

Identifikasi penyebab awan konvektif pada fenomena hujan ekstrem disertai es berbasis citra radar dual polar

Rayhan Rafi¹, Dwi Kuncoro¹, Bima Arzhida¹, Noor Jannah Indriyani², dan Warjono³

¹Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

²Stasiun Meteorologi Kelas II Ahmad Yani Semarang, Indonesia

³Stasiun Meteorologi Kelas II Yogyakarta, Indonesia

Email: rayhan.rafi26@gmail.com

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika atmosfer yang mendasari pembentukan awan konvektif penghasil hujan es dengan pendekatan multi-instrumentasi. Metode yang digunakan meliputi analisis peta streamline, data sinoptik Stasiun Klimatologi Yogyakarta, citra satelit Himawari-9 HCAI, serta data radar dual-polar dari Stasiun Meteorologi Ahmad Yani. Hasil analisis menunjukkan konvergensi angin lokal dan penurunan tekanan udara yang signifikan, yang memicu pembentukan awan Cumulonimbus yang cepat dan intensif. Produk radar, seperti CMAX dan HAILSZ, mengindikasikan reflektivitas tinggi dan partikel es besar di dalam awan. Ukuran hail diperkirakan 10–20 mm dengan probabilitas lebih dari 80%. Validasi hujan menunjukkan akumulasi tertinggi 74 mm/hari di Kecamatan Minggir, Sleman. Studi ini menegaskan pentingnya integrasi data satelit, radar, dan pengamatan permukaan untuk mendeteksi cuaca ekstrem.

Kata Kunci: *awan cumolonimbus, cuaca ekstrem, hujan es, radar cuaca, Himawari*

Identification of the causes of convective clouds in extreme rainfall events with hail based on dual-polar radar imagery

Abstract: This study aims to analyze the atmospheric dynamics behind the formation of convective clouds that produce hail through a multi-instrumental approach. The methods used include streamline map analysis, synoptic data from the Yogyakarta Climatology Station, Himawari-9 HCAI satellite imagery, and dual-polar radar data from the Ahmad Yani Meteorological Station. The results reveal local wind convergence and significant air pressure drop, triggering rapid and intensive formation of Cumulonimbus clouds. Radar products, such as CMAX and HAILSZ, indicate high reflectivity and the presence of large hail particles within the clouds. Hail size is estimated to range from 10–20 mm with a probability of more than 80%. Rain validation shows the highest accumulation of 74 mm/day in Minggir District, Sleman. This study emphasizes the importance of integrating satellite, radar, and surface observation data for detecting extreme weather in tropical regions.

Keywords: *hail, extreme weather, cumulonimbus cloud, weather radar, Himawari*

How to Cite (APA 7th Style): Rafi, R., Kuncoro, D., Arzhida, B., Indriyani, N. J., & Warjono. (2025). Identifikasi penyebab awan konvektif pada fenomena hujan ekstrem disertai es berbasis citra radar dual polar. *Jurnal Penelitian Saintek*, 30(2), 58-73. <https://doi.org/10.21831/jps.v30i2.89950>

PENDAHULUAN

Pada 11 Maret 2025, wilayah Yogyakarta mengalami hujan deras yang disertai angin kencang, kilat, dan fenomena hujan es. Berdasarkan data Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) DIY, hujan es terjadi di beberapa titik seperti di Kabupaten Sleman, Kabupaten Bantul, dan Kota Yogyakarta. Fenomena ini menimbulkan berbagai dampak kerugian, diantaranya pohon tumbang, kerusakan rumah warga, gangguan akses jalan, kerusakan fasilitas umum, hingga longsor talud (BPBD DIY, 2025).



Gambar 1. Dampak kerusakan akibat hujan deras pukul 15.52 WIB
Sumber: BPBD DIY

Sebagai negara tropis, Indonesia mendapatkan energi matahari yang tinggi sepanjang tahun. Kondisi ini mendorong terbentuknya awan-awan konvektif, khususnya awan Cumulonimbus, yang berpotensi menimbulkan cuaca ekstrem (Prasetyo dkk., 2022). Awan Cumulonimbus berkembang secara masif dalam atmosfer yang tidak stabil, menghasilkan hujan lebat dan fenomena atmosfer lain seperti kilat, angin kencang, bahkan hujan es (Ratnam dkk., 2013). Awan konvektif disebabkan oleh pola sirkulasi global dimana Naiknya udara hangat dan lembab dari permukaan akibat pemanasan matahari memicu pembentukan awan konvektif besar yang dapat menghasilkan hujan lebat. Lebih jauh lagi, Proses konvektif ini juga memainkan peran penting dalam memindahkan panas dan uap air dari lintang rendah ke lintang lebih tinggi melalui sirkulasi atmosfer berskala besar (Stephens dkk., 2024). Hal ini menjadi salah satu pengaruh Indonesia mendapatkan curah hujan tertinggi dan memungkinkan memberikan dampak hujan es.

Hujan es sendiri merupakan fenomena yang terbentuk akibat aliran arus naik yang cepat (*updraft*) dan membawa kandungan air super dingin yang dapat membeku di aliran awan dalam waktu singkat (Zhang dkk., 2024). Proses ini diawali dengan massa udara (*updraft*) yang kuat dengan membawa partikel hidrometeor pada lapisan melting layer awan cumulonimbus bersel tunggal (*single cell*) atau ganda (*multi cell*), kemudian terbentuknya inti es tumbuh saat aliran super dingin membeku. Jika aliran *updraft* terbentuk dalam waktu lama, maka ukuran es pada *hail* akan semakin besar (Haryadi, 2024). Terjadinya hujan es juga dipengaruhi oleh *freezing level* yang merupakan lapisan bersuhu 0°C sehingga tetes air dapat membeku (Paski dkk., 2017). Posisi Indonesia yang berdekatan dengan lintang 0° mempengaruhi tinggi *freezing level* di Indonesia

termasuk dalam lapisan yang lebih tinggi dibanding luar wilayah iklim tropis dengan tingkatan *freezing level* lebih rendah (Sulistiyono dkk., 2024). Adapun *freezing level* di Indonesia berkisar 16.000 feet di atas permukaan laut (Ardiansyah, 2022).

Menurut Maulana & Kristianto (2024), proses hujan es terbentuk ketika udara mengalami kejemuhan uap air yang kemudian memicu pembentukan awan melalui proses kondensasi. Pertumbuhan massa kristal es dikendalikan oleh proses deposisi heterogen di atmosfer, terutama ketika kristal es berkumpul di dalam awan dan mengalami tumbukan serta bergabung dengan kristal lainnya. Proses deposisi heterogen ini dapat berlangsung apabila terdapat inti kondensasi di dalam awan, yang membantu kristal es menempel satu sama lain saat bertumbukan dan bergabung. Akumulasi proses tersebut menyebabkan peningkatan massa dan ukuran partikel es sehingga terbentuklah butiran es padat yang dikenal sebagai hujan es (*hail stone*). Ketika groupel es ini jatuh ke permukaan, mereka mengalami minim gesekan sehingga groupel es yang turun tidak sepenuhnya mencair. Hal ini mengakibatkan terjadinya hujan es.



