

Aplikasi Produk Radar Cuaca pada Kejadian Hujan Es (Studi Kasus: Perumahan Sanggulan, 1 November 2024)

I Dewa Gede Loka Maheswara^{1*}, I Kadek Mas Satriyabawa², Yosafat Donni Haryanto¹

¹Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Indonesia

²Stasiun Meteorologi Kelas I Ngurah Rai, Bandara Ngurah Rai, Indonesia

ARTICLE INFO

Riwayat Artikel:

Draft diterima: 19 Agustus 2025

Revisi diterima: 20 oktober 2025

Diterima: 23 Oktober 2025

Tersedia Online: 30 Oktober 2025

Corresponding author:

maheswaradewaloka@gmail.com

ABSTRAK

Fenomena cuaca ekstrem, seperti hujan es, dapat berdampak terhadap kerusakan yang signifikan serta mengganggu aktivitas masyarakat. Analisis yang komprehensif terhadap kejadian hujan es menjadi penting sebagai upaya pengembangan metode deteksi dini. Salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kejadian hujan es adalah radar cuaca. Dalam penelitian ini digunakan data mentah (*rawdata*) Radar Doppler BBMKG Wilayah III Denpasar dalam format. vol yang diolah menjadi produk CMAX, SSA, CAPPI, VIL, dan ZHAIL. Hasil penelitian menunjukkan adanya nilai reflektivitas tinggi di atas *freezing level* yang mencapai 61.5 dBZ pada pukul 05.00 UTC serta luas sistem inti awan konvektif (*core*) sebesar 92 km² pada waktu yang sama yang memenuhi kriteria kejadian hujan es. Selain itu, nilai kandungan air mencapai 9.35 mm dengan persentase probabilitas kejadian hujan es sebesar 100% pada ambang batas (*threshold*) 48 dBZ, yang menunjukkan bahwa fenomena tersebut merupakan hujan es. Fenomena ini disebabkan oleh keberadaan *Quasi-Linear Convective System* (QLCS) yang bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan serta adanya proses *downdraft* yang kuat.

Kata kunci: Hujan Es, Radar Cuaca, Tabanan.

ABSTRACT

Extreme weather phenomena such as hailstorms can cause significant damage and disrupt community activities. A comprehensive analysis of hail events is essential for developing early detection methods. One of the primary instruments used to identify hail occurrences is weather radar. In this study, raw Doppler radar data from BBMKG Region III Denpasar in. vol format were processed to produce CMAX, SSA, CAPPI, VIL, and ZHAIL products. The results indicate high reflectivity values above the freezing level, reaching 61.5 dBZ at 05.00 UTC, with a convective core area of 92 km² at the same time-both meeting the criteria for a hail event. Furthermore, the integrated liquid water content reached 9.35 mm, and the hail probability based on the 48 dBZ threshold was 100%, confirming that the observed phenomenon was indeed hail. This event was driven by the presence of a *Quasi-Linear Convective System* (QLCS) moving southward toward the Sanggulan Residential Area coupled with a strong *downdraft* process.

Keywords: Hailstorms, Weather Radar, Tabanan.

1. PENDAHULUAN

Fenomena cuaca ekstrem seperti hujan es dapat menyebabkan kerusakan signifikan dalam waktu singkat. Hujan es merupakan salah satu bentuk presipitasi yang jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk bola, potongan, ataupun serpihan es dengan diameter mencapai 50 mm, yang terbentuk akibat sistem konvektif yang kuat [1]. Fenomena ini berasal dari awan Cumulonimbus yang berkembang dan melewati *freezing level* (lapisan udara dengan suhu di bawah 0°C) pada ketinggian lebih dari 16.000 kaki [2]. Proses koalisi dan koalsensi pada sistem konvektif menyebabkan pencampuran air superdingin (*supercooled water*) dengan kristal es, sehingga terbentuk presipitasi dalam bentuk butiran es [3]. Arus turun (*downdraft*) yang kuat menyebabkan butiran es mencapai permukaan bumi dalam keadaan belum sepenuhnya mencair [4].

Di wilayah Indonesia, kejadian hujan es umumnya terjadi pada masa peralihan dari musim kemarau ke musim hujan atau sebaliknya [5]. Posisi Indonesia yang berada di kawasan tropis menyebabkan ketinggian *freezing level* lebih tinggi, sehingga komponen kristal es mengalami fase pelelehan yang lebih lama. Fase pelelehan yang panjang ini menyebabkan Sebagian besar komponen es telah mencair dan jatuh sebagai presipitasi dalam bentuk tetes hujan. Oleh karena itu, hujan es jarang terjadi di wilayah Indonesia [6]. Kejadian hujan es biasanya berdurasi singkat dan dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal [5]. Salah satu

peristiwa hujan es di Indonesia terjadi pada 1 November 2024 sekitar pukul 13.00 WITA di wilayah Perumahan Sanggulan, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali, sebagaimana dikonfirmasi oleh Kepala Pelaksana (Kalaksa) Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tabanan [7]. Peristiwa ini menyebabkan gangguan terhadap aktivitas masyarakat, antara lain pengendara mobil terpaksa berhenti karena butiran es menimpa kaca dan atap kendaraan, serta timbul suara keras akibat hantaman butiran es pada atap seng rumah warga. Mengingat dampak yang ditimbulkan, pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika atmosfer penyebab kejadian hujan es menjadi penting dalam upaya mitigasi terhadap dampaknya.

Penggunaan teknologi penginderaan jauh, seperti radar cuaca, memungkinkan dilakukannya analisis secara komprehensif [8][9]. Radar cuaca merupakan instrumen utama dalam mendeteksi potensi terjadinya hujan es [10]. Instrumen ini menghasilkan berbagai produk yang dapat digunakan untuk menganalisis potensi kejadian hujan es [11]. Penelitian sebelumnya oleh [11] menggunakan produk CMAX yang di-overlay dengan SSA, VIL, dan ZHAIL untuk mengidentifikasi potensi hujan es di wilayah Bogor pada 24 Januari 2022. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketiga produk tersebut mengindikasikan adanya pembentukan awan Cumulonimbus yang menyebabkan terjadinya hujan es di wilayah tersebut. Pada wilayah lain, [12] menggunakan produk CMAX dan CAPPI untuk mengidentifikasi potensi hujan es di wilayah Surabaya pada 21 Februari 2022. Hasil penelitian menunjukkan keberadaan awan Cumulonimbus dengan nilai reflektivitas maksimum mencapai 60 dBZ menjadi penyebab terjadinya hujan es. Pada wilayah berbeda, [13] menggunakan produk PPI, CAPPI, CMAX, dan VVP untuk menganalisis potensi hujan es di Jakarta pada 22 April 2014. Hasil penelitian menunjukkan adanya pembentukan awan konvektif yang berasal dari selatan Jakarta. Awan tersebut mengalami proses *updraft* dan *downdraft* yang kuat, sehingga butiran es tidak sepenuhnya mencair ketika mencapai permukaan bumi.

