

ANALISIS KEJADIAN HUJAN ES MENGGUNAKAN RADAR CUACA DAN SATELIT HIMAWARI-9 (STUDI KASUS: KABUPATEN KARANGANYAR 21 MARET 2025)

Rica Azzura Maldina^{1*}, Aditya Mulya², Latifah Nurul Qomariyatuazzamzami³, Yosafat Donni Haryanto

^{1,2,3}Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika; Jl. Meteorologi No.5, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15119; (021) 73691621

Keywords:

Awan Cumulonimbus; Cuaca Ekstrem; Himawari-9; Hujan Es; Radar Cuaca

Correspondent Email:

ricamaldina@gmail.com

Abstrak. Hujan es merupakan salah satu fenomena cuaca ekstrem yang relatif jarang terjadi di wilayah tropis, namun berpotensi menimbulkan kerugian material dan gangguan aktivitas masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik kejadian hujan es di Kabupaten Karanganyar pada 21 Maret 2025 menggunakan data radar cuaca dan satelit Himawari-9. Metode yang digunakan adalah penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif melalui analisis produk radar cuaca CMAX, VCUT, VIL dan ZHAIL serta analisis suhu puncak awan dan indeks labilitas atmosfer dari satelit Himawari-9. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sel konvektif berkembang dari fase tumbuh pada pukul 08.40 UTC dan mencapai fase matang pada pukul 09.10 UTC. Pada fase matang, nilai reflektivitas maksimum mencapai 65 dBZ, nilai VIL sekitar 55 kg/m², dan probabilitas hujan es pada produk ZHAIL melebihi 80%. Analisis VCUT menunjukkan adanya struktur *Overhang Echo* (OE) dan *Three Body Scatter Spike* (TBSS) yang mengindikasikan keberadaan *updraft* kuat dan partikel es berukuran besar di dalam awan. Sementara itu, suhu puncak awan menurun signifikan pada fase matang, yang menunjukkan pertumbuhan awan cumulonimbus yang tinggi dan tebal. Nilai indeks labilitas atmosfer menunjukkan kondisi atmosfer yang cukup labil dan mendukung perkembangan konveksi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi data radar cuaca dan satelit Himawari-9 efektif untuk mengidentifikasi karakteristik awan cumulonimbus penyebab hujan es serta mendukung upaya pemantauan dan peringatan dini cuaca ekstrem.

Abstract. Hail is an extreme weather phenomenon that is relatively rare in tropical regions, but has the potential to cause material losses and disrupt community activities. This study aims to analyze the characteristics of hail events in Karanganyar Regency on March 21, 2025, using weather radar and Himawari-9 satellite data. The method used is quantitative research with a descriptive approach through analysis of CMAX, VCUT, VIL and ZHAIL weather radar products as well as analysis of cloud top temperature and atmospheric lability index from the Himawari-9 satellite. The results show that the convective cell developed from the growth phase at 08:40 UTC and reached the mature phase at 09:10 UTC. In the mature phase, the maximum reflectivity value reached 65 dBZ, the VIL value was around 55 kg/m², and the probability of hail in the ZHAIL product exceeded 80%. VCUT analysis showed the presence of *Overhang Echo* (OE) and *Three Body Scatter Spike* (TBSS) structures indicating the presence of strong updrafts and large ice particles in the cloud. Meanwhile, cloud top temperatures decreased significantly during the mature phase, indicating the



Copyright © 2026 The Author(s),
Published by Jurnal Informatika dan
Teknik Elektro Terapan. This is an
open-access article distributed under
the terms of the Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0
International License (CC BY-NC
4.0).

growth of tall and thick cumulonimbus clouds. The atmospheric lability index indicates relatively unstable atmospheric conditions, supporting the development of convection. The results of this study demonstrate that the combination of weather radar and Himawari-9 satellite data is effective in identifying the characteristics of cumulonimbus clouds that cause hail and supports monitoring and early warning efforts for extreme weather.

1. PENDAHULUAN

Negara tropis merupakan negara yang berada di sekitar ekuator bumi atau garis khatulistiwa. Wilayah Indonesia termasuk sebagai negara tropis hanya mempunyai dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan. Pergantian musim dari musim kemarau ke musim hujan ataupun sebaliknya disebut sebagai periode peralihan. Pada saat periode peralihan tersebut, cuaca mengalami perubahan yang signifikan. Periode peralihan ini berpotensi meningkatkan kejadian cuaca ekstrem [1]. Menurut Peraturan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Nomor 9 Tahun 2022 tentang Penyediaan dan Penyebarluasan Peringatan Dini Cuaca Ekstrem, cuaca ekstrem merupakan peristiwa alam yang ditandai oleh kondisi cuaca seperti curah hujan, kecepatan dan arah angin, suhu, kelembapan, serta jarak pandang yang berpotensi menimbulkan kerugian terutama terhadap keselamatan manusia dan harta benda. Berdasarkan kriteria cuaca ekstrem yang diatur dalam peraturan tersebut, salah satu peristiwa yang dikategorikan sebagai cuaca ekstrem adalah hujan es [2].