Gambar 2. Bentuk Hujan Es yang Melanda Yogyakarta (Kabupaten Sleman) pukul 15.20 WIB
sumber : Anisa Kristanti (masyarakat setempat)

Meskipun jarang terjadi, fenomena hujan es di Indonesia telah tercatat dalam beberapa kejadian signifikan. Studi oleh Maulidiani dkk. (2023) menganalisis kejadian hujan es di Kabupaten Timor Tengah Selatan pada 26 November 2023, yang menunjukkan bahwa kondisi atmosfer yang tidak stabil seperti penurunan suhu permukaan yang signifikan, kelembaban tinggi, serta penurunan tekanan atmosfer sebelum kejadian. Semua parameter tersebut berkontribusi pada pembentukan awan konvektif yang menghasilkan hujan es. Analisis citra satelit Himawari-9 menunjukkan suhu puncak awan Cumulonimbus yang sangat rendah (-75,8°C), mengindikasikan adanya pertumbuhan awan vertikal yang intens. Demikian juga penelitian oleh Frystine dkk. (2022) mengenai kejadian hujan es di Pelalawan pada 23 September 2019, menemukan bahwa awan Cumulonimbus sel tunggal berkembang dalam waktu 30 menit dengan reflektivitas maksimum 65 dBZ dan suhu puncak awan mencapai -75°C. Selanjutnya, Nugroho dan Fadlan (2018) menganalisis kejadian hujan es di Magelang pada 24 Januari 2018, yang juga menunjukkan anomali penurunan suhu permukaan hingga 7,8°C serta keberadaan awan putih tebal dengan suhu puncak awan sebesar -77,5°C berdasarkan citra satelit Himawari-8. Ketiga studi ini menekankan pentingnya pemantauan kondisi atmosfer secara *real-time* dan pemanfaatan citra satelit untuk deteksi dini fenomena hujan es di wilayah tropis.³

Dalam menganalisis fenomena cuaca ekstrem seperti hujan es, penggunaan teknologi penginderaan jauh sebagai instrumen pendukung untuk mengidentifikasinya karena tidak perlu

kontak fisik secara langsung dan bisa dilakukan secara jarak jauh (Elachi, C., & Van Zyl, J. J, 2021). Menurut (Peng dkk., 2024) penginderaan jauh dapat terbagi menjadi satelit, lidar, dan radar. Instrumen seperti satelit dapat memberikan informasi cuaca secara global dan spasial dengan jarak ribuan kilometer. Sedangkan radar memiliki performa yang baik dengan jangkauan ratusan kilometer, namun kinerjanya akan menurun seiring dengan semburan energi *pulse* yang semakin jauh. Integrasi instrumen penginderaan jauh seperti satelit dan radar dapat memberikan hasil desiminasi informasi yang baik untuk memberikan keputusan dan kebijakan (Surendran dkk., 2024).

Radar cuaca doppler atau *Doppler Weather Radar* (DWR) merupakan salah satu instrumen penginderaan jauh yang digunakan untuk memperoleh reflektivitas objek di atmosfer. Menurut Prasetyo dkk. (2022), DWR sangat sesuai untuk mendeteksi reflektivitas awan karena memiliki kemampuan pengamatan luas secara *real time* dengan resolusi spasial dan temporal yang baik. Prinsip kerja radar adalah memancarkan energi gelombang (*beam*) dengan ketentuan azimuth dan elevasi tertentu, kemudian menerima pantulan dari objek atmosfer yang ditampilkan dalam bentuk produk reflektivitas dengan satuan dBZ (*decibel*). Radar cuaca berperan penting sebagai instrumen penginderaan jauh yang dapat memberikan prakiraan kondisi *real time* serta peringatan dini terhadap potensi cuaca ekstrem atau bencana hidrometeorologi (Paski dkk., 2017).

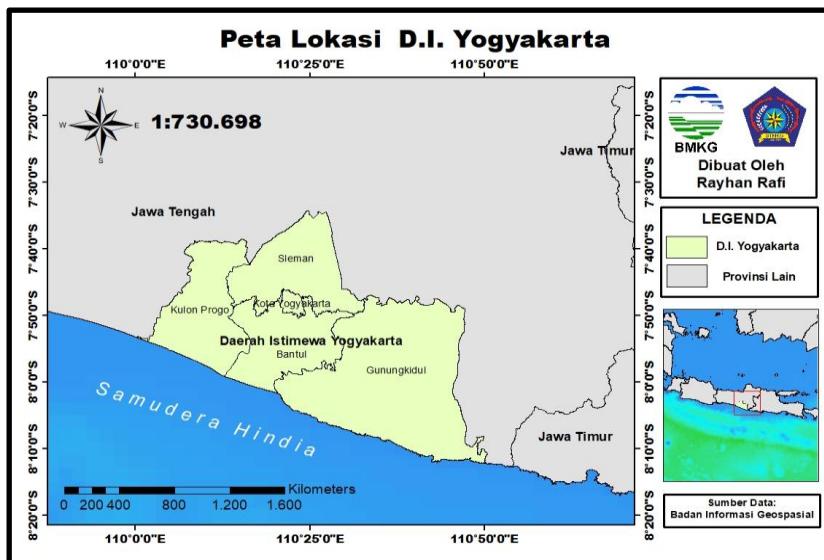
Menurut Singh dkk. (2021), DWR menghasilkan tiga produk utama, yaitu *Radar Reflectivity* (Z), *Radial Velocity* (V), dan *Spectrum Width* (W). Produk *Radar Reflectivity* menggambarkan gema yang dipantulkan kembali ke radar oleh hidrometeor dan berbanding lurus dengan pangkat enam diameter tetesan hujan. Produk *Radial Velocity* merupakan turunan dari data kecepatan radial yang memberikan informasi mengenai arah gerakan sistem, komponen horizontal kecepatan angin, serta keberadaan *wind shear*. Sementara itu, *Spectrum Width* menggambarkan seberapa besar dispersi kecepatan dalam volume sampel radar yang berbanding lurus dengan variasi kecepatan dan arah angin di dalam volume tersebut. Parameter ini menjadi indikator variabilitas kecepatan dalam sistem cuaca yang diamati.

Penelitian terkait pemanfaatan radar dalam pengamatan hujan es di Indonesia telah berkembang dalam satu dekade terakhir. Paski dkk. (2017) menggunakan analisis parameter sinoptik sebelum kejadian hujan es serta mengombinasikannya dengan produk *RGB Day Microphysics* pada satelit Himawari, dan produk *Composite Maximum Reflectivity* (CMAX) serta *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) pada radar *single polar* untuk membantu analisis. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya reflektivitas tinggi pada awan Cumulonimbus penyebab hujan es. Sementara itu, Prasetyo dkk. (2022) melakukan analisis kejadian hujan es dengan meninjau kondisi atmosfer menggunakan data sinoptik dan radiosonde, serta mengamati pertumbuhan fisis awan melalui produk *radar single polar* berupa *Vertical Cross Section of Reflectivity* (VCUT) untuk visualisasi vertikal awan. Produk *Vertically Integrated Liquid* (VIL), *VIL Density*, dan metode *Waldvogel* digunakan untuk memperkirakan probabilitas hujan es. Hasil analisis menunjukkan adanya proses *updraft* kuat dan kemunculan fenomena *Three Body Scatter Spike* (TBSS) yang menjadi indikator potensi hujan es dengan probabilitas lebih dari 80%.

Penelitian ini ditulis dengan tujuan untuk menganalisis kondisi atmosfer, terkhusus kondisi awan penyebab hujan es yang terjadi di Yogyakarta melalui beberapa tahap seperti menganalisis kondisi pengamatan sinoptik sebelum kejadian hujan es, analisis kondisi regional berupa peta streamline, validasi kondisi fenomena hujan es dengan penakar hujan di beberapa titik dan kondisi awan secara objektif melalui satelit, serta penggunaan radar cuaca untuk mengetahui struktur fisis pembentuk awan konvektif.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Daerah Istimewa Yogyakarta yang terdampak cuaca ekstrem pada tanggal 11 Maret 2025. Menurut data BPBD D.I. Yogyakarta mendapatkan dampak cuaca ekstrem yang cukup signifikan di mana terdapat 78 titik terdampak di Kabupaten Sleman, 8 titik di Kota Yogyakarta, dan 19 titik di Kabupaten Bantul. Mayoritas titik terdampak terbesar berada di Kabupaten Sleman dengan cakupan wilayah berada di 8 kecamatan: Depok, Gamping, Godean, Mlati, Ngaglik, Seyegan, Sleman dan Tempel.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian

Secara umum, penelitian ini dibagi menjadi 5 tahap. Tahap pertama adalah analisis peta streamline atau sebaran arah angin yang merupakan pengamatan meteorologi skala regional. Data pemetaan *streamline* ini diambil melalui data arsip Stasiun Meteorologi Kelas II A.Yani Semarang. Analisis peta *streamline* digunakan untuk mengetahui kemana arah angin yang membawa objek atmosfer (awan), terutama di Yogyakarta.