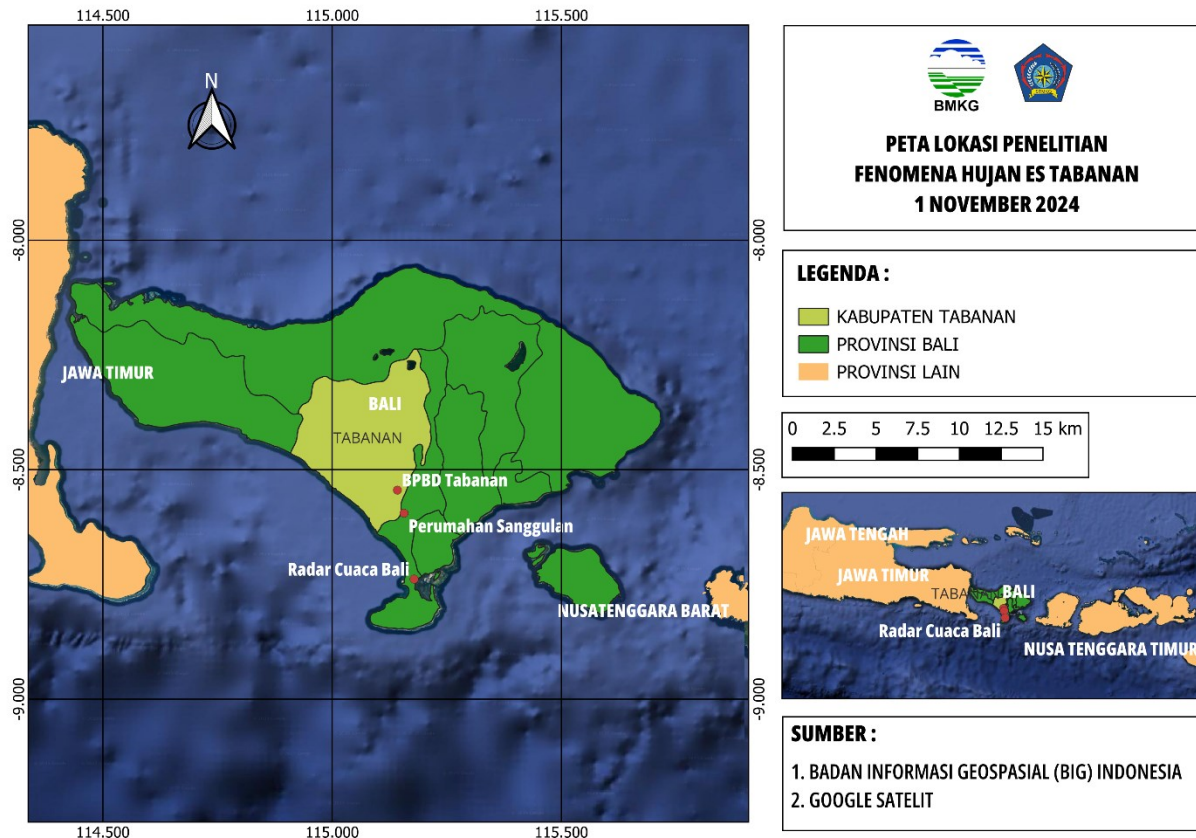
Penelitian ini akan berfokus pada pemanfaatan produk radar cuaca CMAX, VCUT, SSA, CAPPI, VIL, dan ZHAIL untuk mengidentifikasi potensi terjadinya hujan es di wilayah Perumahan Sanggulan, Tabanan pada 1 November 2024. Pemilihan produk-produk radar tersebut didasarkan pada kemampuannya dalam menggambarkan struktur vertikal dan horizontal sistem awan konvektif. Melalui integrasi berbagai produk tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika kejadian hujan es serta menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan metode identifikasi kejadian hujan es di wilayah Indonesia. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan dua atau tiga produk radar cuaca, penelitian ini memanfaatkan lebih banyak jenis produk radar sehingga diharapkan dapat menghasilkan analisis yang lebih mendalam dan menyeluruh.

2. METODE PENELITIAN

Wilayah penelitian ini terletak di Perumahan Sanggulan, Tabanan, yang menjadi lokasi terjadinya hujan es pada 1 November 2024, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa *rawdata* Radar Cuaca Bali dalam format .vol dengan resolusi spasial 1 km dan resolusi temporal 10 menit. Konfigurasi produk radar cuaca yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1. Data radar tersebut dimanfaatkan untuk mengidentifikasi potensi terjadinya hujan es pada wilayah penelitian, mengingat jarak antara lokasi radar dengan Perumahan Sanggulan adalah sekitar 20 km. Menurut [15], pada radar cuaca C-band, jarak optimal untuk mendeteksi fenomena cuaca agar dapat teridentifikasi dengan baik berkisar antara 100-120 km dari lokasi radar. Dengan demikian, jarak pengamatan dalam penelitian ini masih berada dalam rentang yang sesuai untuk mendeteksi kejadian hujan es.

Tabel 1. Konfigurasi Produk Radar Cuaca

No	Nama Produk	Konfigurasi
1	Column Maximum (CMAX)	Range: 100 km; Size: 500 Pixel; Top: 10 km; Bottom: 0 km
2	Vertical Cut (VCUT)	-
3	Storm Structure Analysis (SSA)	Min Elevation: 1 deg; C: 24000; D: 1.82; Min. Reflectivity: 38 dBZ, Min. Core Reflectivity: 50 dBZ; Diameter: 5 km; Min. Fill Factor: 50%; Storm Structure: Standard Fit
4	Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI)	Range: 100 km; Size: 900 Pixel; Level: 6 km; Algorithm: CAPPI
5	Vertical Integrated Liquid (VIL)	Range: 100 km; Size: 500 Pixel; Top: 10 km; Bottom: 0 km; C: 24000; D: 1.82
6	Reflectivity-based Hail Warning (ZHAIL)	Range: 100 km; Size: 500 Pixel; Reflectivity Threshold: 48 dBZ; Freezing Level: 3 km; Hail Excess Height: 1.4 km; Transition Interval: 3 km; Beam Broadening Factor: 0.2



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian Fenomena Hujan Es Tabanan, 1 November 2024. Titik berwarna merah pada peta menunjukkan lokasi Radar Cuaca Bali, Perumahan Sanggulan, dan kantor BPBD Tabanan.