Hujan es adalah presipitasi berupa butiran es keras dengan bentuk bulat atau gumpalan tidak beraturan yang memiliki diameter 5 mm atau lebih [3]. Proses terbentuknya hujan es dimulai dari awan cumulonimbus yang tinggi, dengan keberadaan arus udara naik (*updraft*) yang kuat [4]. Salah satu cara untuk memantau pertumbuhan awan dan mendeteksi kejadian hujan es adalah dengan menggunakan radar cuaca [5]. Radar cuaca merupakan instrumen penginderaan jauh yang bekerja dengan mengirimkan pulsa gelombang elektromagnetik ke atmosfer dan kemudian menerima kembali energi yang dipantulkan oleh partikel seperti tetesan air dan butiran es. Beberapa produk radar cuaca yang dapat digunakan untuk mendeteksi kejadian hujan es antara lain CMAX, VCUT, VIL dan ZHAIL.

Menurut Prasetyo dkk. (2022) pada kejadian di Bogor tanggal 23 September 2020 memanfaatkan beberapa produk radar cuaca, yaitu CMAX, VCUT, VIL dan ZHAIL. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada saat terjadi hujan es, nilai reflektivitas mencapai 60 dBZ [6]. Hal tersebut dapat mengindikasikan bahwa terdapat kejadian hujan es jika dilihat kriteria nilai reflektivitas untuk hujan es yaitu >55 dBZ [7]. Berdasarkan produk VCUT teridentifikasi pola *Weak Echo Region* (WER) dan *Overhang Echo* (OE) yang menunjukkan adanya updraft kuat. Selain itu, produk VIL menunjukkan nilai 39.68 kg m⁻² dan produk ZHAIL memperlihatkan peluang hujan es yang mencapai 80% pada fase puncak awan. Selain menggunakan radar cuaca, satelit Himawari-9 juga dapat digunakan untuk memantau pertumbuhan awan cumulonimbus penyebab hujan es melalui kanal *infrared* (IR) untuk melihat suhu puncak awan. Adapun untuk mengetahui potensi konveksi dan kemungkinan terbentuknya awan cumulonimbus, dapat dinilai melalui indeks labilitas atmosfer. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Diniyati dkk. (2021) di Kabupaten Ngawi tanggal 11 November 2019 yang menunjukkan awan cumulonimbus tinggi dan tebal teridentifikasi melalui kanal IR dengan suhu puncak awan yang rendah dan melalui indeks labilitas yang mendukung terbentuknya konveksi kuat [8].

Salah satu kejadian hujan es yang pernah terjadi di Indonesia adalah peristiwa hujan es yang melanda Kabupaten Karanganyar pada 21 Maret 2025. Kejadian ini menjadi perhatian karena hujan es merupakan fenomena cuaca ekstrem yang relatif jarang terjadi di wilayah tropis seperti Indonesia, namun dapat menimbulkan kerugian material serta mengganggu aktivitas masyarakat. Selain itu, kejadian tersebut menunjukkan adanya dinamika atmosfer yang kuat dan kondisi cuaca yang mendukung terbentuknya butiran es di dalam awan konvektif. Oleh karena itu, kejadian hujan es di Kabupaten Karanganyar

pada 21 Maret 2025 dipilih sebagai objek kajian untuk menganalisis kondisi atmosfer serta perkembangan awan konvektif yang memicu terjadinya hujan es dengan memanfaatkan data radar cuaca dan satelit cuaca. Melalui analisis tersebut, diharapkan dapat diperoleh informasi mengenai indikasi kemunculan hujan es yang terekam oleh radar dan satelit, sehingga dapat mendukung upaya pemantauan dan peringatan dini cuaca ekstrem secara lebih optimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hujan Es

Hujan es (*hail*) merupakan salah satu bentuk presipitasi dengan endapan yang jatuh berupa bola es atau bongkahan es yang disebut *hailstone* berukuran diameter paling sedikit 5 mm yang dihasilkan dari awan cumulonimbus [3]. Hujan es dalam proses pembentukannya membutuhkan lingkungan dengan *updraft* yang kuat dan ketinggian *freezing level* yang relatif rendah dari biasanya. Salah satu syarat proses pembentukannya adalah arus udara yang naik di dalam awan membawa partikel es kecil jauh di atas level pembekuan, sehingga partikel es tumbuh dengan bertabrakan dengan tetesan air superdingin [9]. Partikel es yang terbentuk melalui proses tersebut umumnya memiliki ukuran yang lebih besar dibandingkan presipitasi biasa, sehingga ketika jatuh menuju lapisan atmosfer yang lebih rendah dengan suhu relatif hangat, tidak seluruh partikel es tersebut mengalami proses pencairan [10].