Tahap kedua adalah mengumpulkan data level 1 di Stasiun Klimatologi Yogyakarta yang memuat pengamatan sinoptik berupa nilai suhu (celcius), tekanan (milibar), kelembaban udara (%), arah, dan kecepatan angin (knot) yang diambil setiap jam nya mulai pukul 00.00 UTC sampai 08.00 UTC. Pengambilan data sinoptik ini digunakan untuk meninjau dan menilai apakah parameter pengamatan sinoptik mempengaruhi pertumbuhan konvektivitas awan.

Tahap ketiga adalah melakukan pengambilan gambar terhadap salah satu produk dari satelit Himawari-9, yaitu Himawari Convective Analysis Imagery (HCAI). HCAI Dibuat dengan algoritma yang menggabungkan data multi-channel (Infrared, Visibility, dan water vapor) untuk identifikasi objektif *deep convection* (Bessho dkk., 2016). Produk ini diambil dengan cara membuka software FTP Filezilla dengan username dan password khusus, lalu dapat mencari folder HCAI yang sudah dalam bentuk *image*. Citra HCAI akan memberi informasi mengenai keadaan objek atmosfer yang sebenarnya terjadi melalui penginderaan jauh (Satelit Himawari).

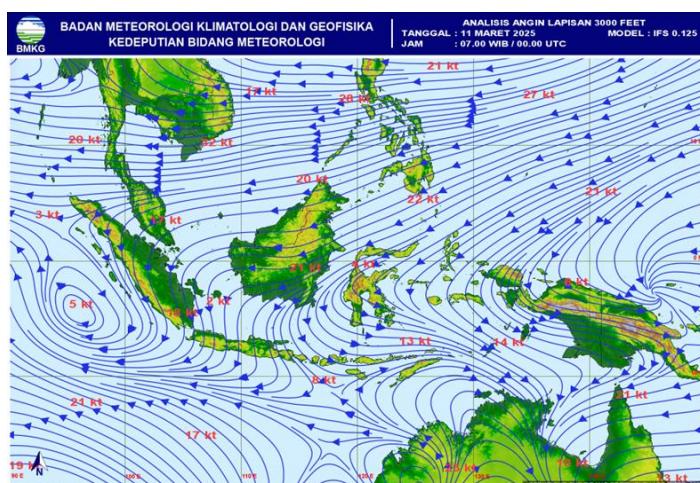
Tahap keempat adalah pengolahan data radar melalui Software RainDART yang terintegrasi dengan radar Gematronik. Sumber data ini diambil melalui data radar dengan format .vol dari radar cuaca dual polar tipe C-Band Stasiun Meteorologi Kelas II Ahmad Yani Semarang. Pada pengolahan data Radar ini digunakan beberapa produk, yaitu produk CMAX untuk melihat

reflektivitas tertinggi sebuah objek dalam atmosfer (awan), VCUT untuk melihat pola fisis awan secara vertikal, HAILSZ untuk estimasi ukuran hail, ZHAIL untuk melihat potensi terjadinya hujan es, dan SWI untuk melihat pola adanya awan konvektif penyebab badai atau *Storm Structure Analysis* (SSA).

Tahap kelima adalah meninjau sebaran hujan 24 jam yang diambil dari Stasiun Klimatologi Yogyakarta. Data hujan ini kemudian diolah menggunakan *excel* dan bantuan *google earth engine* untuk mengetahui pemetaan spasial terhadap lokasi hujan. Pada data hujan ini akan dibatasi dengan beberapa titik dari lokasi terdampak seperti di Sleman dan Kota Yogyakarta. Data ini akan memberikan pemahaman terkait validasi atas hujan yang terjadi akibat awan konvektif

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Angin Gradien (*Streamline*)



Gambar 4. Angin Gradien 00.00 UTC (Sumber: web-meteo.bmkg.go.id)

Gambar 4 menunjukkan peta streamline angin pada lapisan 3000 *feet* berdasarkan keluaran model IFS BMKG pada 11 Maret 2025 pukul 00.00 UTC. Terpantau adanya zona belokan dan konvergensi angin di sekitar wilayah selatan Jawa dan perairan selatan Nusa Tenggara, yang mengindikasikan adanya penumpukan massa udara dan potensi peningkatan pembentukan awan konvektif. Di sekitar Pulau Jawa, termasuk wilayah D.I. Yogyakarta, pola streamline menunjukkan adanya gangguan lokal berupa konvergensi lemah, yang dapat berperan dalam memicu proses konveksi skala lokal, apalagi bila didukung oleh faktor-faktor permukaan seperti pemanasan daratan yang cukup intens pada siang hari.

Tidak teridentifikasi adanya sistem tekanan rendah yang signifikan di wilayah Indonesia pada lapisan ini. Meski begitu, angin dari belahan bumi utara (timur laut) juga terlihat masih aktif di bagian utara Indonesia, yang merupakan bagian dari sirkulasi angin Monsun Asia yang mulai melemah. Pertemuan angin dari dua arah berbeda di sekitar wilayah khatulistiwa dapat mengindikasikan terbentuknya *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ), meskipun dalam analisis ini posisinya cenderung berada lebih ke utara dari wilayah Jawa.

Dengan memperhatikan kondisi streamline di lapisan 3000 *feet*, dapat disimpulkan bahwa wilayah D.I. Yogyakarta pada saat itu berada dalam pengaruh aliran angin monsun timuran, yang meskipun umumnya bersifat kering, dapat tetap berkontribusi terhadap pembentukan awan dan hujan bila terjadi konvergensi lokal, seperti yang tampak dalam pola angin dan sejalan dengan

curah hujan cukup tinggi yang tercatat di wilayah tersebut. Kondisi ini juga dapat dikaitkan dengan periode transisi antar musim, yaitu dari musim hujan menuju musim kemarau, yang ditandai dengan fluktuasi pola angin dan potensi hujan lokal akibat pemanasan permukaan dan gangguan dinamika atmosfer skala meso.

Analisis Kondisi Sinoptik

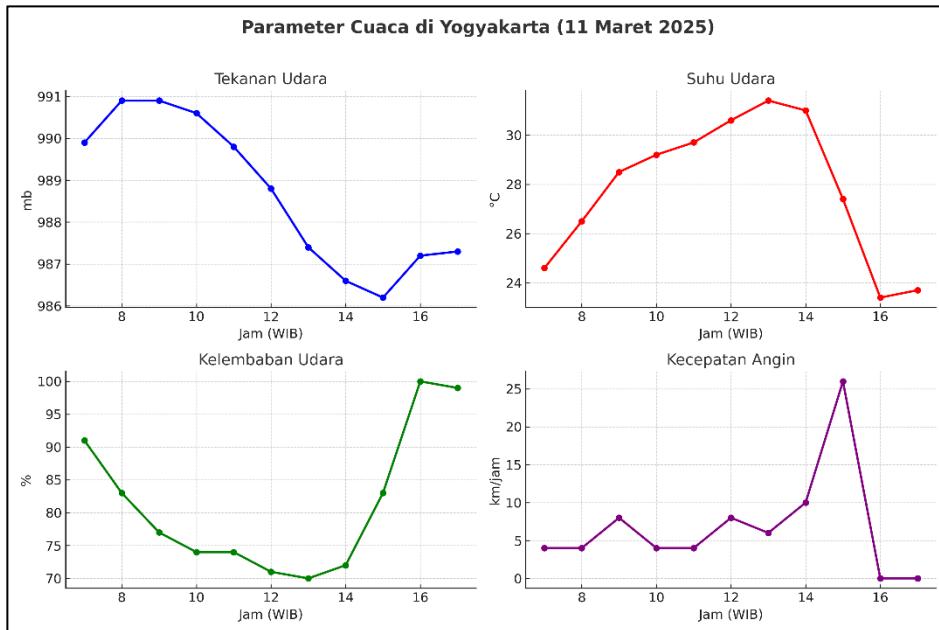
Tabel 1. *Data Sinoptik (pengamatan cuaca) di Stasiun Klimatologi Kelas IV D.I Yogyakarta tanggal 11 Maret 2025 (dalam WIB)*