Penelitian diawali dengan pengumpulan *raw data* Radar Cuaca Bali dengan tipe C-Band Single Polar tanggal 1 November 2024 pada pukul 00.00 - 23.50 UTC dalam format .hdf5. *Raw data* dalam format .hdf5 yang telah terkumpul kemudian dikonversi menjadi *raw data* dalam format .vol. Setelah proses konversi, *raw data* tersebut diolah menggunakan aplikasi RainDART. Pengolahan *raw data* pada aplikasi tersebut dilakukan untuk memvisualisasi potensi kejadian hujan es secara spasial menggunakan produk CMAX, VCUT, SSA, CAPPI, VIL, dan ZHAIL. Selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap nilai reflektivitas tertinggi guna menentukan waktu terjadinya hujan es. Setelah waktu dengan nilai reflektivitas maksimum diperoleh, dilakukan pembuatan berbagai produk radar untuk kemudian dianalisis. Produk CMAX digunakan untuk mengidentifikasi nilai maksimum reflektivitas (*echo*) yang terdeteksi oleh radar pada setiap kolom pengamatan, sebagaimana dilakukan dalam penelitian oleh [11], [12], dan [16]. Produk VCUT digunakan untuk menganalisis profil reflektivitas secara vertikal [16]. Produk SSA digunakan untuk menunjukkan ukuran spasial sistem awan dengan reflektivitas dalam rentang tertentu sesuai konfigurasi pengamatan [11]. Produk CAPPI digunakan untuk menampilkan distribusi reflektivitas radar pada ketinggian tertentu [12]. Produk VIL digunakan untuk memperkirakan kandungan air pada setiap kolom vertikal awan konvektif sebagai indikator tingkat kejenuhan awan [11] dan [16]. Sementara itu, produk ZHAIL digunakan untuk menganalisis struktur reflektivitas vertikal di atas lapisan *melting layer* dengan keluaran berupa persentase probabilitas terjadinya hujan es [11] dan [16]

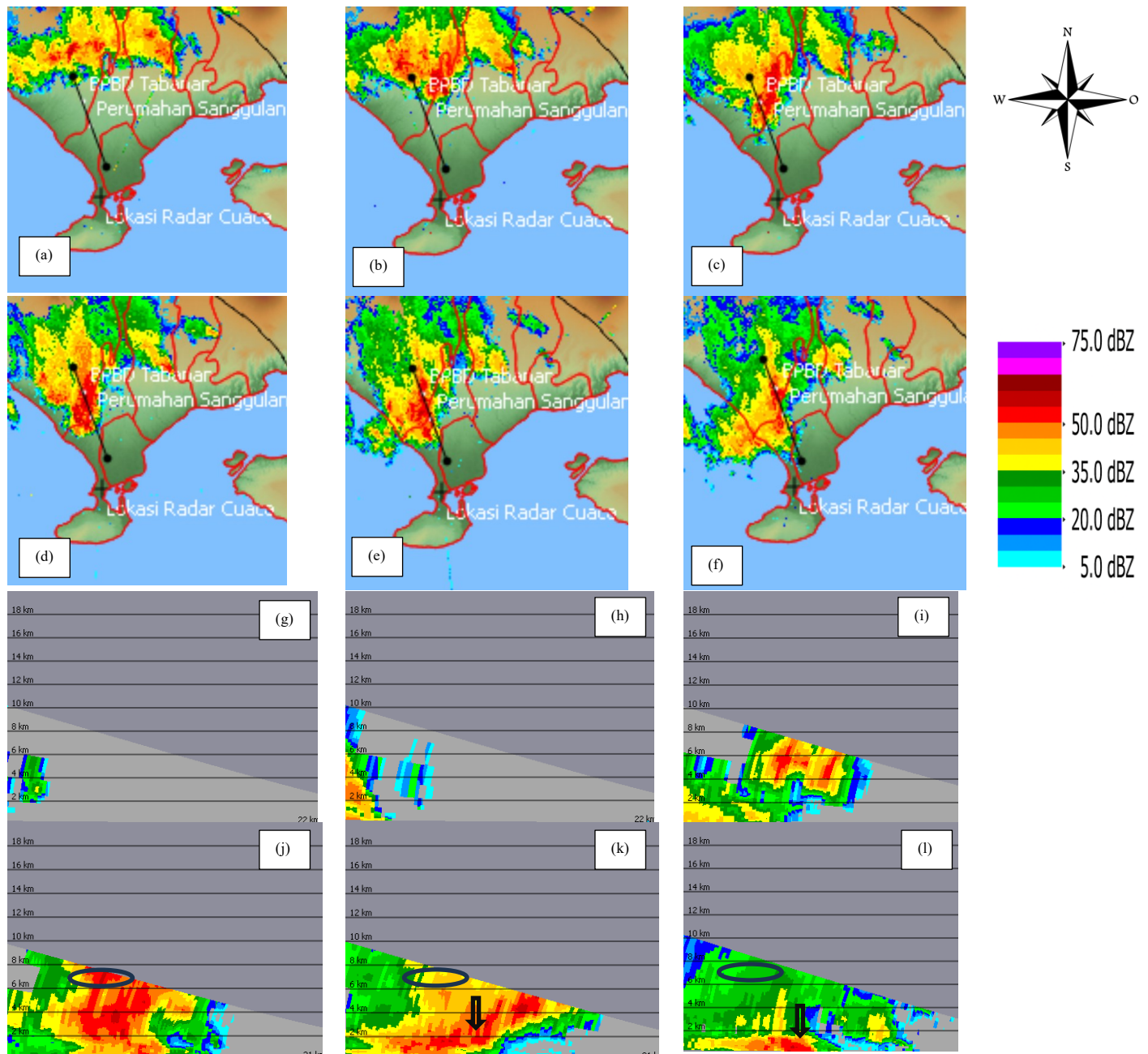
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Proses Fisis dan Dinamis Cuaca

Column Maximum (CMAX)

Gambar 2 menunjukkan hasil pengolahan produk CMAX di wilayah Perumahan Sanggulan pada 1 November 2024, mulai pukul 04.30 UTC hingga pukul 05.20 UTC. Produk CMAX memberikan informasi mengenai nilai maksimum reflektivitas (*echo*) yang

terdeteksi oleh radar dalam setiap kolom pengamatan. Semakin besar nilai reflektivitas menunjukkan semakin tinggi intensitas presipitasi [12].



Gambar 2. Reflektivitas pada pukul 04.30 UTC (a, g), 04.40 UTC (b, h), 04.50 UTC (c, i), 05.00 UTC (d, j), 05.10 UTC (e, k), dan 05.20 UTC (f, l) yang ditampilkan menggunakan produk CMAX. Garis hitam lurus pada gambar (a), (b), (c), (d), (e), dan (f) merupakan penanda melintang yang ditampilkan secara vertikal pada gambar (g), (h), (i), (j), (k), dan (l). Lingkaran biru menandakan sel lama yang telah luruh. Anak panah vertikal ke bawah menandakan aliran ke bawah (downdraft).

