). Sementara itu, ECMWF menyediakan data pemodelan atmosfer dengan resolusi tinggi dan data prediksi yang akurat (Bauer, Thorpe, & Brunet, 2015). Penggunaan satelit cuaca, radar cuaca, dan ECMWF dalam menganalisis kejadian hujan es memungkinkan pemahaman yang lebih detail, seperti mengidentifikasi pengaruh pergerakan angin, konvergensi, kelembapan udara, suhu puncak awan, hingga nilai reflektivitas (sitasi).

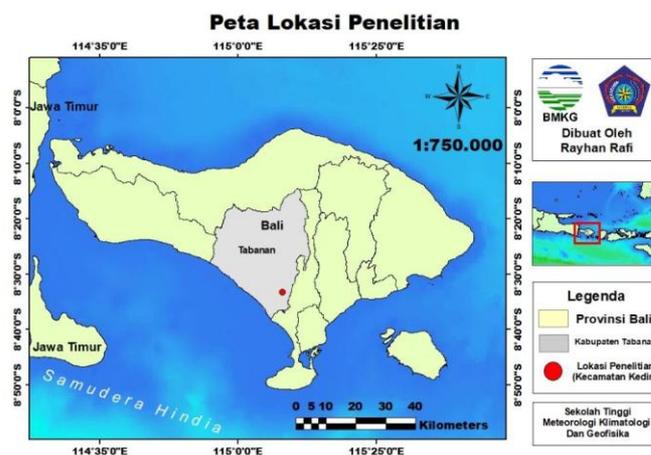
Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk menganalisis kejadian hujan es. Wicaksono et al. (2018), menunjukkan bahwa hujan es di Lubuklinggau disebabkan oleh awan konvektif yang kuat dengan suhu puncak awan mencapai  $-67,8^{\circ}\text{C}$ . Pada wilayah berbeda, Diniyati et al. (2021) menunjukkan hujan es di Kabupaten Ngawi disebabkan oleh adanya belokan angin disekitar wilayah Ngawi serta suhu permukaan laut yang hangat di Perairan Utara Pulau Jawa yang mendukung proses pertumbuhan awan konvektif. Hasil penelitian Badri & Darmawan (2024), menunjukkan kejadian hujan es di Kota Palembang disebabkan oleh adanya anomali suhu permukaan laut, konvergensi vertikal, serta kelembapan relatif yang mendukung potensi aktivitas konvektif yang menyebabkan terjadinya kejadian hujan es.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi atmosfer sebelum, saat, dan sesudah kejadian hujan es di Kabupaten Tabanan dengan menggunakan data citra satelit Himawari, citra radar cuaca, dan model ECMWF. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami proses dinamika atmosfer penyebab hujan es di wilayah tropis serta menjadi dasar dalam upaya peringatan dini dan mitigasi bencana cuaca ekstrem.

## Metode

### Data dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini bertempat di Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali, yang terletak di wilayah selatan Pulau Bali. Secara geografis, Kabupaten Tabanan berada pada koordinat  $8^{\circ}14' \text{ LS} - 8^{\circ}30' \text{ LS}$  dan  $114^{\circ}54' \text{ BT} - 115^{\circ}12' \text{ BT}$ , dengan luas area sebesar  $839,33 \text{ km}^2$ . Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada kejadian hujan es yang terjadi di wilayah tersebut pada tanggal 1 November 2024. Berikut merupakan peta lokasi penelitian untuk memberikan gambaran geografis terkait wilayah Kabupaten Tabanan.



Gambar 1. Peta wilayah penelitian Kabupaten Tabanan

Pada penelitian ini data yang digunakan, diantaranya sebagai berikut.

1. Data streamline angin, divergensi, vortisitas, dan kelembapan udara pada 1 November 2024 diperoleh dari produk data reanalisis ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). Data ini tersedia dalam format NetCDF (\*.nc) dan dapat diakses melalui laman Climate Reanalysis Copernicus Era 5 ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>) dengan menggunakan akun yang sudah terdaftar sebelumnya.
2. Data suhu puncak awan dan indeks stabilitas atmosfer pada 1 November 2024 diperoleh dari Subbidang Pengelolaan Citra Satelit, Pusat BMKG.
3. Data radar cuaca pada 1 November 2024 diperoleh dari Pusat Citra Radar BMKG.