2.2 Radar Cuaca

Radar adalah suatu sistem gelombang elektromagnetik yang digunakan untuk mendeteksi, mengukur ketinggian dan jarak objek dimana dalam hal ini berkaitan dengan informasi cuaca [11]. Teknologi ini berfungsi menangkap sinyal dari partikel atmosfer, seperti tetesan air, kristal es, atau partikel lainnya dalam wilayah jangkauan radar. Salah satu produk radar adalah CMAX yang merupakan keluaran radar cuaca yang menampilkan nilai reflektivitas tertinggi di setiap kolom atmosfer pada satu lokasi horizontal, yaitu reflektivitas maksimum yang terdeteksi dari semua elevasi pemindaian radar [12]. Selanjutnya, VCUT merupakan produk untuk menampilkan reflektivitas secara *cross*

section sehingga struktur objek di atmosfer dapat diamati secara vertikal. Posisi bidang vertikal pada VCUT ditentukan oleh dua titik yang dapat dipilih sesuai kebutuhan analisis [12]. Selain itu, VIL adalah salah satu produk radar yang bertujuan memberikan perkiraan cepat mengenai jumlah kandungan air di lapisan tertentu atmosfer. Terakhir, ZHAIL merupakan produk yang dibuat berdasarkan data reflektivitas dari pemindaian tiga dimensi. Produk ini digunakan untuk menilai potensi hujan es dengan membandingkan ketinggian inti reflektivitas kuat terhadap *freezing level* [12].

2.3 Satelit Himawari-9

Satelit Himawari-9 merupakan satelit meteorologi geostasioner generasi terbaru yang dikembangkan oleh *Japan Meteorological Agency* (JMA) sebagai penerus satelit MTSAT-2. Satelit ini membawa instrumen utama berupa *Advanced Himawari Imager* (AHI) yang memiliki peningkatan signifikan dibandingkan sensor pada satelit generasi sebelumnya, baik dari sisi resolusi spektral, spasial, maupun temporal [13]. AHI merupakan sensor pencitraan multispektral dengan 16 kanal spektral, yang terdiri atas tiga kanal *visible*, tiga kanal *near-infrared* dan sepuluh kanal *infrared*. Resolusi spasial AHI mencapai 0,5–1 km untuk kanal *visible*, 1–2 km untuk kanal *near-infrared*, serta 2 km untuk kanal *infrared*.

Pada awan konvektif, suhu puncak awan mencerminkan tingkat kedinginan awan tersebut. Semakin rendah suhu puncak awan, semakin kuat proses konveksi di dalam awan. Selain itu, suhu yang sangat rendah menunjukkan adanya pembentukan partikel es di dalam awan konvektif tersebut. Hujan es terbentuk dari awan cumulonimbus, yaitu jenis awan konvektif yang memiliki puncak dengan suhu rendah. Suhu yang dingin pada puncak awan ini menunjukkan bahwa partikel es mulai terbentuk di dalam awan konvektif tersebut [9].

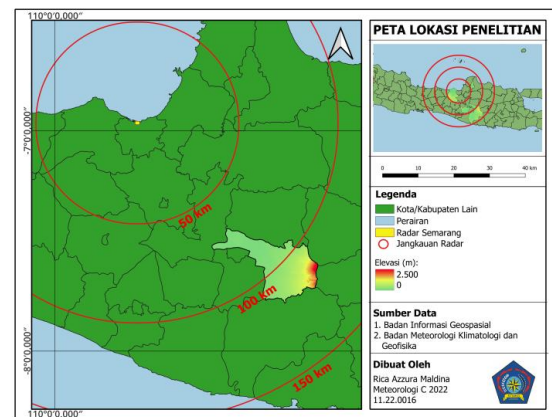
2.4 Indeks Labilitas Atmosfer

Untuk mengukur ketidakstabilan atmosfer, nilai-nilai indeks labilitas dapat digunakan. Nilai-nilai ini menunjukkan perbedaan suhu dan kelembapan antara lapisan-lapisan udara di atmosfer, yang

memengaruhi kemampuan atmosfer untuk mendukung proses konveksi, yaitu pengangkatan udara hangat dan lembap ke lapisan yang lebih tinggi [14]. Namun, hingga saat ini belum terdapat satu indeks yang dapat dianggap paling unggul dalam merepresentasikan seluruh proses pembentukan awan cumulonimbus. Stull (2017) menyatakan bahwa untuk tujuan prakiraan awan cumulonimbus, beberapa indeks stabilitas yang umum digunakan meliputi *Lifted Index* (LI), *Showalter Index* (SI), *K Index* (KI), *Total Totals Index* (TT), dan *Severe Weather Threat Index* (SWEAT) [15]. Selain itu, energi yang dimiliki oleh parcel udara berperan penting dalam pembentukan *thunderstorm*, sehingga CAPE digunakan untuk mengukur besarnya energi konvektif yang tersedia. CAPE merepresentasikan besarnya energi apung (*buoyancy*) yang tersedia untuk mempercepat pergerakan parcel udara secara vertikal ke atas atmosfer [15].

3. METODE PENELITIAN

Bentuk penelitian ini termasuk dalam penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif. Adapun pendekatan deskriptif pada jenis penelitian kuantitatif bertujuan untuk menggambarkan atau mendeskripsikan suatu fenomena sebagaimana adanya dari data yang digunakan [17]. Penelitian ini akan menggambarkan dan menjelaskan kondisi atmosfer pada saat kejadian hujan es berdasarkan nilai parameter yang terukur menggunakan radar cuaca dan satelit Himawari-9. Selanjutnya, lokasi penelitian dilakukan di Kabupaten Karanganyar saat terjadi kejadian hujan es dengan letak secara geografis berada pada koordinat sekitar $7,59^{\circ}$ LS dan $110,94^{\circ}$ BT. Lokasi penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Wilayah Lokasi Penelitian