Berdasarkan Gambar 2, teridentifikasi sistem konvektif dengan pola sebaran *Quasi-Linear Convective System* (QLCS). QLCS merupakan sistem konvektif skala meso yang berpotensi menimbulkan fenomena cuaca signifikan yang memiliki bentuk linear [17]. Sistem ini dicirikan oleh nilai reflektivitas pada inti sistem konvektif yang melebihi 50 dBZ pada fase matang [18]. Pada kejadian ini, nilai reflektivitas tertinggi mencapai 56 dBZ dan mulai bergerak mendekati Perumahan Sanggulan pada pukul 04.30 UTC. Pada pukul 04.50 UTC, sistem konvektif telah menutupi wilayah BPBD Tabanan dengan peningkatan nilai reflektivitas hingga 62 dBZ. Selanjutnya, pada pukul 05.00 UTC, sistem awan konvektif dengan nilai reflektivitas maksimum 61.5 dBZ mulai menutupi

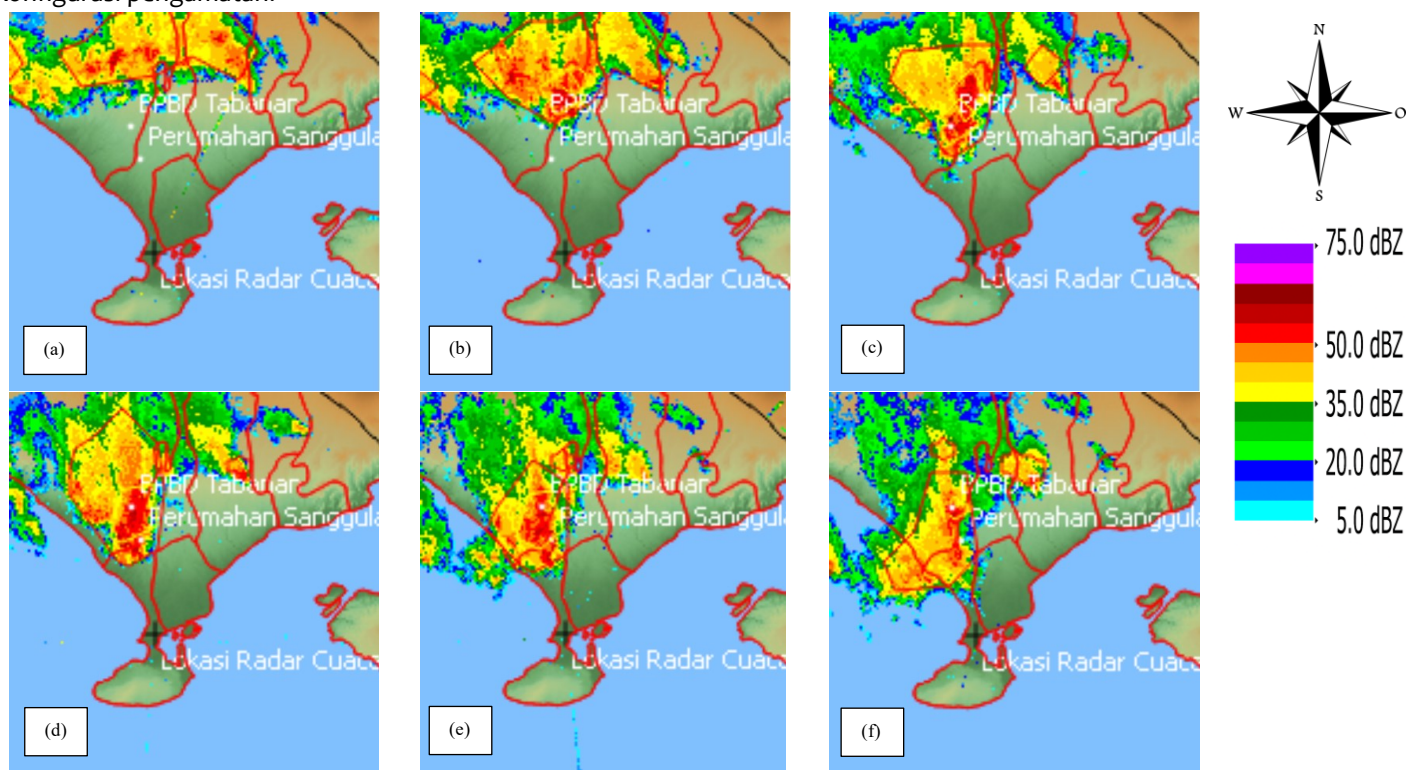
wilayah Perumahan Sanggulan. Pada pukul 05.10 UTC, sistem awan konvektif tersebut mulai bergerak ke arah barat menjauhi Perumahan Sanggulan. Merujuk pada studi sebelumnya yang dilakukan oleh [19], nilai reflektivitas minimum sebesar 53 dBZ dalam radius 100 km dapat dijadikan indikator efektif untuk mendeteksi kemungkinan terjadinya hujan es. Hal ini sejalan dengan nilai reflektivitas yang teridentifikasi pada pukul 05.00 UTC, sehingga mengindikasikan adanya partikel es di dalam sistem awan konvektif yang melintas.

Selanjutnya, terlihat bahwa reflektivitas sistem konvektif mulai menurun pada pukul 05.10 UTC hingga 05.20 UTC sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2k dan 2l. Fenomena ini mengindikasikan fase peluruhan awan yang disertai proses *downdraft*. Proses *downdraft* yang kuat menyebabkan partikel-partikel es yang tersuspensi di dalam awan turun ke permukaan dengan kecepatan tinggi sebagai presipitasi dalam bentuk es, karena partikel tersebut belum sepenuhnya mencair saat mencapai permukaan [20].

3.2 Analisis Peluang Terjadinya Hujan ES

2.1 Luas Sistem Awan Konvektif Menggunakan Produk CMAX yang di-Overlay dengan Storm Structure Analysis (SSA)

Gambar 3 menunjukkan hasil pengolahan produk CMAX yang di-overlay dengan produk SSA di wilayah Perumahan Sanggulan pada 1 November 2024 pukul 04.30 UTC, 04.40 UTC, 04.50 UTC, 05.00 UTC, 05.10 UTC, dan 05.20 UTC. Produk CMAX merepresentasikan nilai maksimum reflektivitas dalam setiap kolom atmosfer, sedangkan produk SSA (*Storm Structure Analysis*) digunakan untuk mengidentifikasi ukuran spasial sistem awan yang memiliki reflektivitas dalam rentang tertentu sesuai konfigurasi pengamatan.