### Teknik Pengolahan dan Analisis Data

Tahapan pengolahan dan analisis data dilakukan untuk memperoleh informasi yang komprehensif mengenai dinamika atmosfer yang berkontribusi terhadap kejadian hujan es pada tanggal 1 November 2024 di wilayah Kabupaten Tabanan. Adapun langkah-langkah pengolahan dan analisis data dijelaskan sebagai berikut:

1. Citra satelit Himawari-9 pada tanggal 1 November 2024 diolah menggunakan perangkat lunak *Satellite Animation and Interactive Diagnosis* (SATAID). Metode *Day Microphysics* RGB digunakan untuk mendeteksi keberadaan awan konvektif, sedangkan kanal Infrared (IR) digunakan untuk menganalisis suhu puncak awan. Hasil analisis kanal IR disajikan dalam bentuk kontur suhu puncak awan yang menggambarkan perkembangan awan konvektif di wilayah Kabupaten Tabanan sebelum, saat, dan setelah kejadian hujan es. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk visual (gambar) untuk mempermudah interpretasi.
2. Data indeks stabilitas atmosfer, seperti CAPE (*Convective Available Potential Energy*) yang digunakan untuk melihat potensi pertumbuhan awan konvektif, LI (*Lifted Index*) yang digunakan untuk melihat potensi kondisi stabilitas atmosfer, KI (*K Index*) yang digunakan untuk melihat potensi *thunderstorm*, SWEAT (*Severe Weather Threat Index*) dan TT (*Total Totals*) yang digunakan untuk mengindikasikan potensi cuaca buruk (Anugrah, Paski, & Sepriando, 2017; Ardiansyah, 2022; Badri & Darmawan, 2024; Fadholi, 2012; Maulidianto et al., 2024). Pengolahan data indeks stabilitas dilakukan menggunakan fitur *Numerical Weather Prediction* (NWP) pada aplikasi *Satellite Animation and Interactive Diagnosis* (SATAID). Nilai indeks stabilitas atmosfer digunakan untuk melihat dinamika atmosfer selama periode kejadian hujan es. Kriteria indeks stabilitas atmosfer ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Nilai Indeks Labilitas Atmosfer

| Indeks    | Lemah  | Moderate   | Kuat   |
|-----------|--------|------------|--------|
| LI Indeks | > 4    | (-4) - 4   | < (-4) |
| K Indeks  | < 29   | 29 - 37    | > 37   |
| CAPE      | < 1000 | 1000- 2500 | > 2500 |
| TT Indeks | < 42   | 42 - 46    | > 46   |
| SWEAT     | < 135  | 135 - 239  | > 239  |

Sumber : Wirjohamidjojo & Swarinoto (2014)

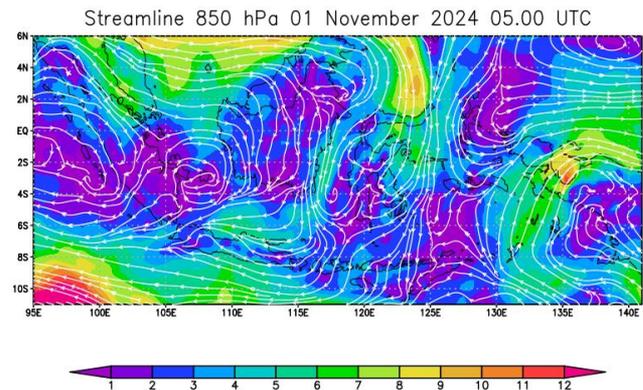
3. Data streamline angin, divergensi, vortisitas, dan kelembapan udara pada tanggal 1 November 2024 diperoleh dari produk reanalisis ECMWF melalui *Copernicus Climate Data Store*. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Grid*

*Analysis and Display System* (GrADS). Data streamline angin digunakan untuk mengidentifikasi pola angin dan keberadaan belokan angin (*shearline*). Data divergensi dan vortisitas digunakan untuk mengidentifikasi wilayah konvergensi dan mekanisme *updraft* yang meningkatkan potensi pertumbuhan awan. Data kelembapan udara digunakan untuk mengidentifikasi ketersediaan uap air di atmosfer yang berperan dalam proses pertumbuhan awan.

4. Data radar cuaca dari Balai Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar dengan sistem *Single Polarization* digunakan untuk menganalisis distribusi spasial dan intensitas presipitasi pada saat kejadian hujan es.