Jam (WIB)	Tekanan Udara (mb)	Suhu Udara (°C)	Kelembaban Udara (%)	Arah Angin (berasal dari)	Kecepatan Angin (km/jam)
07.00	989,9	24,6	91	Tenggara	4
08.00	990,9	26,5	83	Tenggara	4
09.00	990,9	28,5	77	Tenggara	8
10.00	990,6	29,2	74	Barat	4
11.00	989,8	29,7	74	Utara	4
12.00	988,8	30,6	71	Barat Daya	8
13.00	987,4	31,4	70	Timur	6
14.00	986,6	31,0	72	Timur	10
15.00	986,2	27,4	83	Timur	26
16.00	987,2	23,4	100	Utara	CALM
17.00	987,3	23,7	99	Utara	CALM

Tabel 1 menyajikan hasil pengamatan sinoptik harian di Stasiun Klimatologi Kelas IV DIY pada 11 Maret 2025, yang memperlihatkan kondisi dinamika atmosfer aktif, terutama menjelang sore hari. Dimulai dari tekanan udara yang mengalami penurunan secara bertahap dari pagi hingga sore hari, yang mana hal tersebut merupakan indikasi keberadaan sistem tekanan rendah di sekitar wilayah pengamatan (Yang, H, et al, 2025). Setelah mencapai titik terendah, tekanan kembali meningkat menjelang petang, menandakan melemahnya sistem tersebut pasca terjadinya hujan atau aktivitas konvektif. Di sisi lain, suhu udara mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum pada tengah hari, lalu menurun tajam pada sore hingga petang. Penurunan ini mengindikasikan adanya pembentukan awan konvektif tebal yang membatas radiasi matahari dengan disertai efek pendinginan setelah turunnya hujan (Arya, 2001). Sementara itu, kelembaban udara cenderung menurun pada siang hari akibat pemanasan dan penguapan, namun kembali meningkat signifikan pada sore hari, bahkan mencapai titik jenuh (100%) pada pukul 16.00 WIB. Lonjakan kelembaban ini merupakan sinyal kuat terbentuknya awan-awan konvektif yang matang.

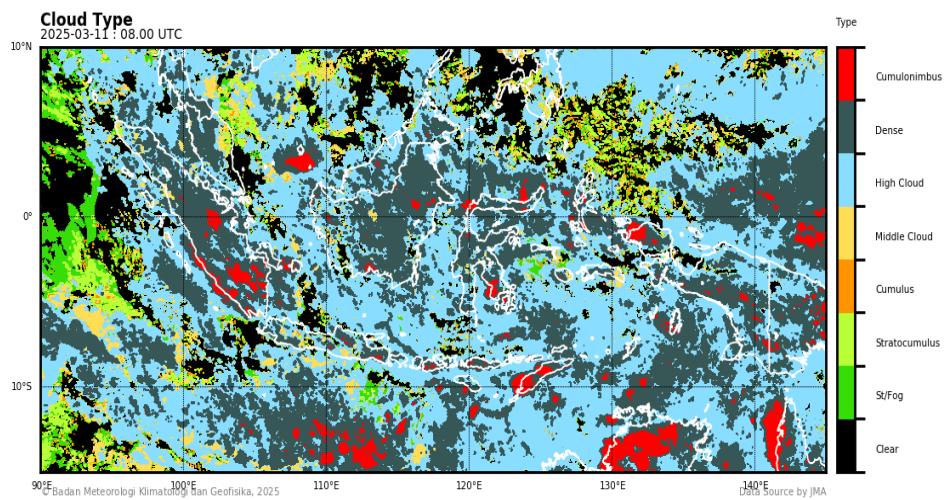
Selanjutnya, arah angin juga menunjukkan perubahan mencolok, dari tenggara di pagi hari, kemudian bergeser menjadi barat dan timur pada siang hari, lalu menjadi utara setelah sore. Variasi ini menunjukkan adanya sirkulasi angin lokal dan perubahan pola angin karena aktivitas konvektif di wilayah sekitar (Liu, W et al, 2022). Kecepatan angin juga mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai puncaknya pada sore hari (26 km/jam) pada pukul 15.00 WIB, yang mengindikasikan efek dari arus turun (*downdraft*) awan Cumulonimbus. Semakin sore, kecepatan angin melemah drastis hingga kondisi tenang, menandakan bahwa sistem konvektif telah

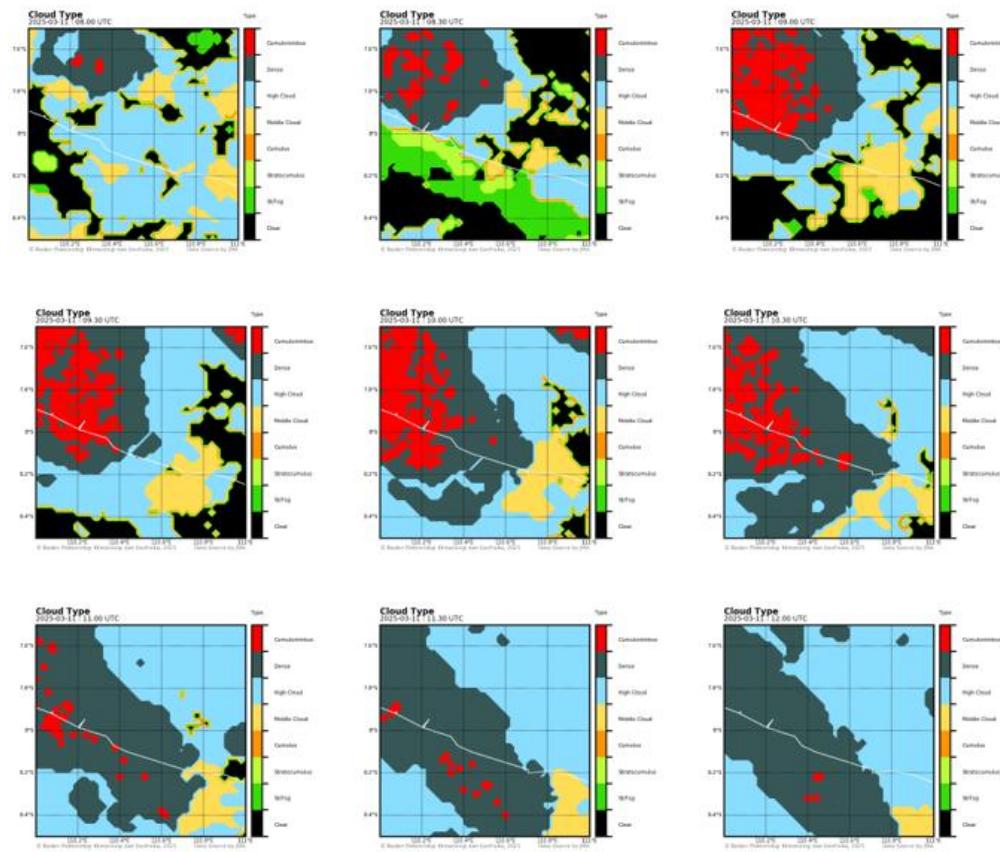
melemah atau menghilang. Secara keseluruhan, pola parameter sinoptik menunjukkan kondisi atmosfer yang labil dan mendukung terbentuknya awan konvektif kuat. Penurunan tekanan udara, peningkatan suhu di siang hari, lonjakan kelembaban di sore hari, serta perubahan arah dan kecepatan angin merupakan indikasi adanya proses konvergensi dan pemanasan permukaan yang intens. Kombinasi faktor-faktor ini menciptakan kondisi yang ideal untuk pertumbuhan awan Cumulonimbus, yang tidak hanya berpotensi menghasilkan hujan lebat, tetapi juga fenomena cuaca ekstrem seperti hujan es. Visualisasi grafik data cuaca sinoptik disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Visualisasi Grafik Data Cuaca Sinoptik (dalam WIB)