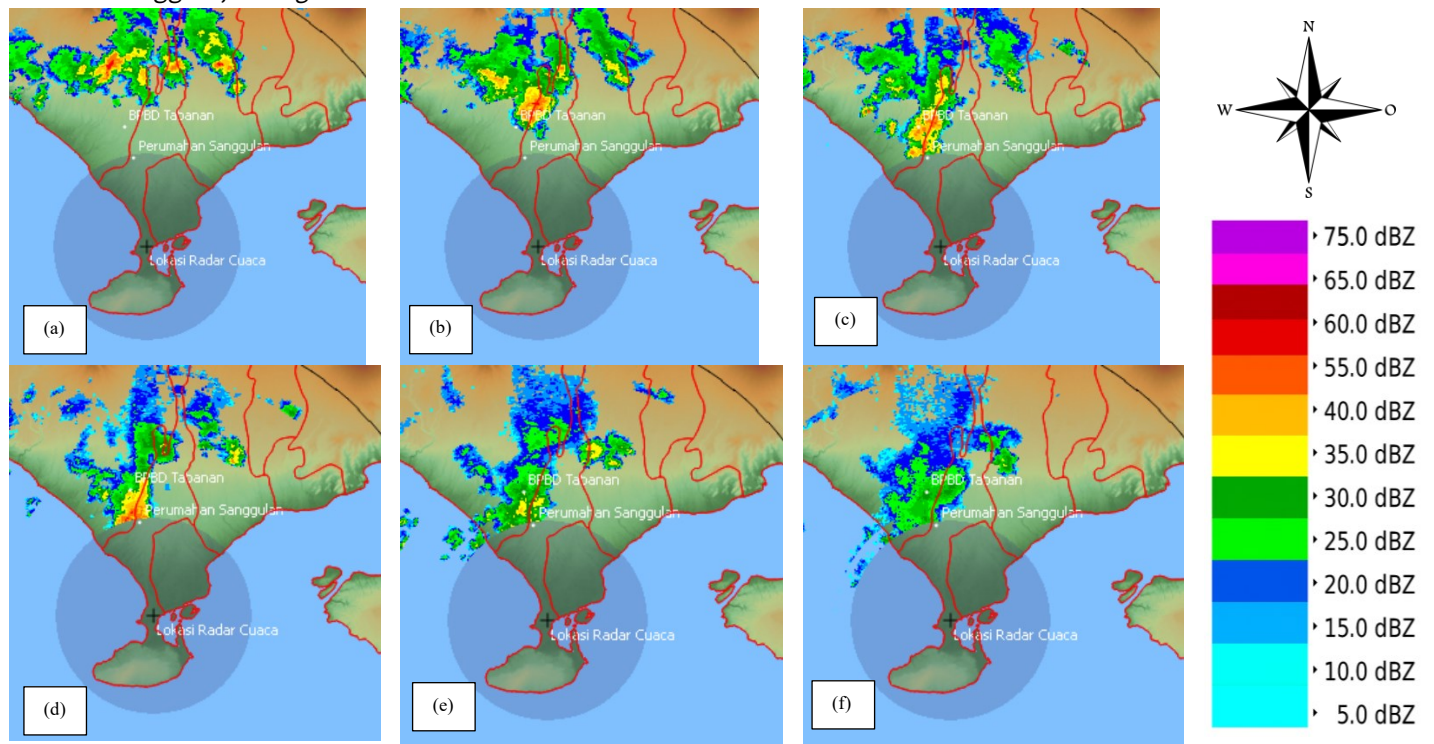
Gambar 3. Ukuran sistem awan dengan nilai reflektivitas tertentu pada pukul 04.30 UTC (a), 04.40 UTC (b), 04.50 UTC (c), 05.00 UTC (d), 05.10 UTC (e), dan 05.20 UTC (f) ditampilkan menggunakan produk CMAX yang di-overlay dengan produk SSA. Poligon berwarna kuning menunjukkan area sistem awan dengan nilai reflektivitas tinggi, sedangkan poligon berwarna merah menunjukkan area dengan nilai reflektivitas yang lebih rendah.

Berdasarkan Gambar 3, produk CMAX yang di-overlay dengan produk SSA pada pukul 04.30 UTC menunjukkan adanya sistem awan konvektif dengan luas 376 km² yang bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan. Pada pukul 04.40 UTC, sistem tersebut telah mendekati wilayah BPBD Tabanan dengan peningkatan luas menjadi 465 km² serta terbentuk inti awan konvektif (*core*) seluas 65 km². Pada pukul 05.00 UTC, sistem awan konvektif mulai memasuki wilayah Perumahan Sanggulan. Meskipun luas total sistem menurun menjadi 348 km², luas inti awan konvektif meningkat signifikan hingga 92 km² yang merupakan nilai tertinggi selama masa hidup sistem tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa aktivitas konvektif maksimum

terjadi pada fase tersebut. Selanjutnya, pada pukul 05.10 UTC sistem awan konvektif memasuki fase peluruhan dengan penurunan luas menjadi 222 km², sedangkan inti awan menyusut menjadi 80 km². Pada pukul 05.20 UTC, tidak lagi teridentifikasi inti awan konvektif di wilayah Perumahan Sanggulan. Ketiadaan inti awan tersebut disebabkan oleh nilai reflektivitas yang tidak memenuhi *threshold* pengamatan yang telah ditentukan pada Tabel 1 [11].

2.2 Reflektivitas pada Ketinggian 6 km dari Permukaan Tanah Menggunakan Produk CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator)

Gambar 4 menunjukkan hasil pengolahan produk CAPPI di wilayah Perumahan Sanggulan pada 1 November 2024 pukul 04.30 UTC, 04.40 UTC, 04.50 UTC, 05.00 UTC, 05.10 UTC, dan 05.20 UTC. Produk CAPPI digunakan untuk menampilkan distribusi reflektivitas radar pada ketinggian tertentu. Berdasarkan penelitian sebelumnya [21], ketinggian *freezing level* di Indonesia umumnya berkisar antara 4,4 km hingga 5,55 km. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan CAPPI 6 km sebagai proksimasi atas dari ketinggian *freezing level* maksimum tersebut.