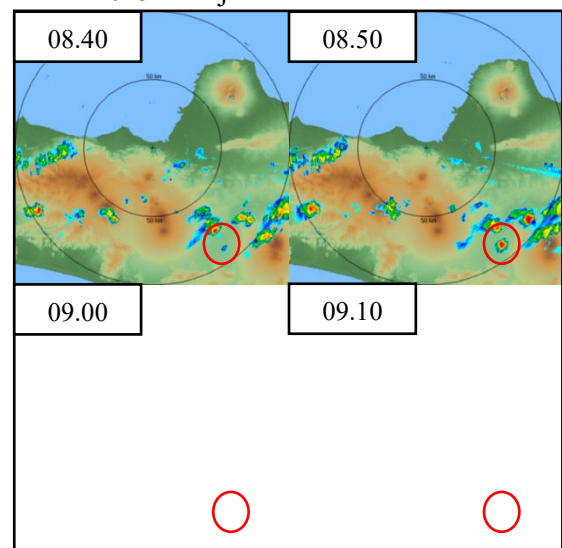
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

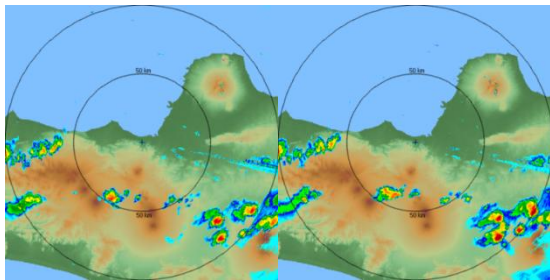
4.1 Analisis Radar Cuaca

Kajian potensi hujan es dan perkembangan sel konvektif berdasarkan hasil pengamatan radar cuaca melalui produk CMAX, VCUT, VIL, dan ZHAIL.

4.1.1 Analisis CMAX

Produk CMAX digunakan untuk menganalisis perkembangan sel konvektif berdasarkan nilai reflektivitas maksimum selama siklus hidup awan. Perubahan nilai reflektivitas dapat digunakan untuk mengidentifikasi tahapan perkembangan sel konvektif, mulai dari tahap tumbuh, tahap matang hingga tahap disipasi. Tahap tumbuh awan diidentifikasi berdasarkan peningkatan nilai reflektivitas radar yang secara bertahap mendekati 38 dBZ [18]. Perkembangan tahap tumbuh awan saat kejadian hujan es tanggal 21 Maret 2025 ditunjukkan oleh Gambar 4.1.

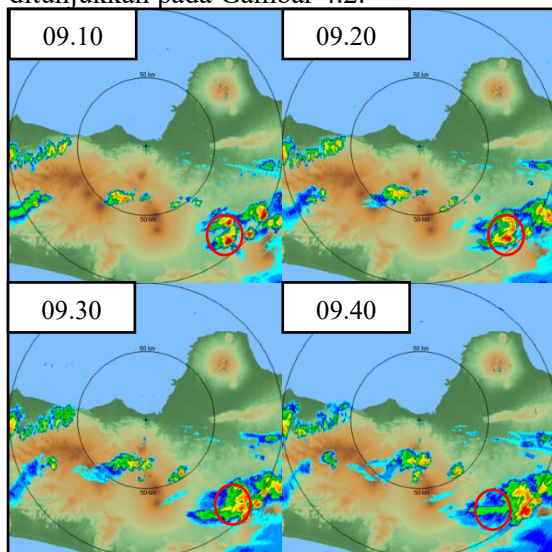




Gambar 4.1 Produk CMAX pada tahap tumbuh tanggal 21 Maret 2025

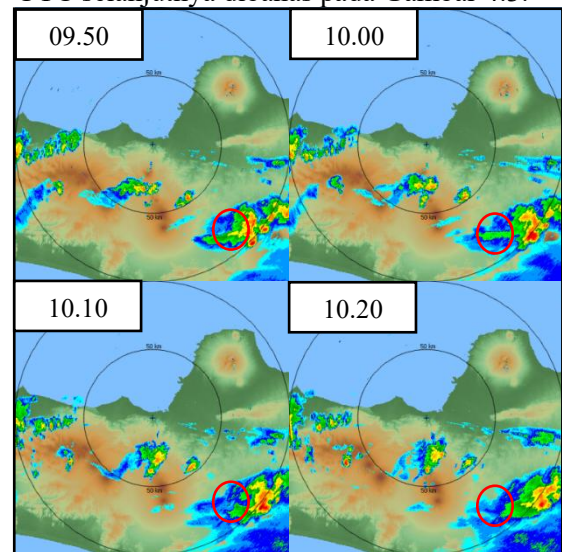
Berdasarkan Gambar 4.1, produk CMAX tanggal 21 Maret 2025 pukul 08.40–09.40 UTC, sel konvektif mulai berkembang pada pukul 08.40 UTC dengan nilai reflektivitas maksimum 27 dBZ. Selanjutnya dari pukul 08.50 UTC, sel konvektif terus berkembang yang ditunjukkan oleh peningkatan reflektivitas. Nilai reflektivitas masih terus meningkat hingga mencapai sekitar 50 dBZ pada pukul 09.00 UTC. Peningkatan reflektivitas ini menunjukkan bahwa sel konvektif telah memasuki tahap matang yang ditandai dengan nilai reflektivitas ≥ 38 dBZ (Gamache dan Houze, 1981).