Analisis Citra High-Resolution Cloud Analysis Information (HCAI) Satelit Himawari



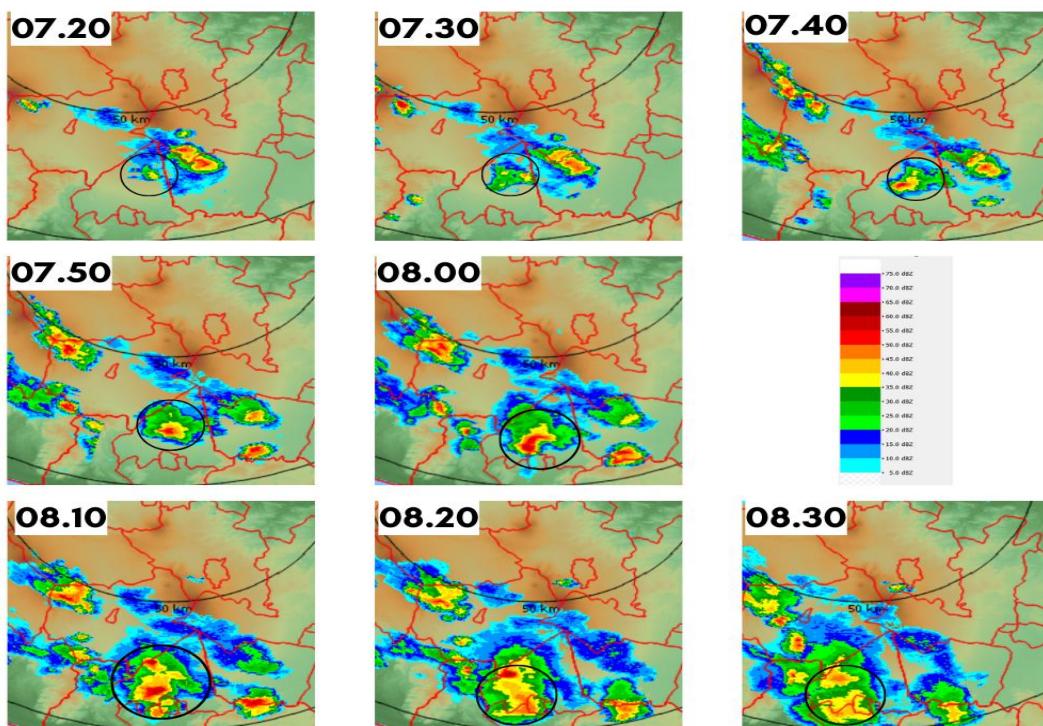


Gambar 6. Citra Satelit Himawari-9produk *High-resolution Cloud Analysis Information* (HCAI)

Berdasarkan Gambar 6, citra produk High-resolution Cloud Analysis Information (HCAI) menunjukkan bahwa perkembangan awan konvektif dimulai pada pukul 08.00 UTC di mayoritas wilayah Sleman dan Kota Yogyakarta. Pada waktu tersebut, awan cumulonimbus mulai terbentuk dan berkembang pesat, mencakup hampir seluruh wilayah Yogyakarta. Seiring berjalananya waktu, awan cumulonimbus tersebut semakin membesar dan menyebar ke arah wilayah lainnya, mengindikasikan potensi hujan yang cukup signifikan di daerah tersebut. Pada pukul 12.00 UTC, awan cumulonimbus mulai mengalami peluruhan, meninggalkan awan tebal yang masih dapat terlihat di langit.

Perkembangan awan ini menunjukkan adanya proses konveksi yang cukup kuat, yang dapat memicu fenomena cuaca ekstrem seperti hujan lebat dan hujan es. Data HCAI ini, dengan resolusi tinggi, memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kondisi atmosfer, sehingga dapat dijadikan salah satu alat validasi yang sangat berguna dalam mendeteksi potensi pembentukan awan cumulonimbus di daerah tropis. Integrasi data HCAI dengan pengamatan lain, seperti data radar dan pengamatan permukaan, dapat meningkatkan akurasi dalam memprediksi cuaca ekstrem yang dapat terjadi pada wilayah tersebut.

Analisis Citra Radar Dual Polar



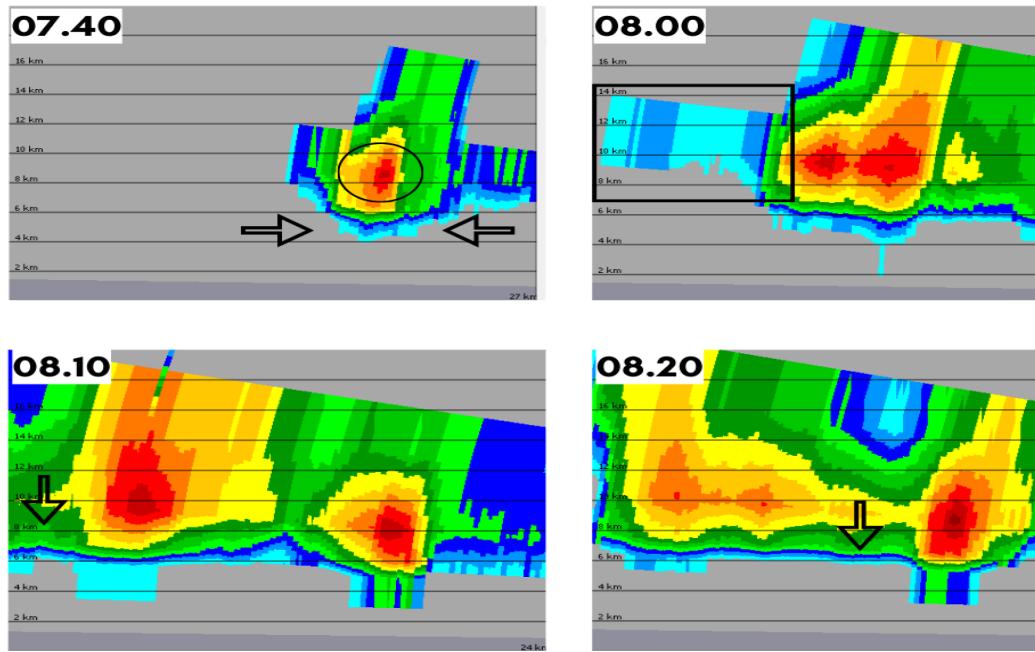
Gambar 7. Citra Radar Produk CMAX

Berdasarkan gambar 7. produk CMAX dapat melihat perkembangan dan pergerakan dari echo. Seperti pada gambar di atas dapat dianalisis bahwa menurut interpretasi radar cuaca Semarang, terlihat pergerakan awan menuju ke arah selatan hingga barat daya. Tahapan pertumbuhan awan (cumulus stage) dimulai ketika adanya arus pengangkatan massa udara hangat ke atas (konvektif) yang cukup kuat atau biasa disebut updraft. Tahapan pertumbuhan awan dimulai pada pukul 07.40 UTC yang ditandai proses updraft dengan adanya pola WER dan OR. Proses pertumbuhan awan ini berlangsung selama kurang lebih 40 menit untuk mencapai fase matang pada pukul 08.00 UTC.