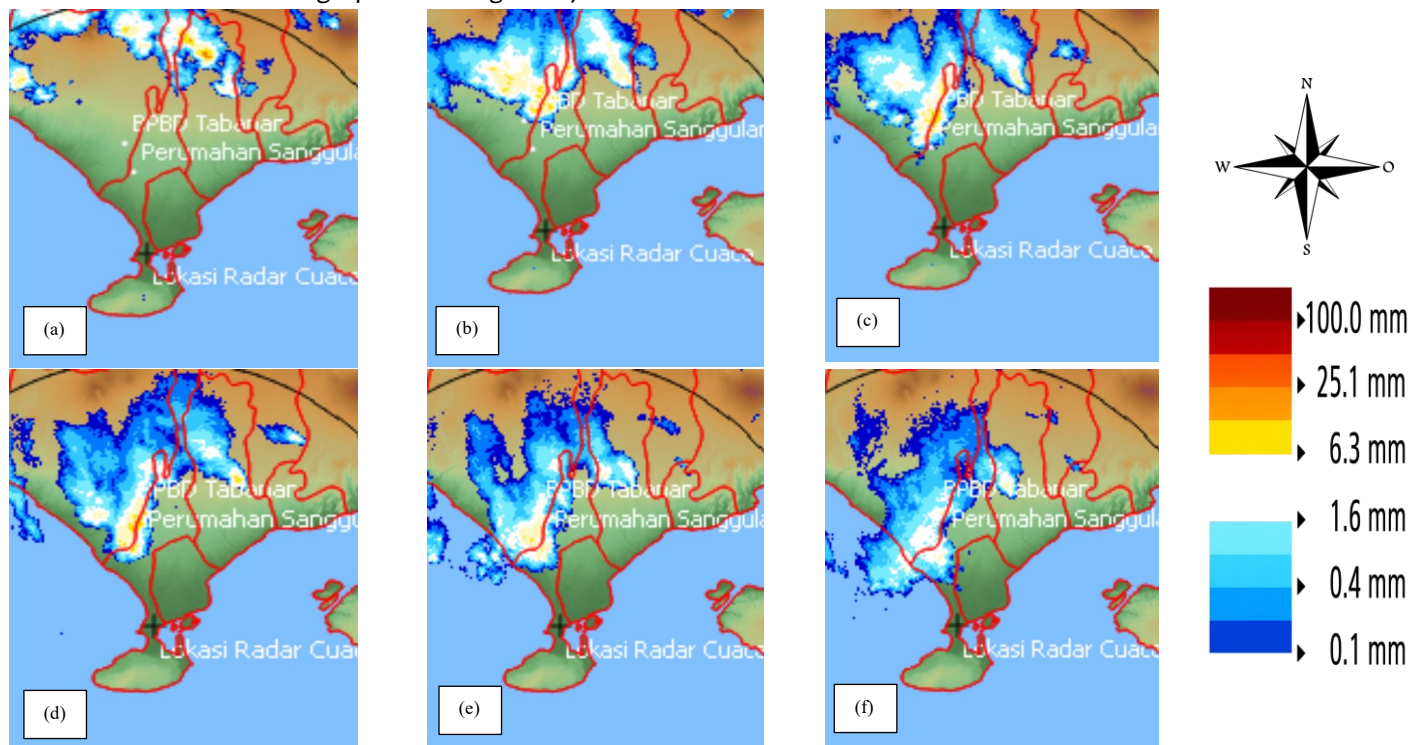


Gambar 4. Nilai reflektivitas pada ketinggian 6 km dari permukaan tanah pukul 04.30 UTC (a), 04.40 UTC (b), 04.50 UTC (c), 05.00 UTC (d), 05.10 UTC (e), dan 05.20 UTC (f) ditampilkan menggunakan produk CAPPI. Warna jingga pada gambar menunjukkan nilai reflektivitas lebih tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan nilai reflektivitas yang lebih rendah.

Berdasarkan Gambar 4, pada pukul 04.30 UTC produk CAPPI menunjukkan adanya sistem awan konvektif yang bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan dengan reflektivitas maksimum sebesar 52 dBZ. Pada pukul 04.40 UTC, sistem tersebut telah mendekati wilayah BPBD Tabanan dengan peningkatan reflektivitas maksimum menjadi 52.5 dBZ. Selanjutnya, pada pukul 05.00 UTC, sistem awan konvektif mulai memasuki wilayah Perumahan Sanggulan dengan reflektivitas maksimum mencapai 53 dBZ, yang mengindikasikan intensitas konvektif relatif kuat. Pada pukul 05.10 UTC, sistem awan konvektif bergerak ke arah barat dan menunjukkan fase peluruhan dengan penurunan nilai reflektivitas menjadi 42 dBZ. Pada pukul 05.20 UTC, reflektivitas menurun secara signifikan hingga 28.50 dBZ, menandakan sistem awan konvektif telah memasuki fase akhir dan berakhirnya kejadian hujan es. Nilai reflektivitas di bawah 35 dBZ pada lapisan di atas *freezing level* tidak lagi memenuhi ambang batas (*threshold*) kejadian hujan es [14].

2.3 Kandungan Air Cair Menggunakan Produk Vertical Integrated Liquid (VIL)

Gambar 5 menunjukkan hasil pengolahan produk VIL di wilayah Perumahan Sanggulan pada 1 November 2024 pukul 04.30, 04.40, 04.50, 05.00, 05.10, dan 05.20 UTC. Produk VIL digunakan untuk menampilkan estimasi kandungan air pada setiap kolom vertikal awan konvektif sebagai penanda tingkat kejenuhan awan.