Produk CMAX tanggal 21 Maret 2025 pukul 09.10–09.20 UTC, terlihat bahwa sel konvektif pada wilayah yang ditandai lingkaran merah telah memasuki tahap matang. Tahap ini ditandai dengan nilai reflektivitas radar yang telah melebihi 38 dBZ [18]. Nilai reflektivitas yang tinggi tersebut menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi hidrometeor di dalam awan, baik berupa tetes air berukuran besar maupun partikel es. Tahap matang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Produk CMAX pada tahap matang tanggal 21 Maret 2025

Pada Gambar 4.2, pukul 09.10 UTC, inti sel konvektif menunjukkan reflektivitas paling tinggi selama periode pengamatan yang menunjukkan bahwa aktivitas konveksi telah berkembang kuat dengan reflektivitas sebesar 65 dBZ. Nilai reflektivitas yang mencapai lebih dari 55 dBZ ini mengindikasikan adanya pertumbuhan partikel es di dalam awan cumulonimbus yang berpotensi menghasilkan hujan es [7]. Selanjutnya pada pukul 09.20 UTC yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9, inti sel konvektif masih menunjukkan reflektivitas tinggi, yaitu area inti mencapai 58 dBZ. Namun, pada pukul 09.30 UTC reflektivitas mulai menurun sehingga berdasarkan produk CMAX, sel konvektif telah memasuki tahap disipasi. Penurunan reflektivitas tersebut berlanjut hingga pukul 09.40 UTC yang menunjukkan proses disipasi semakin jelas. Kondisi pada pukul 09.30 UTC dan 09.40 UTC selanjutnya dibahas pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Produk CMAX pada tahap disipasi tanggal 21 Maret 2025

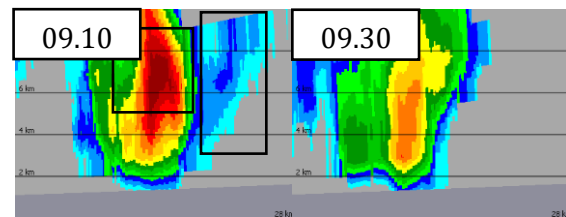
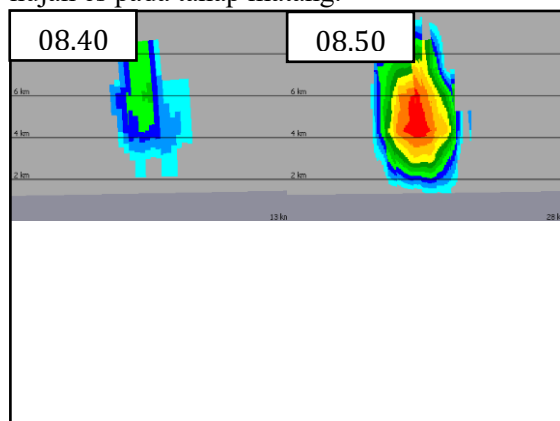
Pada Gambar 4.3 produk CMAX tanggal 21 Maret 2025 pukul 09.30–10.00 UTC, terlihat bahwa sel konvektif telah memasuki tahap disipasi. Pada pukul 09.30 UTC, inti sel konvektif masih menunjukkan reflektivitas maksimum sekitar 38.50 dBZ. Selanjutnya, pada pukul 09.40 UTC reflektivitas inti sel menurun menjadi sekitar 26 dBZ. Pada pukul 09.50 UTC, reflektivitas

kembali menurun hingga sekitar 23 dBZ. Hal ini menunjukkan kecenderungan reflektivitas yang terus menurun hingga pukul 10.00 UTC.

4.1.2 Analisis VCUT

Pada produk VCUT, analisis dilakukan pada fase tumbuh, matang dan disipasi awan yang telah teridentifikasi sebelumnya. Produk VCUT digunakan untuk mengidentifikasi distribusi reflektivitas secara vertikal. Produk VCUT tanggal 21 Maret 2025 menunjukkan perkembangan struktur vertikal awan cumulonimbus pada tahap tumbuh (08.40 UTC dan 08.50 UTC), tahap matang (09.10 UTC) dan tahap disipasi (09.30 UTC).

Berdasarkan Gambar 3.4, pada tahap tumbuh pukul 08.40 UTC dan 08.50 UTC, terlihat indikasi awal aktivitas konvektif. Selanjutnya, pada tahap matang pukul 09.10 UTC, produk VCUT menunjukkan adanya indikasi OE, yang ditandai dengan kotak hitam dengan reflektivitas tinggi pada bagian atas awan dibandingkan bagian bawahnya. Struktur ini menunjukkan adanya *updraft* yang kuat sehingga hidrometeor terangkat ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi. Selain itu, terlihat adanya fenomena TBSS yang memanjang dari inti reflektivitas tinggi ditunjukkan oleh persegi panjang hitam. Kemunculan TBSS menunjukkan terjadinya hamburan ganda akibat keberadaan partikel es berukuran besar di dalam awan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa proses pembentukan hujan es sedang berlangsung dan memperkuat indikasi potensi hujan es pada tahap matang.