Reflektivitas berubah dengan nilai yang cukup signifikan dari 42,50 DBz pada pukul 07.30 UTC menjadi 57 DBz pada pukul 07.40 UTC dan bertahan hingga mencapai puncaknya pada tahap matang. Perubahan nilai yang signifikan ini menunjukkan adanya pertumbuhan awan yang cukup pesat. Tahap matang ditunjukkan pada pukul 08.00 UTC dengan nilai reflektivitas sebesar 60 DBz. Pada pukul 08.10 UTC, tahapan awan yang matang ini masih bertahan namun telah mengalami sedikit peluruhan, sehingga pada waktu tersebut terdapat dua sel awan yang terpisah dengan pergerakan yang berbeda, dimana nilai reflektivitas yang muncul relatif masih tinggi yang berada pada nilai 59,5 DBz pada awan yang menuju arah barat laut dan 58,5 DBz pada awan yang menuju selatan.

Tahapan peluruhan atau downdraft antara kedua sel awan mulai terlihat pada pukul 08.20 UTC dan mengalami peluruhan sepenuhnya pada pukul 08.30 UTC. Fase peluruhan pada kondisi hujan es biasanya ditandai dengan luruhnya inti dari awan dengan reflektivitas tinggi dibawah 2 km, namun pada gambar penampang vertikal (VCUT) terlihat bahwa radar memiliki limitasi ground clutter yang berpengaruh pada rambatan echo dan pada scanning elevasi radar. Sehingga diasumsikan bahwa peluruhan pada kasus ini didapatkan dengan melihat reflektivitas yang

semakin berkurang dan juga echo yang semakin menyebar.



Gambar 8.Citra Radar Produk VCUT

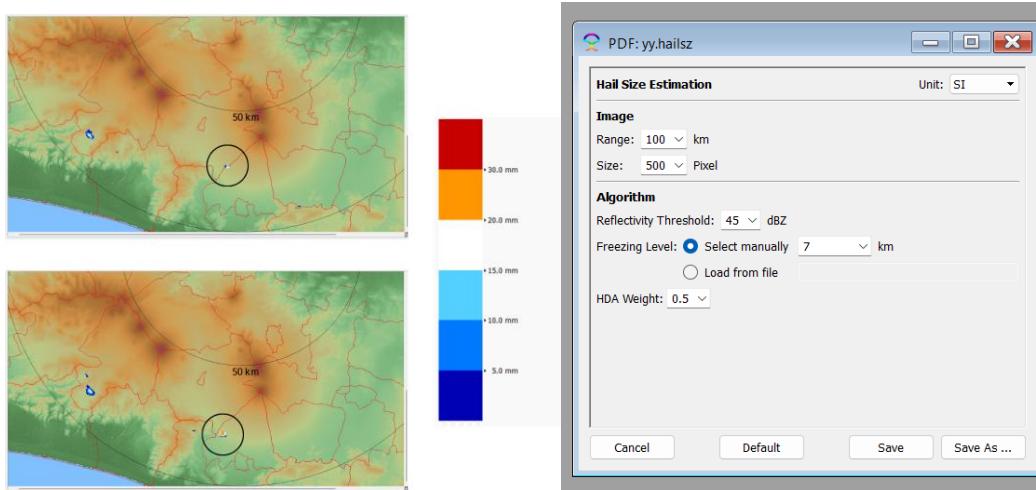
Gambar 8. penampang irisan dari produk VCUT digunakan untuk melihat bagaimana proses awan terbentuk. Tahapan pertumbuhan awan dimulai pada pukul 07.40 UTC yang ditandai proses *updraft* dengan adanya pola WER dan OR pada gambar tersebut. Pola *weak echo region* (WER) adalah area reflektivitas rendah yang berada dibawah dari area yang memiliki nilai reflektivitas tinggi dan ini merupakan arus masuk (*inflow*) yang terbentuk karena adanya proses *updraft*. Sedangkan pola *overhang echo* (OR) merupakan daerah yang memiliki nilai reflektivitas tinggi di atas WER. Pola WER ditandai dengan gambar anak panah dan pola OE ditandai dengan lingkaran pada gambar pukul 07.40 UTC (Prasetyo dkk., 2022).

Pada pukul 08.00 UTC terlihat adanya pola *hail spike* atau biasa dikenal dengan *three body scatter spike* (TBSS) yang terlihat pada tampilan kotak hitam. Adanya pola TBSS ini ditandai dengan nilai reflektivitas maksimum saat awan konvektif berada di fase matang yang menunjukkan adanya partikel es yang cukup besar di dalam awan.

Pada pukul 08.10 UTC terjadi gerakan arus turun (*downdraft*) yang mengindikasikan bahwa partikel yang berada pada awan kemudian turun menjadi presipitasi dalam bentuk es akibat dari ukuran yang besar sehingga awan tidak mampu lagi menahannya. Pada proses turunnya partikel es ke permukaan, nilai reflektivitas tinggi terlihat pada proses bergerak turun dari nilai reflektivitas sebelumnya. Pada umumnya seperti yang sudah dijelaskan di atas bahwa pergerakan turun (*downdraft*) akan terlihat jelas membawa partikel es atau hujan es ketika berada di bawah 2 km, namun karena limitasi radar maka diasumsikan bahwa gerakan menurun tersebut mengindikasikan bahwa hujan es mulai turun. Berdasarkan nilai reflektivitas tersebut, dapat dilihat adanya partikel dengan ukuran yang cukup besar berada di ketinggian yang rendah hingga mendekati permukaan bumi. Hal tersebut dapat merupakan indikasi bahwa presipitasi yang terjadi mencapai permukaan bumi masih dalam bentuk partikel es.

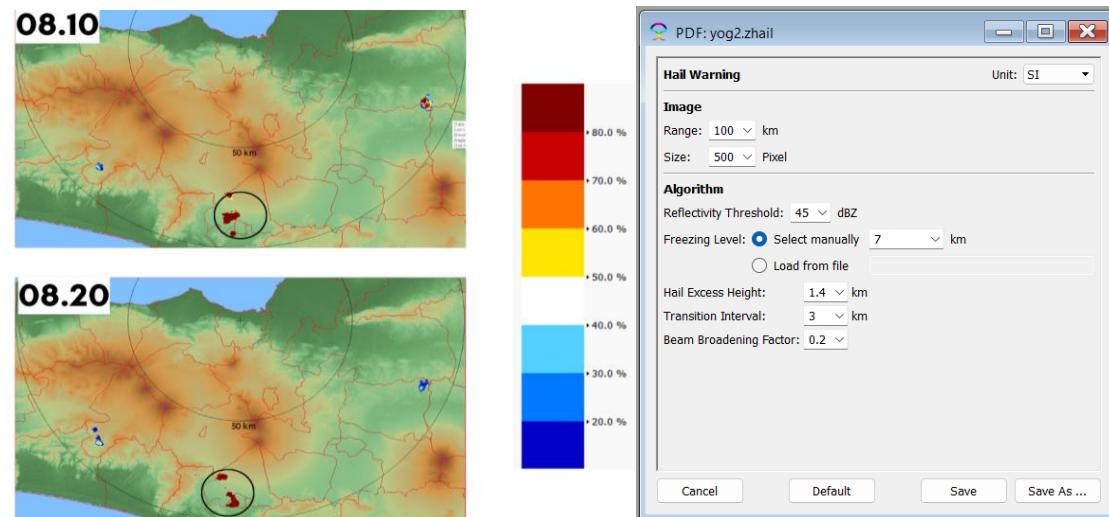
Dapat terlihat pada waktu selanjutnya pukul 08.20 UTC bahwa nilai reflektivitas masih bertahan dan mengalami downdraft, dikarenakan pada pukul 08.10 UTC terdapat 2 inti sel yang

terpisah dan sama-sama menghasilkan nilai reflektivitas serta probabilitas *hail* yang sama. Pada pukul 08.30 UTC nilai reflektivitas baru terlihat telah berkurang sangat signifikan, ini menunjukkan bahwa pada pukul 08.10 hingga 08.20 UTC memang terjadi gerakan *downdraft* yang membawa partikel es turun ke permukaan bumi dalam bentuk hujan es.