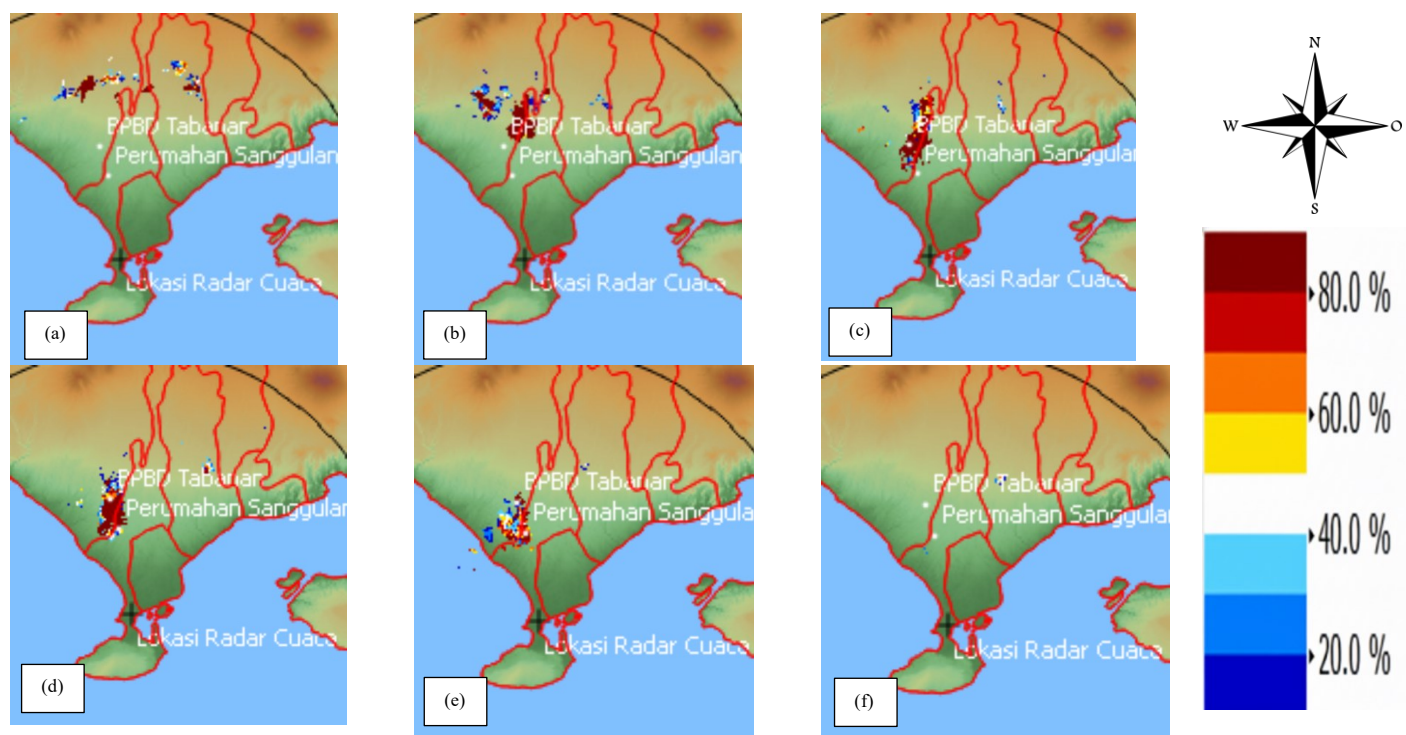


Gambar 5. Nilai kandungan air yang terintegrasi secara vertikal pada pukul 04.30 UTC (a), 04.40 UTC (b), 04.50 UTC (c), 05.00 UTC (d), 05.10 UTC (e), dan 05.20 UTC (f) yang ditampilkan menggunakan produk VIL. Warna jingga pada gambar menunjukkan wilayah dengan nilai kandungan air tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan wilayah dengan nilai kandungan air rendah.

Pada Gambar 5 dapat dilihat produk VIL pada pukul 04.30 UTC mengidentifikasi adanya sistem awan konvektif yang bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan dengan nilai kandungan air mencapai 11.87 mm. Pada pukul 04.40 UTC, sistem awan konvektif dengan nilai kandungan air 10.88 mm telah bergerak ke sekitar wilayah BPBD Tabanan. Pada pukul 05.00 UTC, Sistem awan konvektif mulai memasuki wilayah Perumahan Sanggulan dengan nilai kandungan air mencapai 9.35 mm. Selanjutnya, pada pukul 05.10 UTC, sistem awan konvektif menunjukkan indikasi peluruhan dengan penurunan nilai kandungan air menjadi 8.10 mm. Hingga pukul 05.20 UTC, nilai kandungan air terus menurun dan sistem awan teridentifikasi mulai bergerak menjauhi wilayah Perumahan Sanggulan. Nilai VIL pada pukul 05.00 UTC saat sistem awan konvektif memasuki wilayah Perumahan Sanggulan tercatat di bawah 20 mm, sehingga tidak memenuhi kriteria sebagai fenomena hujan es sebagaimana dinyatakan oleh [22]. Namun demikian, hal ini tidak sepenuhnya meniadakan peluang terjadinya hujan es, karena [14] menyatakan bahwa kandungan air yang relatif rendah tetapi berada di bawah titik beku dalam awan konvektif dapat menyebabkan partikel es tidak sepenuhnya mencair saat mencapai permukaan.

2.4 Probabilitas Terjadinya Hujan Es Berdasarkan Produk Reflectivity-based Hail Warning (ZHAIL)

Gambar 6 menunjukkan hasil pengolahan produk ZHAIL di wilayah Perumahan Sanggulan pada 1 November 2024 pukul 04.30 UTC, 04.40 UTC, 04.50 UTC, 05.00 UTC, 05.10 UTC, dan 05.20 UTC. Produk ZHAIL digunakan untuk menganalisis struktur reflektivitas vertikal di atas lapisan *melting layer*, dengan keluaran berupa persentase probabilitas terjadinya hujan es.



Gambar 6. Persentase probabilitas terjadinya hujan es pada pukul 04.30 UTC (a), 04.40 UTC (b), 04.50 UTC (c), 05.00 UTC (d), 05.10 UTC (e), dan 05.20 UTC (f) yang ditampilkan menggunakan hasil pengolahan produk ZHAIL. Warna merah pada gambar menunjukkan wilayah nilai persentase probabilitas terjadi hujan es tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan wilayah nilai persentase probabilitas terjadi hujan es rendah.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa pada pukul 04.30 UTC, produk ZHAIL dengan *threshold* reflektivitas 48 dBZ mengidentifikasi sistem awan konvektif yang bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan dengan probabilitas hujan es mencapai 100%. Pada pukul 04.40 UTC, sistem tersebut telah bergerak ke sekitar wilayah BPBD Tabanan dengan probabilitas hujan es yang masih berada pada angka 100%. Sistem awan konvektif mulai memasuki wilayah Perumahan Sanggulan pada pukul 04.50 UTC hingga 05.00 UTC dengan probabilitas hujan es tetap sebesar 100%. Pada pukul 05.10 UTC, sistem mulai menunjukkan penurunan intensitas yang ditandai dengan turunnya probabilitas hujan es menjadi 81.89%. Pada pukul 05.20 UTC, tidak teridentifikasi adanya probabilitas kejadian hujan es di wilayah Perumahan Sanggulan. Probabilitas kejadian hujan es yang melebihi 80% menunjukkan potensi terjadinya hujan es pada wilayah tersebut sangat tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh [23], yang menyatakan bahwa fenomena hujan es ditandai dengan nilai probabilitas produk ZHAIL yang melebihi 80%.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan analisis komprehensif terhadap kejadian hujan es yang dilaporkan terjadi di wilayah Perumahan Sanggulan pada tanggal 1 November 2024 dengan menggunakan data Radar Doppler BBMKG Wilayah III Denpasar. Hasil analisis menunjukkan bahwa kejadian hujan es tersebut dipicu oleh keberadaan sistem awan konvektif dengan reflektivitas tinggi yang membentuk pola sebaran *Quasi-Linear Convective System* (QLCS) dan bergerak dari arah utara menuju wilayah Perumahan Sanggulan. Proses *downdraft* yang kuat teridentifikasi dengan jelas melalui citra radar pada pukul 05.10 UTC, yang mengindikasikan turunnya partikel es sebagai presipitasi dalam bentuk es sebelum sempat mencair sepenuhnya. Dengan mempertimbangkan resolusi temporal data radar sebesar 10 menit, kejadian hujan es diperkirakan berlangsung pada rentang waktu 05.00-05.10 UTC. Analisis reflektivitas menggunakan produk CMAX yang di-overlay SSA, VCUT, dan CAPPI menunjukkan nilai reflektivitas tinggi di atas *freezing level* serta area inti awan konvektif (*core*) yang luas, sehingga memenuhi karakteristik kejadian hujan es. Selain itu, produk VIL dan ZHAIL turut memperkuat indikasi tersebut, meskipun nilai VIL relatif lebih rendah dibandingkan *threshold* umum pada kejadian hujan es. Hasil ini menegaskan pentingnya pemantauan radar dengan resolusi tinggi untuk mendeteksi potensi kejadian hujan es secara dini. Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena menggunakan radar cuaca *single polarimetric* yang belum mampu membedakan secara langsung jenis presipitasi, seperti es,

hujan, atau graupel. Oleh karena itu, hasil interpretasi masih bergantung pada pendekatan berbasis reflektivitas dan produk radar cuaca turunan, seperti VIL dan ZHAIL. Penelitian lanjutan dengan radar cuaca *dual polarimetric* diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai struktur mikrofisis awan penyebab hujan es di wilayah tropis.