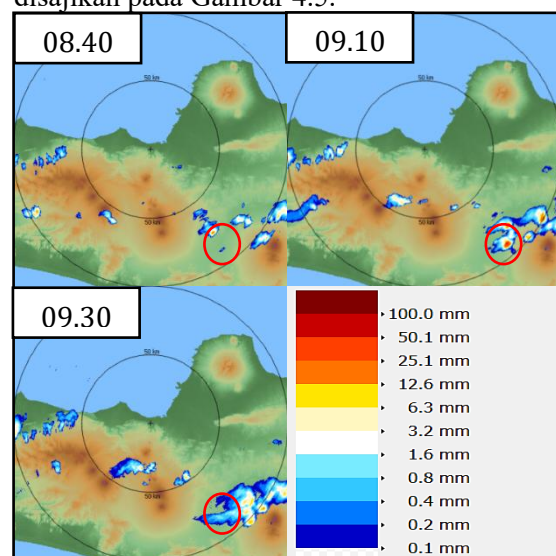


Gambar 4.4 Produk VCUT tanggal 21 Maret 2025 pada tahap tumbuh, matang dan disipasi

Selain itu, terlihat tahap disipasi pukul 09.30 UTC, struktur vertikal awan mulai mengalami penyusutan yang ditandai dengan berkurangnya luasan reflektivitas tinggi dibandingkan tahap matang. Reflektivitas juga mulai menurun dan inti reflektivitas tinggi tidak lagi berkembang seperti pada tahap sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas konveksi mulai melemah akibat berkurangnya kekuatan arus naik.

4.1.3 Analisis VIL

Produk VIL tanggal 21 Maret 2025 menunjukkan perkembangan kandungan hidrometeor pada awan cumulonimbus selama tahap tumbuh (08.40 UTC), tahap matang (09.10 UTC) dan tahap disipasi (09.30 UTC). Nilai VIL meningkat seiring perkembangan aktivitas konvektif, lalu menurun saat sel konvektif mulai melemah. Hasil produk VIL saat kejadian hujan es tanggal 21 Maret 2025 disajikan pada Gambar 4.5.



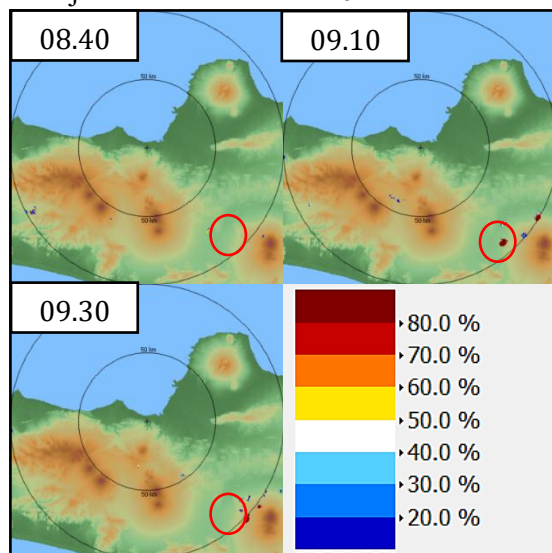
Gambar 4.5 Produk VIL tanggal 21 Maret 2025

Berdasarkan Gambar 4.5, pada tahap tumbuh pukul 08.40 UTC, nilai VIL masih

berkisar $0,32 \text{ kg/m}^2$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kandungan hidrometeor di dalam awan masih relatif sedikit sehingga sel konvektif masih berada pada fase pertumbuhan. Selanjutnya, pada tahap matang pukul 09.10 UTC, nilai VIL meningkat secara signifikan hingga mencapai sekitar 55 kg/m^2 . Nilai tersebut telah melebihi ambang 20 kg/m^2 yang dikemukakan oleh Kitzmiller dkk. (1995)[19] sehingga mengindikasikan adanya potensi terbentuknya hujan es. Pada tahap disipasi pukul 09.30 UTC, nilai VIL berada pada kisaran $1,86 \text{ kg/m}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan hidrometeor di dalam awan mulai berkurang seiring melemahnya aktivitas konveksi.

4.1.4 Analisis ZHAIL

Produk ZHAIL tanggal 21 Maret 2025 menunjukkan probabilitas terjadinya hujan es pada tahap tumbuh (08.40 UTC), tahap matang (09.10 UTC) dan tahap disipasi (09.30 UTC). Nilai ZHAIL yang terdeteksi pada setiap fase menunjukkan perubahan potensi hujan es yang mengikuti perkembangan sel konvektif. Produk ZHAIL tanggal 21 Maret 2025 ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.7 Produk ZHAIL tanggal 21 Maret 2025

Berdasarkan Gambar 4.6, pada tahap tumbuh pukul 08.40 UTC, belum terdeteksi adanya probabilitas hujan es pada produk ZHAIL. Kondisi ini menunjukkan bahwa sel konvektif masih berada pada fase pertumbuhan

sehingga peluang terbentuknya hujan es masih rendah. Pada tahap matang pukul 09.10 UTC, probabilitas hujan es meningkat secara signifikan hingga mencapai lebih dari 80%. Nilai tersebut merupakan probabilitas tertinggi selama periode pengamatan dan menunjukkan bahwa sel konvektif telah berkembang secara maksimal sehingga peluang terjadinya hujan es menjadi lebih besar. Selanjutnya, pada tahap disipasi pukul 09.30 UTC, probabilitas hujan es tidak lagi terdeteksi pada produk ZHAIL.