## Hasil dan Pembahasan

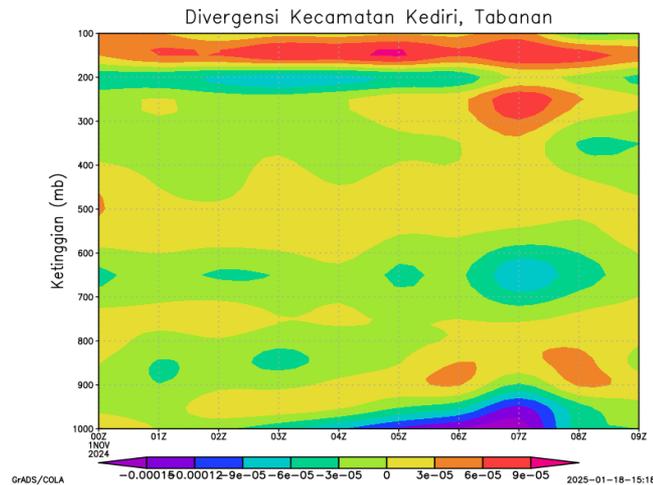
### Analisis Angin Streamline Lapisan 850mb



Gambar 2. Peta *Streamline* angin pada lapisan 850 mb di wilayah Indonesia. Kecepatan angin bervariasi dengan kecepatan tertinggi ditunjukkan oleh warna merah dan kecepatan terendah ditunjukkan oleh warna ungu.

Pada Gambar 2 menunjukkan peta *streamline* angin di wilayah Indonesia pada pukul 05.00 UTC. Dapat dilihat pada lapisan 850 mb, teridentifikasi adanya pola belokan angin di sekitar wilayah Kabupaten Tabanan. Pola belokan angin menyebabkan adanya perubahan arah angin secara signifikan dalam ruang sempit yang menyebabkan penumpukan massa udara. Penumpukan massa udara berkontribusi meningkatkan potensi terbentuknya awan-awan konvektif (Ardiansyah, 2022; Mason, 1971; Suryanto & Luthfian, 2019).

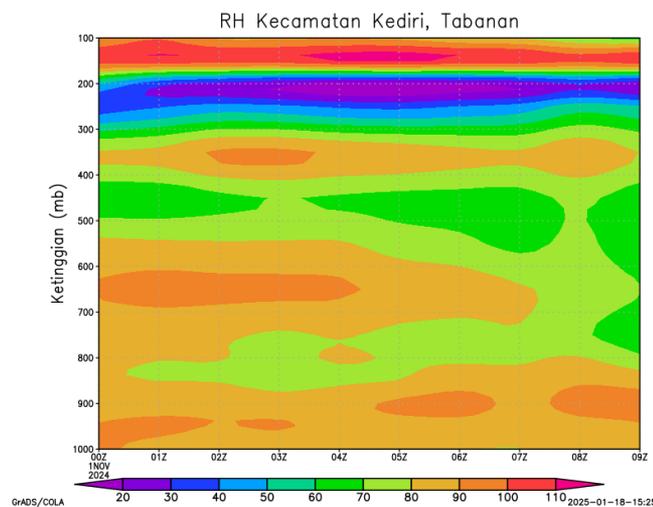
### Analisis Profil Vertikal Divergensi



Gambar 3. Profil Vertikal Divergensi di wilayah Kabupaten Tabanan. Nilai divergensi bervariasi dengan divergensi tertinggi ditunjukkan oleh warna merah dan divergensi terendah ditunjukkan oleh warna ungu.

Gambar 3 menunjukkan profil vertikal divergensi di wilayah Kabupaten Tabanan. Terlihat pada lapisan 1000-900 mb mulai menunjukkan adanya nilai divergensi negatif (konvergensi) pada pukul 05.00 UTC atau pukul 13.00 WITA. Hal ini mengindikasikan adanya pertemuan massa udara dari berbagai arah di lapisan bawah yang mendorong gerakan udara vertikal ke atas (*updraft*). Konvergensi di lapisan bawah menyebabkan udara naik dan mengalami pendinginan adiabatik yang berpotensi membentuk awan konvektif (Ayasha, 2022; Rogers & Yau, 1989).