5. REFERENSI

- [1] T. H. Raupach, O. Martius, J. T. Allen, M. Kunz, S. Lasher-Trapp, S. Mohr, K. L. Rasmussen, R. J. Trapp, dan Q. Zhang, "The Effects of Climate Change on Hailstorms", Springer Nature, vol. 2, hlm. 213-226, Maret 2021.
- [2] G. Hartwig, *The Aerial World*. Frankfurt: Books on Demand, 2023.
- [3] A. B. Sekaranom, *Kejadian Hujan Ekstrem Wilayah Tropis: Kombinasi Observasi Permukaan dan Satelit Meteorologis serta Karakteristik Lingkungan Pembentukannya*. Sleman: Gadjah Mada University Press, 2021.
- [4] J. Yang dan H. Lei, "Idealized Numerical Simulation Experiment of Ice Seeding in Convective Clouds Using a Bin Microphysics Scheme", *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, vol. 15, no. 6, hlm. 1-7, November 2022.
- [5] D. Ardiansyah, "Labilitas Atmosfer Terkait Kejadian Hujan Es (Studi Kasus Hujan Es di Sindang Dataran Bengkulu Tanggal 25 Juni 2021)", *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, vol. 2, no. 2, hlm. 34-48, Maret 2022.
- [6] M. Hamid, I. Dayana, dan N. Si, *Meteorologi*. Medan: Guepedia, 2022.
- [7] Hasan, "Hujan Es Melanda Wilayah Tabanan Bali", *Kompas.com*, November 2024.
- [8] G. Z. Muflih, U. Barokah, R. Zuhdi, T. F. Fathani, dan W. Wilopo, *Buku Panduan Mitigasi Bencana Longsor*. Bantul: Selat Media, 2025.
- [9] A. Ali, "Preliminary Study of a Radio Frequency Interference Filter For Non-Polarimetric C-Band Weather Radar in Indonesia (Case Study: Tangerang Weather Radar)", *Article in International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, vol. 18, No. 2, hlm. 189-202, Desember 2021.
- [10] R. Dara Ninggar, D. Cahaya Siregar, dan I. Fajar Putra Perdana, "Analisis Pola Distribusi Awan Konvektif di Wilayah Provinsi Banten Berbasis Radar Cuaca Convective Cloud Distribution Patterns in Banten Using Weather Radar Data", *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, vol. 4, no. 6, hlm. 35-43, November 2023.
- [11] W. Sulistyono, N. Humairah, dan S. Ramadhan, "Aplikasi Produk Radar C-Band Dalam Identifikasi Awan Penghasil Hujan Es (Studi Kasus: Bogor, 24 Januari 2022)", *Jurnal Pendidikan dan Penelitian Geografi*, vol. 5, no. 2, hlm. 137-143, November 2024.
- [12] J. Paski, D. Permana, S. Prayudha, dan D. Pertiwi, "Pemanfaatan Citra Radar Cuaca Untuk Analisis Kejadian Hujan Es di Surabaya Tanggal 21 Februari 2022", *Jurnal Sains dan Teknologi Atmosfer*, vol. 2, no. 2, hlm. 1-8, Oktober 2022.
- [13] A. Ali, "Analisa Dinamika Atmosfer Fenomena Hujan Es di Jakarta (Studi Kasus Kejadian Hujan Es di Jakarta Tanggal 22 April 2014)", *Konferensi Buletin Meteorologi dan Geofisika Jakarta*, hlm. 1-12, 2014.
- [14] E. Wardoyo, *Radar Meteorologi*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 2017.
- [15] J. E. Nielsen, S. Thorndahl, dan M. R. Rasmussen, "Improving Weather Radar Precipitation Estimates by Combining Two Types of Radars", *Atmospheric Research*, vol. 139, hlm. 36-45, Maret 2014.
- [16] S. Prasetyo, S. Abdilah, I. Nugraheni, dan N. Sagita, "Studi Awan Konvektif Penyebab Hujan Es Menggunakan Radar Cuaca Doppler Single Polarization di Bogor (23 September 2020)", *Jurnal Aplikasi Meteorologi*, vol. 1, no. 1, hlm. 32-42, Mei 2022.
- [17] M. M. Putri, R. I. Nursiddiq, R. M. Fajar, K. T. Adi Putra, I. Redha Nugraheni, dan E. Wardoyo, "Identifikasi Karakteristik Quasi-Linear Convective System pada Maret Sampai Mei 2017 di Wilayah Pangkalan Bun Berbasis Radar Cuaca", *Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya*, hlm. 110-120, 2019.

- [18] K. A. Lombardo dan B. A. Colle, "The Spatial and Temporal Distribution of Organized Convective Structures Over The Northeast and Their Ambient Conditions", *Monthly Weather Review*, vol. 138, no. 12, hlm. 4456–4474, Desember 2010.
- [19] M. Muaya, A. Khoirunnisa, R. U. N. Fadillah, E. Wardoyo, dan F. P. Sari, "Modifikasi Metode Waldvogel Berdasarkan Identifikasi Karakteristik Hujan Es yang Dikelompokkan Berdasarkan Jarak Cakupan Radar Cuaca Pada Radar Cuaca Jakarta Tahun 2010-2019", *Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya*, hlm. 69-81, 2019.
- [20] A. D. Nugroho dan A. Fadlan, "Analisis Kejadian Hujan Es Berdasarkan Kondisi Atmosfer dan Citra Satelit Himawari-8 (Studi Kasus: Magelang, 24 Januari 2018)", *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, vol. 02, No. 02, hlm. 80-87, 2018.
- [21] R. A. Dwianda dan M. Marzuki, "Karakteristik Ketinggian Melting Layer di Indonesia Berdasarkan Radar Hujan yang Terpasang di Satelit TRMM", *Jurnal Ilmu Fisika*, vol. 10, no. 2, hlm. 73–82, Oktober 2018.
- [22] D. H. Kitzmiller, W. E. McGovern, dan R. E. Saffle, "The WSR-88D Severe Weather Potential Algorithm", *Weather Forecast*, vol. 10, hlm. 141–159, Maret 1995.
- [23] L. Nisi, O. Martius, A. Hering, M. Kunz, dan U. Germann, "Spatial and Temporal Distribution Of Hailstorms In The Alpine Region: A Long-Term, High Resolution, Radar-Based Analysis", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 142, no. 697, hlm. 1590–1604, April 2016.