4.2 Analisis satelit Himawari-9

Analisis satelit Himawari-9 digunakan untuk menganalisis proses pertumbuhan awan konvektif dan mengidentifikasi kondisi atmosfer yang berpotensi mendukung terbentuknya hujan es.

4.2.1 Time series suhu puncak awan

Tahapan perkembangan awan konvektif dapat diidentifikasi melalui perubahan suhu puncak awan selama periode pengamatan. Suhu puncak awan pada tanggal 21 Maret 2025 mengalami perubahan yang cukup signifikan. Perubahan suhu puncak awan tersebut menggambarkan tahapan perkembangan awan konvektif selama periode kejadian yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hasil suhu puncak awan 21 Maret 2025

Berdasarkan Gambar 3.7, sebelum memasuki tahap tumbuh pukul 08.40 UTC, suhu puncak awan masih berfluktuasi pada kisaran 10°C hingga -20°C . Memasuki tahap tumbuh, suhu puncak awan mulai mengalami penurunan yang cukup cepat. Pada tahap matang pukul 09.10 UTC, suhu puncak awan mencapai sekitar -55°C dan masih terus

menurun setelahnya. Suhu puncak awan tersebut telah melewati ambang suhu puncak awan konvektif menurut Machado dkk. (1998) sebesar -55°C . Memasuki tahap disipasi pukul 09.30 UTC, suhu puncak awan masih berada pada kisaran sekitar -60°C . Suhu tersebut kemudian terus menurun hingga mencapai sekitar -75°C .

4.2.2 Analisis indeks labilitas atmosfer

Nilai LI, SI, KI, TT dan SWEAT pada kejadian hujan es tanggal 21 Maret 2025 mengalami perubahan yang relatif kecil selama tahap tumbuh (08.40 UTC), tahap matang (09.10 UTC) hingga tahap disipasi (09.30 UTC). Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi kestabilan atmosfer selama periode pengamatan cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan. Nilai indeks labilitas atmosfer tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi atmosfer yang mendukung pertumbuhan awan konvektif pada kejadian hujan es. Nilai indeks labilitas atmosfer saat kejadian hujan es di Kabupaten Karanganyar tanggal 21 Maret 2025 ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Indeks labilitas atmosfer 21 Maret 2025 pada tahap tumbuh, matang dan disipasi

Indeks	08.40	09.10	09.30
LI	-3.1°C	-3.1°C	-3.2°C
SI	0.6°C	0.5°C	0.5°C
KI	30.9°C	30.8°C	30.7°C
TT	42.6°C	42.8°C	42.8°C
SWEAT	153	156	156
CAPE	1021 J/kg	965 J/kg	1012 J/kg

Data pada Tabel 1. menunjukkan nilai LI relatif stabil pada kisaran $-3,2$ hingga $-3,1^{\circ}\text{C}$, sedangkan nilai SI sedikit menurun dari $0,6^{\circ}\text{C}$ menjadi $0,5^{\circ}\text{C}$. Nilai KI mengalami sedikit penurunan dari $30,9$ menjadi $30,7$, sementara nilai TT meningkat dari $42,6$ menjadi $42,8$ dan nilai SWEAT meningkat dari 153 menjadi 156 . Berdasarkan kriteria Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2014), nilai LI, SI, KI, TT dan SWEAT tetap berada pada kategori *moderate* selama ketiga tahap pengamatan. Meskipun terjadi sedikit perubahan nilai pada setiap indeks, perubahan tersebut relatif kecil sehingga tidak mengubah kategori masing-masing indeks selama periode pengamatan.

Sementara itu, nilai CAPE pada tahap tumbuh, matang dan disipasi berturut-turut sebesar 1021 J/kg, 965 J/kg, dan 1012 J/kg. Berdasarkan kriteria Wirjohamidjojo dan Swarinoto (2014), nilai CAPE pada tahap tumbuh dan disipasi termasuk dalam kategori *moderate* sedangkan pada tahap matang termasuk dalam kategori *lemah*. Meskipun nilai CAPE pada tahap matang termasuk dalam kategori *lemah*, nilainya kembali berada pada kategori *moderate* pada tahap disipasi. Perubahan tersebut relatif kecil dan menunjukkan bahwa kondisi energi konvektif atmosfer cenderung stabil selama periode pengamatan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis radar cuaca dan satelit Himawari-9 terhadap kejadian hujan es di Kabupaten Karanganyar pada 21 Maret 2025, teridentifikasi bahwa hujan es dipicu oleh pertumbuhan awan cumulonimbus yang berkembang secara cepat hingga mencapai fase matang pada pukul 09.10 UTC. Produk radar CMAX menunjukkan nilai reflektivitas maksimum mencapai 65 dBZ, melebihi ambang batas indikasi hujan es (>55 dBZ). Analisis VCUT memperlihatkan keberadaan struktur *Overhang Echo* (OE) dan *Three Body Scatter Spike* (TBSS) yang menunjukkan adanya *updraft* kuat dan partikel es berukuran besar di dalam awan. Selain itu, nilai VIL mencapai sekitar 55 kg/m^2 dan probabilitas hujan es pada produk ZHAIL melebihi 80%, yang semakin memperkuat indikasi terjadinya hujan es pada fase matang awan.