Gambar 9. Citra Radar Produk HAILSZ

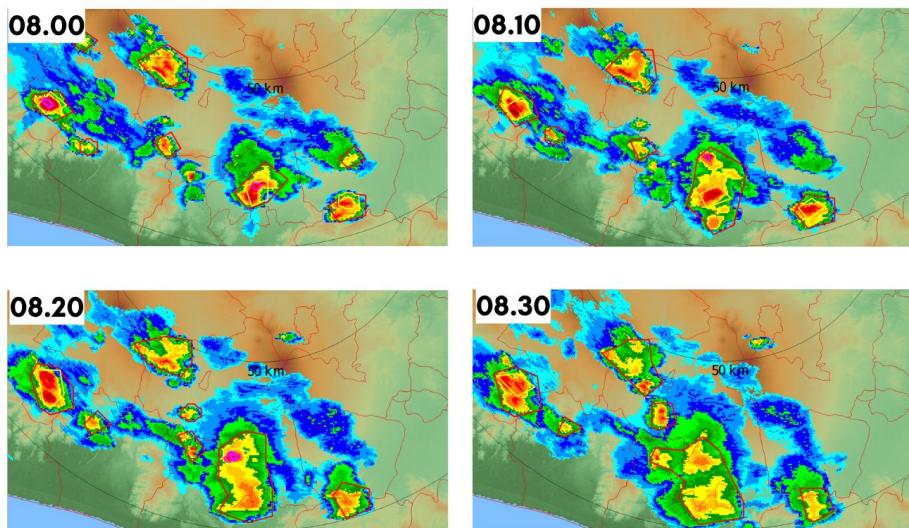
Gambar 9. menyajikan *output* produk HAILSZ menggunakan konfigurasi seperti pada gambar di atas. Produk HAILSZ menghasilkan estimasi ukuran hail yang mungkin jatuh ke permukaan dapat diketahui. Pada gambar sebelah kiri dapat dilihat bahwa pada saat presipitasi terjadi pukul 08.10 UTC dan pukul 08.20 ukuran hail yang terestimasi menggunakan produk HAILSZ berkisar antara 10.0 mm hingga 20.0 mm, dimana ukuran hail terdapat pada kategori kecil hingga sedang.



Gambar 10. Citra Radar Produk ZHAIL

Selain itu Gambar 10. dengan menggunakan metode Waldvogel yang divisualisasikan menggunakan produk ZHAIL, probabilitas terjadinya hujan es dapat dihitung. Dimana pada gambar menunjukkan probabilitas terjadinya hujan es, peluang terjadinya hujan es pada pukul

08.10 dan 08.20 UTC yang diperoleh adalah diatas 80%. Hal ini berkaitan dan memiliki kesesuaian dengan hasil yang diperoleh sebelumnya pada produk HAILSZ dimana hal ini ditunjukkan dengan nilai probabilitas ukuran hail yang jatuh.



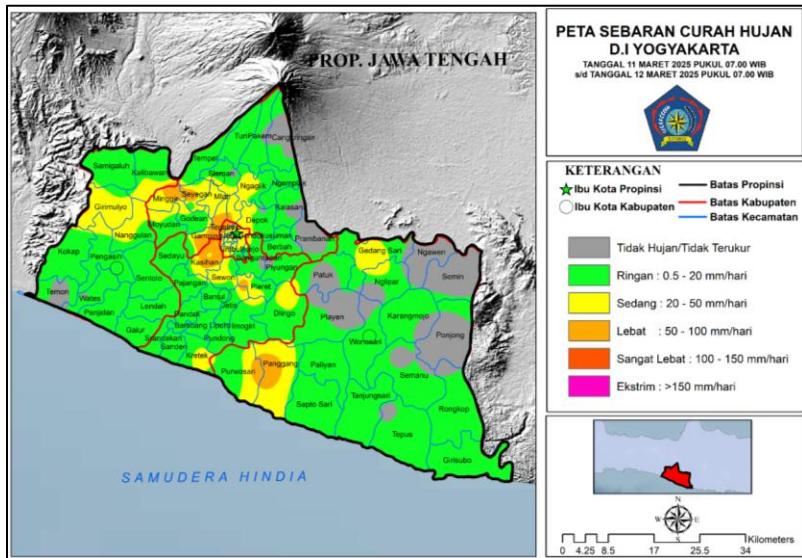
Gambar 11. Citra Radar Produk *Severe Weather Index* (SWI)

Gambar 11. menampilkan visualisasi dari produk *Severe Weather Index* (SWI). Poligon berwarna merah merupakan indikator untuk *Storm Structure Analysis* (SSA), poligon berwarna kuning merupakan indikator untuk *Storm Structure Analysis Core*, dan poligon berwarna ungu muda merupakan indikator untuk *Hail*. *Storm Structure Analysis* dapat digunakan mendekripsi dan menganalisa badai (storm) secara otomatis.

Pada pukul 08.00 UTC yang menunjukkan fase matang, dapat terlihat bahwa terdapat ketiga indikator tersebut dengan adanya indikator untuk *Hail*. Fase ini berlangsung hingga pukul 08.20 UTC sebelum akhirnya menghilang. SWI merupakan produk yang menggabungkan produk dari ZHAIR dan HAILSZ. Hasil ZHAIR menunjukkan nilai pada ambang batas 80 hingga 100% serta produk HAILSZ dengan ukuran 1 hingga 2 cm sehingga menghasilkan kesimpulan untuk ukuran hail yang masuk ke dalam ukuran *Hail Likely* dengan syarat sesuai dengan *panduan rainbow* bahwa terdapat nilai untuk ZHAIR probability $\geq 80\%$ dan Hail size dengan nilai berapapun tetapi di bawah 2 cm berdasarkan produk yang telah dihasilkan.

Analisis Sebaran Data Pos Hujan 24 Jam

Sebaran curah hujan di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta pada tanggal 11 Maret 2025 menunjukkan dominasi intensitas curah hujan dalam kategori tidak hujan/tidak terukur hingga hujan ringan dengan kisaran curah hujan 0–20 mm/hari. Sebaran ini terlihat mendominasi sebagian besar wilayah seperti Gunungkidul bagian selatan dan timur, serta sejumlah wilayah di Bantul dan Kulon Progo. Namun, terdapat beberapa wilayah yang mengalami hujan dengan intensitas lebih tinggi, khususnya di Kota Yogyakarta; Sleman bagian barat dan selatan; Kulon Progo bagian tengah; Bantul bagian utara dan selatan; serta Gunungkidul bagian utara, barat, dan barat daya. Wilayah-wilayah ini masuk dalam kategori hujan sedang hingga lebat, dengan curah hujan berkisar 20–100 mm/hari.