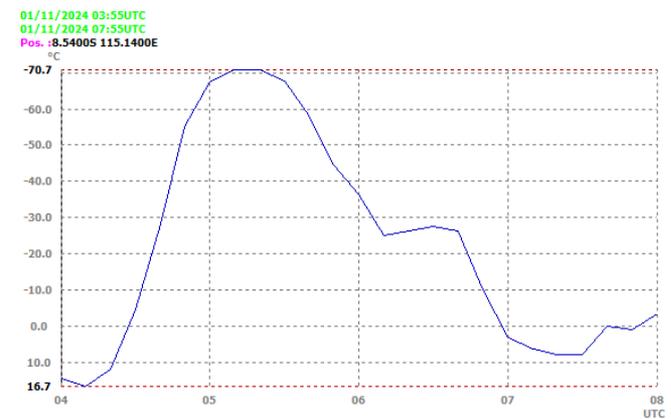
### Analisis Profil Vertikal Kelembapan Relatif



Gambar 4. Profil Vertikal Kelembapan Relatif di wilayah Kabupaten Tabanan. Nilai kelembapan bervariasi dengan kelembapan tertinggi ditunjukkan oleh warna merah dan kelembapan terendah ditunjukkan oleh warna ungu.

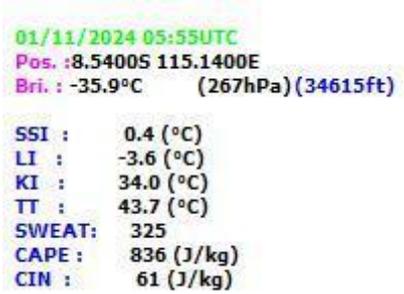
Gambar 4 menunjukkan pukul 00.00 UTC hingga 09.00 UTC pada lapisan 1000 - 900 mb kelembapan relatif berkisar antara 80% hingga 100%. Secara khusus, pada pukul 05.00 UTC, kelembapan relatif pada lapisan 900 mb mencapai kisaran 90% hingga 100%. Kondisi ini menunjukkan keberadaan udara hangat dan lembab di wilayah Kabupaten Tabanan yang berpotensi membentuk awan konvektif (Darmawan & Afriyanti, 2025; Drift & O’Gorman, 2024). Kelembapan relatif tinggi pada lapisan ini menyediakan suplai uap air yang cukup untuk mendukung proses kondensasi ketika udara bergerak vertikal ke atas (Djazim, 2011; Drift & O’Gorman, 2024; Hamid, Dayana, & Si, 2022)

### Analisis Citra Satelit



Gambar 5. *Time series* suhu puncak awan. Semakin tinggi nilainya menunjukkan suhu puncak awan yang semakin rendah.

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 01/11/2024 03:55UTC               |            |
| Pos. :8.5400S 115.1400E           |            |
| Bri. : 6.15°C                     |            |
| SSI :                             | 0.2 (°C)   |
| LI :                              | -3.5 (°C)  |
| KI :                              | 33.2 (°C)  |
| TT :                              | 43.7 (°C)  |
| SWEAT:                            | 330        |
| CAPE :                            | 800 (J/kg) |
| CIN :                             | 47 (J/kg)  |
| 01/11/2024 05:15UTC               |            |
| Pos. :8.5400S 115.1400E           |            |
| Bri. : -70.7°C (135hPa) (49189ft) |            |
| SSI :                             | 0.2 (°C)   |
| LI :                              | -3.6 (°C)  |
| KI :                              | 33.1 (°C)  |
| TT :                              | 43.8 (°C)  |
| SWEAT:                            | 331        |
| CAPE :                            | 851 (J/kg) |
| CIN :                             | 53 (J/kg)  |



Gambar 6. Indeks pada fase tumbuh pukul 04.00 UTC; (b) indeks pada fase matang pukul 05.20 UTC; (c) indeks pada fase luruh pukul 06.00 UTC

