

Pemanfaatan Radar Cuaca, Satelit, dan Model ECMWF dalam Analisis Kondisi Atmosfer saat Kejadian Hujan Es (Hail) (Studi Kasus: Hujan Es Kota Depok 28 Oktober 2024)

Utilisation of Weather Radar, Satellites, and ECMWF Models in Analysing Atmospheric Conditions during Hail Events (Case Study: Hail in Depok City on 28 October 2024)

Pertiwi Risky Setyowatri¹, Muhizzadin Abdul Adzan^{1*}, Ogi Rahmawan Adi Saputro¹, Achmad Zakir¹, Aditya Mulya¹

¹Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Kota Tangerang, Banten, Indonesia

Email: pertiwirisky118@gmail.com, *muhizzadin12@gmail.com, Ogiras13@gmail.com, achmadzakir@yahoo.com, aditya.mulya@stmkg.ac.id

Received: 18th January 2026; Revised: 02nd February 2026; Accepted: 07th March 2026

Abstrak – Hujan es (hail) merupakan presipitasi berupa partikel es yang terbentuk dari puncak awan konvektif intens yang turun ke permukaan sebelum sempat mencair. Frekuensi hujan es cukup jarang terjadi di wilayah tropis dibandingkan presipitasi berupa hujan, namun berpotensi menyebabkan kerusakan properti dan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis proses atmosfer pada hujan es yang terjadi di Depok pada 28 Oktober 2024 melalui pendekatan multi-instrumentasi berbasis radar cuaca, citra satelit Himawari-9 RGB day microphysics, serta data model ECMWF. Hasil menunjukkan perkembangan awan cumulonimbus (Cb) dengan reflektivitas >55 dBZ pada pukul 08.18 UTC di Kelurahan Bojong Pondok Terong dan Kalimulya serta pada pukul 08.42 UTC di Kelurahan Pancoran Mas. Terdapat kemunculan struktur weak echo region dan overhang echo yang mengindikasikan updraft kuat, nilai VIL >20 mm, serta probabilitas hujan es (ZHAIL) >80%. RGB day microphysics mengonfirmasi keberadaan awan Cb yang dingin, tebal, dan intens di Depok melalui dominasi warna jingga-kemerahan dan indikasi overshooting top pada pukul 08.20 - 08.50 UTC. Selain itu, ECMWF memperlihatkan kelembapan tinggi pada lapisan 980 - 590 mb dan pola vertical velocity yang mendukung updraft hingga pembentukan downdraft pembawa hujan es. Temuan ini diharapkan memperkaya pemahaman komprehensif mengenai fenomena hujan es di Indonesia, juga menambah catatan historis yang sangat dibutuhkan untuk meningkatkan penentuan threshold operasional sehingga mampu menghasilkan prediksi yang lebih akurat, serta memperkuat upaya mitigasi di masa mendatang.

Kata kunci: Hujan es; radar cuaca; RGB day microphysics; ECMWF; Depok.

Abstract – Hail is precipitation in the form of ice particles that form from the tops of intense convective clouds and fall to the surface before they have time to melt. Hail is relatively rare in tropical regions compared to rainfall, but it has the potential to cause damage to property and infrastructure. This study aims to analyze the atmospheric processes involved in the hail that occurred in Depok on October 28, 2024, using a multi-instrument approach based on weather radar, Himawari-9 RGB day microphysics satellite imagery, and ECMWF model data. The results show the development of cumulonimbus (Cb) clouds with reflectivity >55 dBZ at 08:18 UTC in the Bojong Pondok Terong and Kalimulya sub-districts and at 08:42 UTC in the Pancoran Mas sub-district. There was the emergence of weak echo region and overhang echo structures indicating strong updrafts, VIL values >20 mm, and a probability of hail (ZHAIL) >80%. RGB day microphysics confirmed the presence of cold, thick, and intense Cb clouds in Depok through the dominance of orange-red colors and indications of overshooting tops at 08:20 - 08:50 UTC. In addition, ECMWF shows high humidity at the 980 - 590 mb layer and a vertical velocity pattern that supports updrafts to the formation of downdrafts carrying hail. These findings are expected to enrich the comprehensive understanding of the hail phenomenon in Indonesia and to add much-needed historical

records to improve operational threshold determination, thereby producing more accurate predictions and strengthening future mitigation efforts.