Analisis satelit Himawari-9 menunjukkan bahwa suhu puncak awan terus menurun seiring perkembangan awan konvektif hingga mencapai sekitar -55°C pada fase matang dan mencapai sekitar -75°C pada fase disipasi. Nilai tersebut mengindikasikan terbentuknya awan konvektif yang tinggi dan tebal. Sementara itu, indeks labilitas atmosfer seperti LI, SI, KI, TT, SWEAT dan CAPE menunjukkan kondisi atmosfer yang cukup labil dan mendukung pertumbuhan konveksi selama periode pengamatan. Dengan demikian, kombinasi parameter radar cuaca dan satelit Himawari-9 terbukti efektif dalam mengidentifikasi karakteristik awan cumulonimbus penyebab hujan es serta dapat dimanfaatkan sebagai dasar pemantauan dan

peringatan dini kejadian cuaca ekstrem di wilayah Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Antarissubhi, R. Serang, J. Leda, G. L. Salamena, G. E., Pagoray, S. Gusty, and A. & Safar, *Krisis Iklim Global di Indonesia (Dampak dan Tantangan)*. Tohar Media, 2023.
- [2] BMKG, *Peraturan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Nomor 9 Tahun 2022 tentang Penyediaan dan Penyebarluasan Peringatan Dini Cuaca Ekstrem*. Jakarta: BMKG, 2022.
- [3] F. K. Lutgens, E. J. Tarbuck, and R. L. Herman, *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology (Fourteenth Edition)*, Fourteenth. Pearson, 2018.
- [4] H. R. Pruppacher and J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation (Second revised and expanded edition with an introduction to cloud chemistry and cloud electricity)*, vol. 284, no. 5751. Springer, 2010. doi: 10.1038/284088b0.
- [5] R. M. Putra and N. A. Rani, *Sekilas Radar Cuaca Dilengkapi Pengolahan Data Radar Cuaca*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2019.
- [6] S. Prasetyo, S. Abdillah, I. R. Nugraheni, and N. Sagita, "Studi Awan Konvektif Penyebab Hujan Es Menggunakan Radar Cuaca Doppler Single Polarization di Bogor (23 September 2020)," *J. Apl. Meteorol.*, vol. 1, no. 1, pp. 32–42, 2022, [Online]. Available: <https://stmkg.balai2bmkg.id/index.php/jam/article/view/17%0A>
- [7] B. Mason, *The Physics of Clouds*. Oxford University Press, 1971.
- [8] E. Diniyati, D. Q. Syofyan, and A. Mulya, "Analisis Hujan Es di Kabupaten Ngawi Berdasarkan Citra Satelit Himawari-8 dan Data Reanalisis Copernicus ECMWF," *J. Geogr. Media Inf. Pengemb. dan Profesi Kegeografian*, vol. 18, no. 2, pp. 69–75, 2021, doi: 10.15294/jg.v18i2.28010.
- [9] C. D. Ahrens and R. Henson, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment (Edition 12)*. Boston: Cengage Learning, 2018.
- [10] D. Sucahyono and K. Ribudiyanto, *Cuaca dan iklim ekstrim di Indonesia*. Penerbit Puslitbang, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2013.
- [11] R. E. Rinehart, *Radar for Meteorologists or You, too, can be a Radar Meteorologist Part III (Second Edition)*. Center for Aerospace Sciences University of North Dakota, 1991.
- [12] Leonardo, *Gematronik Weather Radar Systems*. Germany: Software Manual Rainbow 5, 2018. [Online]. Available: www.de.selex-es.com
- [13] K. Bessho *et al.*, "An introduction to Himawari-8/9 — Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites," *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. 94, no. 2, pp. 151–183, 2016, doi: 10.2151/jmsj.2016-009.
- [14] B. Tjasyono, *Klimatologi Edisi Kedua*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2004.
- [15] R. Stull, *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*. 2017.
- [16] V. B. R. Dodla, *Numerical Weather Prediction*. Routledge. Routledge, 2023.
- [17] H. Christianto, A. C. Lalang, and J. B. Selly, *Metodologi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif*. Bandung: Media Sains Indonesia, 2022.
- [18] J. . Gamache and R. A. Houze, "Mesoscale Air Motions Associated with a Tropical Squall Line," *Dep. Atmos. Sci. Univ. Washington, Seattle*, 1981.
- [19] D. H. Kitzmiller, W. E. McGovern, and S. R. E, "The WSR-88D Severe Weather Potential Algorithm," *Weather Forecast.*, vol. 10, no. 1, pp. 141–159, 1995.
- [20] L. A. T. Machado, W. B. Rossow, R. L. Guedes, and A. W. Walker, "Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas," *Mon. Weather Rev.*, vol. 126, pp. 1630–1654, 1998.
- [21] S. Wirjohamidjojo and Y. S. Swarinoto, *Indeks dan Peredaran Atmosfer Tropik*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2014.