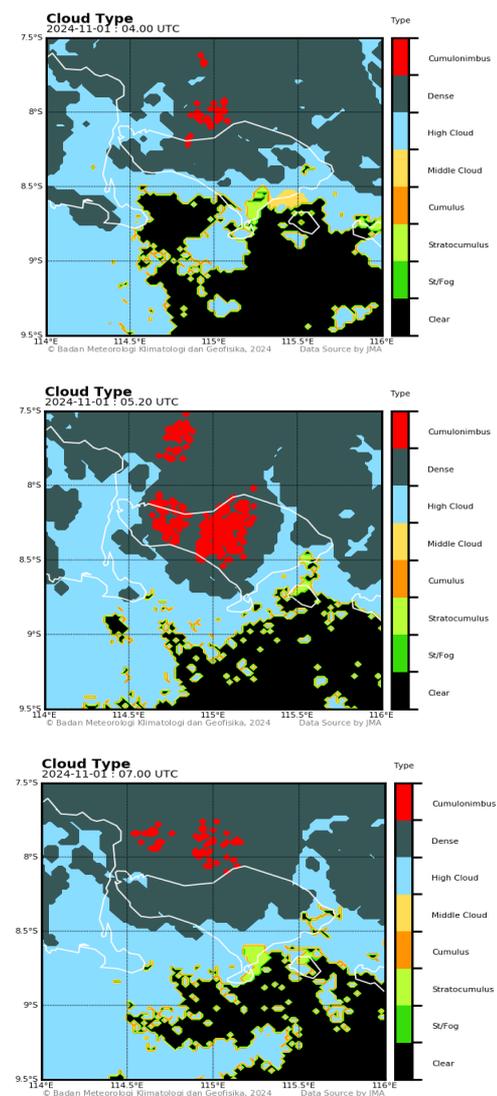
Tabel 2. Kriteria Nilai Indeks Stabilitas Atmosfer Pada Fase Tumbuh, Fase Matang, dan Fase Luruh

| Indeks    | Fase Tumbuh | Fase Matang | Fase Luruh |
|-----------|-------------|-------------|------------|
| LI Indeks | Moderate    | Moderate    | Moderate   |
| K Indeks  | Moderate    | Moderate    | Moderate   |
| CAPE      | Lemah       | Lemah       | Lemah      |
| TT Indeks | Moderate    | Moderate    | Moderate   |
| SWEAT     | Kuat        | Kuat        | Kuat       |

Pada gambar 5 menunjukkan perubahan suhu puncak awan terhadap waktu yang menandakan fase pertumbuhan, fase matang, hingga fase peluruhan awan konvektif. Penurunan suhu puncak awan mulai teramati pada pukul 04.00 UTC hingga mencapai suhu puncak terendah sebesar  $-70.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  pada pukul 05.20 UTC. Penurunan suhu puncak awan ini mengindikasikan adanya proses *updraft* yang kuat, yang dapat meningkatkan pertumbuhan awan secara vertikal hingga mencapai fase matang antara pukul 05.00 UTC hingga 05.20 UTC. Setelah pukul 05.20 UTC, terjadi kenaikan suhu puncak awan yang menunjukkan mulai terjadi fase peluruhan awan konvektif.

Sementara itu, gambar 6 menunjukkan nilai indeks stabilitas atmosfer pada fase pertumbuhan, fase matang, dan fase peluruhan awan konvektif. Dapat dilihat nilai LI menunjukkan kriteria moderate pada seluruh fase dengan nilai terendah mencapai  $-3.6$  yang terjadi pada fase pertumbuhan. Nilai LI yang semakin rendah menunjukkan atmosfer yang semakin labil dan mendukung pertumbuhan awan konvektif. Nilai K Indeks termasuk pada kriteria moderate pada setiap fase dengan nilai tertinggi sebesar  $34.0$  yang terjadi pada fase peluruhan. Semakin tinggi nilai K Indeks mengindikasikan potensi kejadian *thunderstorm*. Nilai CAPE termasuk kategori lemah pada seluruh fase, ini menunjukkan hujan es terbentuk dari sistem konvektif yang tidak terlalu kuat. Nilai TT Indeks menunjukkan kriteria moderate pada setiap fase dengan nilai

tertinggi mencapai  $43.8$  pada fase matang, sedangkan nilai SWEAT menunjukkan kriteria kuat pada seluruh fase dengan nilai tertinggi mencapai  $331$  pada fase matang. Nilai TT Indeks dan SWEAT yang tinggi menandakan semakin meningkatnya potensi terjadinya cuaca ekstrem. Secara keseluruhan, nilai-nilai indeks stabilitas atmosfer menunjukkan kondisi atmosfer yang labil selama kejadian hujan es (Fibriantika & Mayangwulan, 2020; Wirjohamidjojo & Swarinoto, 2014). Indikasi adanya dinamika atmosfer yang berperan signifikan pada proses pembentukan awan konvektif dan terjadinya cuaca ekstrem di wilayah Kabupaten Tabana diperkuat oleh indeks tersebut sesuai dengan penelitian Ardiansyah (2022) serta Kusumawardani & Azani (2022).