Gambar 12. Peta Sebaran Curah Hujan D.I Yogyakarta 11 Maret 2025

Dari 121 titik pos pengamatan hujan yang tersebar di wilayah DIY, tercatat bahwa nilai curah hujan tertinggi terjadi di Pos Hujan Sendangpitu, Kecamatan Minggir, Kabupaten Sleman, dengan curah hujan sebesar 74 mm/hari, yang termasuk dalam kategori hujan lebat. Secara umum, pola distribusi curah hujan ini menunjukkan adanya intensitas hujan yang relatif lebih tinggi di bagian barat dan tengah DIY, sedangkan bagian timur dan tenggara cenderung lebih kering atau tidak terukur curah hujannya pada tanggal pengamatan. Faktor-faktor seperti topografi wilayah, dinamika atmosfer lokal, dan pergerakan sistem cuaca regional dapat memengaruhi distribusi curah hujan ini. Validasi menggunakan data pos hujan sangat penting untuk memastikan ketepatan analisis distribusi hujan dan untuk menunjang interpretasi fenomena meteorologis secara lebih akurat

SIMPULAN

Kombinasi berbagai parameter dan produk data radar menghasilkan kesimpulan bahwa sangat besar potensi hujan es terjadi di Yogyakarta, terutama di Sleman. Hal ini dikarenakan menjelang kejadian berlangsung, terdapat perubahan parameter sinoptik berupa menurunnya tekanan udara, menurunnya suhu, menurunnya kecepatan angin, dan naiknya kelembapan udara menandakan labilitas atmosfer sehingga mendukung terbentuknya awan konvektif kuat. Hal ini didorong dengan citra satelit terhadap produk High-resolution Cloud Analysis Information (HCAI) yang memperlihatkan awan konvektif secara objektif. Untuk membuktikannya, penggunaan radar dual polar dari Stasiun Meteorologi Kelas II Ahmad Yani Semarang diperlukan dengan menghasilkan beberapa produk. Citra produk CMAX pada radar menunjukkan terdapat reflektivitas maksimum sebesar 60 dBZ pada pukul 08.00 UTC. Ditambahkan dengan adanya aliran updraft kuat di pukul 07.40 UTC dan downdraft kuat, pada pukul 08.00 terdapat pola three body scatter spike (TBSS) yang menandakan reflektivitas kuat untuk hail, dan terdapat pola downdraft pada 08.10 UTC. Hal tersebut membuat potensi pertumbuhan hujan es di atas 80% berdasarkan produk ZHAIL. Seluruh elemen ini didukung dengan validasi data pos hujan yang tersebar di seluruh wilayah D.I. Yogyakarta bahwa pada lokasi terjadinya hujan es memang terjadi hujan dengan intensitas lebat dengan rentan nilai 50-100 mm/hari. Semua parameter dan unsur

data yang ada dalam penelitian ini mendukung terjadinya hujan es dengan memahami proses fisis pertumbuhan awan konvektif penyebab hujan es.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Stasiun Meteorologi Kelas II Yogyakarta, Stasiun Klimatologi Kelas IV Yogyakarta, dan Stasiun Meteorologi Kelas II Ahmad Yani Semarang untuk segala bentuk bimbingan, ketersediaan parameter dan data yang dibutuhkan, serta dukungan yang penuh ke dalam rangkaian penelitian ini. Tak lupa penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program studi D-IV Meteorologi dan D-IV Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika atas segala bentuk dukungan pendidikan, fasilitas, dan panduan dalam penulisan ilmiah sehingga penelitian ini dapat berjalan secara sistematis dan baik

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, D. (2022). Labilitas atmosfer terkait kejadian hujan es (Studi kasus hujan es di Sindang Dataran Bengkulu tanggal 25 Juni 2021). *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 2(2), 34-48. https://balai2bmkg.id/index.php/buletin_mkg/article/view/16
- Arya, S. P. (2001). *Introduction to micrometeorology*. Academic Press.
- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Murata, H., Ohno, T., Okuyama, A., Oyama, R., Sasaki, Y., Shimazu, Y., Shimoji, K., & Sumida, Y. (2016). An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(2), 151-183. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>
- BPBD DIY. (2024). Fenomena hujan es dan dampak hujan deras disertai angin kencang di DIY. [Online]. Retrieved from <https://bpbd.jogjaprov.go.id/berita/fenomena-hujan-es-dan-dampak-hujan-deras-disertai-angin-kencang-di-diy>
- Elachi, C., & Van Zyl, J. J. (2021). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. John Wiley & Sons.
- Frystine, M., Mulya, A., Kristianto, A., & Maulidyah, M. P. (2022). Analysis of atmospheric condition on hail event at Pelalawan (Case Study: September 23rd, 2019). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 23(3), 45–56. <https://doi.org/10.31172/jmg.v23i3.813>
- Haryadi, Putra, R. M., & Widodo, P. (2024). Studi profil awan konvektif penyebab hujan es di Jakarta menggunakan radar cuaca (Studi kasus hujan es di Jakarta 17 Desember 2022). *PENDIPA Journal of Science Education*, 8(2), 210-216. <https://doi.org/10.33369/pendipa.8.2.210-216>
- Li, Z., Zhang, T., Zheng, D., Yu, H., Cui, X., Bao, M., & Zhou, F. (2024). Study of dynamics-microphysical-lightning activity characteristics in a tropical hailstorm. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 259, 106241. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682624000695>
- Liu, W., Zhang, Q., Li, C., Xu, L., & Xiao, W. (2022). The influence of soil moisture on convective activity: A review. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1), 221-232.
- Maulana, M. I. S., & Kristianto, A. (2024). Sensitivity of WRF-HAILCAST Model for hailstone detection in Central Lombok on 24 February 2019. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 20(1), 1-7. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v20i1.14010>
- Maulidiani, M., Tempo, N. F. R., & Haryanto, Y. D. (2023). 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). <https://doi.org/10.24252/jft.v11i1.45152>
- Nugroho, A. D., & Fadlan, A. (2018). Analisis kejadian hujan es berdasarkan kondisi atmosfer dan citra satelit Himawari-8 (Studi kasus: Magelang, 24 Januari 2018). *Prosiding Seminar Nasional Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, STMKG*. <https://doi.org/10.24198/jif.v2i2.19711>
- Paski, J. A. I., Permana, D. S., Sepriando, A., & Pertiwi, D. A. S. (2017). Analisis dinamika atmosfer kejadian hujan es memanfaatkan citra radar dan satelit Himawari-8 (Studi kasus: Tanggal 3 Mei 2017 di Kota Bandung). In *Seminar Nasional Penginderaan Jauh*.
- Prasetyo, S., Abdilah, S., Nugraheni, I. R., & Sagita, N. (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.balai2bmkg.id/index.php/jam/article/view/17>
- Ratnam, M. V., Santhi, Y. D., Rajeevan, M., & Rao, S. V. B. (2013). Diurnal variability of stability indices observed using radiosonde observations over a tropical station: Comparison with microwave radiometer measurements. *Atmospheric Research*, 124, 21–33. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809512004371>
- Ryzhkov, A. V., Kumjian, M. R., Ganson, S. M., & Zhang, P. (2013). Polarimetric radar characteristics of melting hail. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(10), 2291-2308. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0121.1>
- Sari, F. P., Manola, I., Tsiringakis, A., & Steeneveld, G. J. (2023). Understanding the role of sea surface temperature and urbanization on severe thunderstorms dynamics: A case study in Surabaya, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(17), e2023JD038817. <https://doi.org/10.1029/2023JD038817>
- Singh, D. K., Yadav, R., KRISHNAN, K. S., & RAWAT, L. C. N. (2021). Analysis of three unusual severe weather events over Delhi during May-June, 2018 using Dual-Pol Doppler Weather Radar and GNSS data. *MAUSAM*, 72(4), 719-738. <https://doi.org/10.54302/mausam.v72i4.3543>
- Stephens, G. L., Shiro, K. A., Hakuba, M. Z., Takahashi, H., Pilewskie, J. A., Andrews, T., & Wu, L. (2024). Tropical deep convection, cloud feedbacks and climate sensitivity. *Surveys in Geophysics*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10712-024-09831-1>
- Sulistiyono, W., Salsabil, N. H. S., & Ramadhan, S. A. (2024). Aplikasi produk radar C-band dalam identifikasi awan penghasil hujan es (Studi kasus: Bogor, 24 Januari 2022). *GEOGRAPHIA: Jurnal Pendidikan dan Penelitian Geografi*, 5(2), 137-143. <https://doi.org/10.53682/gippg.v5i2.8577>
- Surendran, U., Nagakumar, K. C. V., & Samuel, M. P. (2024). Remote sensing in precision agriculture. In *Digital agriculture: A solution for sustainable food and nutritional security* (pp. 201-223). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-43548-5_7
- Yang, H., Xia, R., Li, F., & Yu, B. (2025). Statistical characteristics, circulation patterns, and environmental features of severe convective wind events in Beijing. *Atmospheric Research*, 318, 107996. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.107996>