Keywords: *Hail; weather radar; RGB day microphysics; ECMWF; Depok.*

1. Pendahuluan

Hujan es atau *hail* merupakan bentuk presipitasi padat dengan diameter 5-50 mm yang terbentuk di dalam awan konvektif dengan intensitas kuat khususnya pada awan cumulonimbus (Cb) [1]. Pertumbuhan awan konvektif Cb di suatu wilayah yang menjulang tinggi hingga lapisan *tropopause* menunjukkan adanya *updraft* yang kuat [2]. Hal tersebut memungkinkan butiran es kecil terbawa naik turun berulang kali melewati lapisan *freezing level* [3]. Proses ini mendorong terjadinya proses *riming* dan *accretion* sehingga ukuran partikel es meningkat hingga akhirnya jatuh ke permukaan bumi sebagai *hailstone* [1].

Hujan es umumnya terjadi pada wilayah yang memiliki ketinggian *freezing level* relatif rendah. Presipitasi yang terbentuk di dalam awan Cb akan turun melewati lapisan atmosfer dan mengalami proses pelelehan serta interaksi dengan partikel udara. Namun, apabila ketinggian *freezing level* cukup rendah, butiran tersebut tidak sepenuhnya mencair sebelum mencapai permukaan sehingga tetap berbentuk batuan es atau *hailstone* [4].

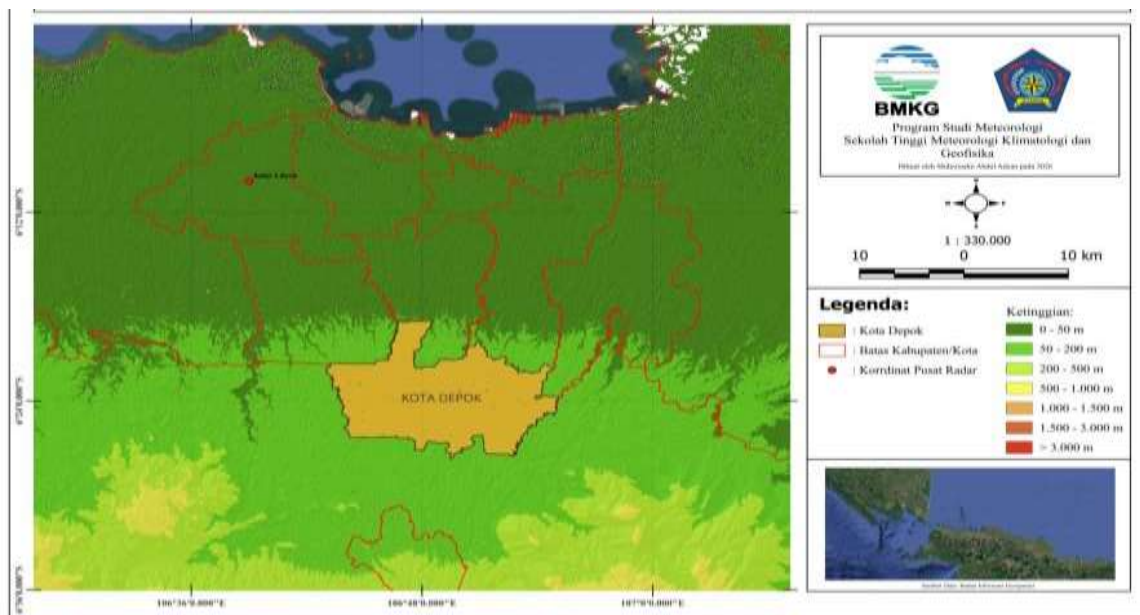
Indonesia berada di wilayah tropis lebih dominan menghasilkan presipitasi dalam bentuk cair tetap dapat terjadi presipitasi padat berupa hujan es apabila berada pada kondisi atmosfer dan lingkungan yang mendukung, seperti hujan es di Depok pada 28 Oktober 2024. Kejadian hujan es bersifat lokal dan terjadi dalam waktu relatif singkat sekitar kurang dari satu jam [5]. Walaupun hanya terjadi dalam waktu yang relatif singkat, hujan es dapat menimbulkan kerugian signifikan dan dapat mengganggu aktifitas masyarakat. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai proses pembentukannya sangat penting untuk mendukung peningkatan keakuratan prediksi dan mitigasi terhadap dampak hujan es.