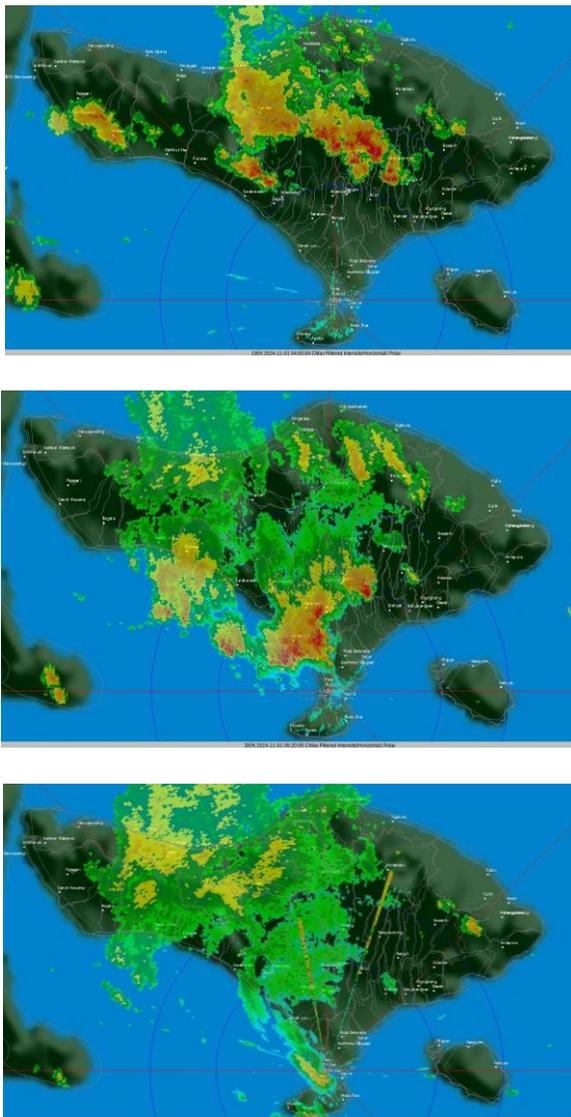


Gambar 7. (a) Tipe awan fase tumbuh; (b) tipe awan fase matang.; (c) tipe awan fase luruh

Pada gambar 7 menunjukkan identifikasi jenis awan pada saat fase pertumbuhan, fase matang, dan

fase peluruhan. Pada fase matang yang terjadi pukul 05.20 UTC, terlihat keberadaan awan Cumulonimbus (Cb) di wilayah Kabupaten Tabanan. Awan Cb merupakan awan konvektif yang keberadaannya sering dikaitkan dengan potensi terjadinya fenomena cuaca ekstrem, seperti hujan lebat, angin kencang, petir, hingga hujan es (Fadholi, 2012). Keberadaan awan Cb pada fase matang memperkuat temuan sebelumnya yang menunjukkan kondisi atmosfer yang labil di wilayah Kabupaten Tabanan sejalan dengan penelitian Fadholi (2012) dan Suwignyo et al. (2022).

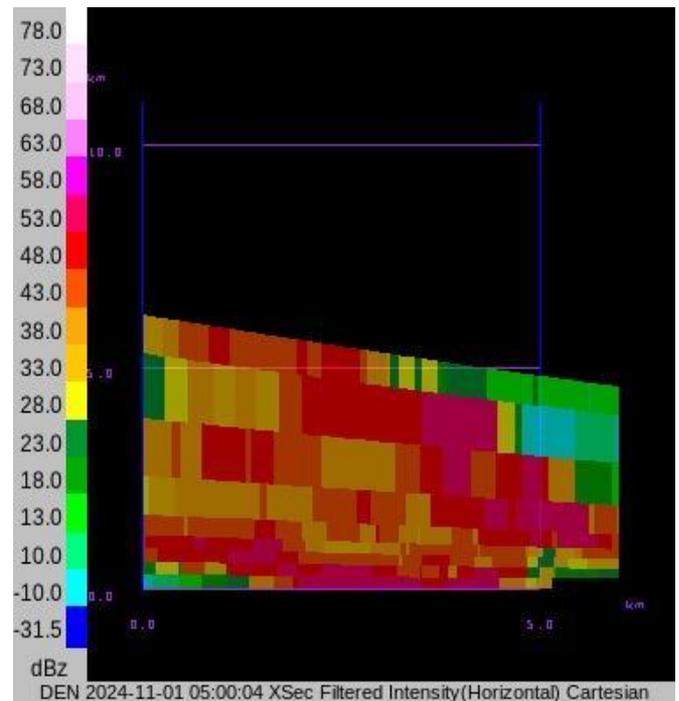
**Analisis Citra Radar**



Gambar 8. Citra radar produk CMAX (a) pukul 04.00 UTC; (b) pukul 05.20 UTC; (c) pukul 06.00.

Pada gambar 8 menampilkan citra radar CMAX yang menggambarkan struktur awan konvektif selama fase pertumbuhan, fase matang, hingga fase peluruhan. Pada saat fase matang yang terjadi sekitar pukul 05.20 UTC, terlihat pola *Very High Reflectivity*

dengan nilai reflektivitas maksimum mencapai 58 dBz. Nilai ini menunjukkan intensitas presipitasi yang tinggi. Secara umum, nilai reflektivitas melebihi 55 dBz merupakan indikator kuat adanya presipitasi berukuran besar seperti butiran es dalam awan konvektif (Mason, 1971). Berdasarkan penelitian Suwignyo et al. (2022), kemunculan pola reflektivitas ini menguatkan indikasi fenomena hujan es yang terjadi selama fase matang awan konvektif di wilayah Kabupaten Tabanan.



Gambar 9. Citra radar produk Cross Section View pukul 05.00 UTC

Gambar 9 menunjukkan pola *Tight Low-Level Reflectivity*, pola ini memperlihatkan gradasi reflektivitas yang tajam dari nilai rendah ke nilai tinggi pada lapisan atmosfer bagian bawah. Pola ini mengindikasikan adanya perubahan intensitas presipitasi yang signifikan dalam jarak horizontal yang sempit. Fenomena ini biasanya dikaitkan dengan keberadaan *updraft* yang kuat. Proses *updraft* berkontribusi dalam pembentukan awan konvektif yang berpotensi menyebabkan cuaca ekstrem seperti hujan es (Djazim, 2011; Rogers & Yau, 1989).

**Kesimpulan**

Berdasarkan analisis dinamika atmosfer dan pengamatan data cuaca selama kejadian hujan es di Kabupaten Tabanan pada 1 November 2024, dapat disimpulkan bahwa fenomena tersebut dipicu oleh kondisi atmosfer yang sangat labil dan mendukung pembentukan awan konvektif kuat. Teridentifikasinya pola belokan angin pada lapisan 850 mb serta nilai

divergensi negatif (konvergensi) pada lapisan 1000–900 mb menunjukkan adanya suplai massa udara dan mekanisme pengangkatan vertikal (updraft) yang kuat. Kelembaban relatif yang tinggi (hingga 100%) pada lapisan bawah menyediakan uap air yang melimpah untuk proses kondensasi. Penurunan suhu puncak awan hingga  $-70,7^{\circ}\text{C}$  pada fase matang menandakan pertumbuhan awan yang signifikan secara vertikal, diperkuat dengan munculnya awan Cumulonimbus (Cb) pada waktu bersamaan. Indeks stabilitas atmosfer seperti LI, K-Index, TT, dan SWEAT mengindikasikan kondisi atmosfer yang labil hingga sangat labil selama kejadian, mendukung terbentuknya cuaca ekstrem. Citra radar CMAX yang menunjukkan nilai reflektivitas tinggi (hingga 58 dBz) serta pola Tight Low-Level Reflectivity menguatkan bukti terjadinya presipitasi intens dan kemungkinan terbentuknya butiran es dalam awan. Dengan demikian, hujan es yang terjadi merupakan hasil dari interaksi kompleks antara dinamika atmosfer, kelembaban, dan ketidakstabilan udara yang mendukung terbentuknya awan konvektif kuat dan presipitasi ekstrem di wilayah tersebut.

#### Daftar Pustaka

- Anugrah, J., Paski, I., & Sepriando, A. (2017). Analisis Dinamika Atmosfer Kejadian Hujan Es Memanfaatkan Citra Radar dan Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Tanggal 3 Mei 2017 di Kota Bandung). *Seminar Nasional Penginderaan Jauh Ke-4 Tahun 2017*. Retrieved from [www.satelit.bmkg.go.id](http://www.satelit.bmkg.go.id)
- Ardiansyah, D. (2022). Labilitas Atmosfer Terkait Kejadian Hujan Es ( Studi Kasus Hujan Es di Sindang Dataran Bengkulu Tanggal 25 Juni 2021).
- Ayasha, N. (2022). Kajian Analisis Parameter Vertical Velocity dan Kaitannya dengan Kondisi Parameter Cuaca saat Kejadian Hujan ES. *Buletin GAW Bariri (BGB)*, 3(1), 17–24. <https://doi.org/10.31172/bgb.v3i1.64>
- Badri, A., & Darmawan, Y. (2024). Analisis Kondisi Atmosfer pada Kejadian Hujan ES di Kota Palembang 04 November 2023. *GEOGRAPHIA : Jurnal Pendidikan Dan Penelitian Geografi*, 5, 59–67. <https://doi.org/10.53682/gjppg.v5i1.8469>
- Darmawan, Y. & Afriyanti. (2025). Analisis Pertumbuhan Awan Konvektif Berbasis Data Citra Satelit pada Kejadian Puting Beliung Tanjungpandan Kabupaten Belitung (Studi Kasus 17 Mei 2023). *Jurnal Kolaboratif Sains*, 8(4), 1830–1839. <https://doi.org/10.56338/jks.v8i4.6951>
- Diniyati, E., Syofyan, D. Q., & Mulya, A. (2021). Analisis Hujan Es di Kabupaten Ngawi Berdasarkan Citra Satelit Himawari-8 dan Data Reanalisis Copernicus ECMWF. *Jurnal Geografi*, 18(2), 69–75. <https://doi.org/10.15294/jg.v18i2.28010>
- Djazim, S. (2011). Potensi Atmosfer dalam Pembentukan Awan Konvektif Pada Pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca Di Das Kotopanjang dan Das Singkarak 2010. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 12(1), 9–16.
- Drift, R. J. van der, & O’Gorman, P. A. (2024). *Dependence of convective precipitation extremes on near-surface relative humidity*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2412.16306>
- Fadholi, A. (2012). Analisa Kondisi Atmosfer pada Kejadian Cuaca Ekstrem Hujan Es (Hail ). *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1(D). <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v3i0.28526>
- Fibriantika, E., & Mayangwulan, D. (2020). Analisis Spasial Indeks Stabilitas Udara di Indonesia. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 21, 1–12. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v21i1.4005>
- Hamid, M., Dayana, I., & Si, N. (2022). *Meteorologi*. Guepedia.
- Kusumawardani, N., & Azani, A. A. (2022). Kajian Indeks Stabilitas Atmosfer Terhadap Kejadian Hujan Lebat Di Kota Bitung: (Studi Kasus Tahun 2020–2021). *Jurnal Widya Climago*, 4(1).
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Herman, R. L. (2018). *The Atmosphere An Introduction to Meteorology Fourteenth Edition* (14th ed.). Pearson.
- Mason, B. J. (1971). *The Physics of Clouds* (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press.
- Maulidianto, Tempo, N. F. R., & Haryanto, Y. D. (2024). Analisis Kondisi Atmosfer Saat Kejadian Hujan Es (Studi Kasus: Kejadian Hujan Es Tanggal 29 November 2023 di Kabupaten Timor Tengah Selatan). *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 11(1), 60–77. <https://doi.org/10.24252/jft.v11i1.45152>
- Paski, J. A. I., Permana, D. S., Prayudha, S. S., & Pertiwi, D. A. S. (2022). Pemanfaatan Citra Radar Cuaca Untuk Analisis Kejadian Hujan Es Di Surabaya Tanggal 21 Februari 2022. *Jurnal Sains Dan Teknologi Atmosfer*, 2(2), 1–8.
- Rogers, R. R., & Yau, M. K. (1989). *A Short Course in Cloud Physics* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Suryanto, W., & Luthfian, A. (2019). *Pengantar Meteorologi*. Ugm Press.
- Suwignyo, P., Syaidi, A., Redha, N. I., & Novvria, S. (2022). Studi Awan Konvektif Penyebab Hujan Es Menggunakan Radar Cuaca Doppler Single Polarization di Bogor (23 September 2020).

- Jurnal Aplikasi Meteorologi*, 1(1), 32–42.  
<https://stmkg.balai2bmkkg.id/index.php/jam/article/view/17>
- Wicaksono, H., Sadarang, F., & Fadlan, A. (2019). Analisis Hujan Es di Kota Lubuklinggau dengan Memanfaatkan Data Citra SaTELit Himawari-8 dan Radiosonde. *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)*, 3, 130.  
<https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v3i0.28526>
- Wirjohamidjojo, S., & Swarinoto, Y. S. (2014). *Indeks dan Peredaran Atmosfer Tropik*. Puslitbang Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.