Untuk menganalisis karakteristik awan Cb sebagai penghasil hujan es secara lebih detail, radar cuaca menjadi instrumen yang dapat menggambarkan struktur vertikal dan intensitas reflektivitas. Nilai reflektivitas yang mencapai >55 dBz serta berada di atas lapisan *freezing level* menjadi indikasi awal potensi terjadinya hujan es. Penelitian terkait hujan es di Bandung menunjukkan reflektivitas >60 dBz terdeteksi berasosiasi dengan pertumbuhan awan konvektif [6]. Selain radar cuaca, citra satelit Himawari-9 dengan teknik *RGB microphysics* juga dapat memberikan informasi mengenai fase awan, ukuran partikel, serta suhu puncak awan yang mendukung pembentukan hujan es [7]. Selain itu, data *reanalysis European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF) dapat memberikan gambaran terkait kondisi atmosfer yang terjadi seperti kelembapan relatif, stabilitas atmosfer, serta *vertical velocity*. Dalam mendukung pemanfaatan data ECMWF, terdapat penelitian yang menunjukkan bahwa *vertical velocity* yang kuat dan *relative humidity* troposfer tengah merupakan faktor penting yang mendukung kejadian hujan es di Jakarta pada tahun 2022 [8].

Berbagai penelitian mengenai hujan es telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan radar dan citra satelit. Terdapat penelitian sebelumnya yang mengidentifikasi bahwa kejadian hujan es di Bogor pada tanggal 23 September 2020 ditemukan partikel es di dalam awan yang ditandai dengan pola *three body scatter spike* pada citra radar [9]. Terdapat penelitian lainnya yang menunjukkan reflektivitas yang sangat tinggi >60 dBz serta suhu puncak awan yang mencapai -70 °C merupakan ciri utama awan Cb yang menghasilkan hujan es yang terjadi di Bandung pada tanggal 3 Mei 2017 [6]. Selain itu, terdapat penggunaan yang menggunakan citra satelit dengan metode RGB yang dapat memberikan gambaran adanya awan konvektif Cb saat kejadian hujan es yang terjadi di Malang pada 2 Maret 2021 [3]. Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan tiga jenis data yang berbeda yaitu citra radar, satelit Himawari 9 dengan metode RGB, dan data reanalisis ECMWF berupa *relative humidity* dan *vertical velocity* untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik atmosfer dan proses mikrofisika yang berkontribusi pada terjadinya hujan es di Depok.

2. Material Dan Metode

Lokus penelitian hujan es dilakukan di wilayah Depok. Fenomena hujan es dilaporkan terjadi pada 28 Oktober 2024 di beberapa wilayah Depok, Provinsi Jawa Barat. Berdasarkan letak astronomisnya, Depok terletak pada koordinat -6.402905 LS dan 106.778419 BT seperti yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokus penelitian kejadian hujan es di wilayah Depok.

Terdapat tiga sumber data yang digunakan dalam penelitian ini yakni data radar cuaca *doppler*, data satelit Himawari-9, dan data model ECMWF. Data radar cuaca *doppler* (DWR) yang digunakan yaitu radar *EEC C-Band Doppler* Tangerang yang diperoleh dari Stasiun Meteorologi Kelas 1 Soekarno-Hatta Cengkareng dengan format *.vol serta memiliki cakupan wilayah Banten, Jakarta dan beberapa wilayah Jawa Barat. Data kedua yang digunakan yaitu data satelit Himawari-9 yang berupa *band* VIS0.8 μm , NIR3.9 μm , dan IR10.8 μm yang diperoleh dari data BMKG (www.satelit.bmkg.go.id). Selain itu, data Model ECMWF berupa data *relative humidity* dan *vertical velocity* yang diperoleh melalui <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Pengolahan data radar menggunakan *RainDART* yang terintegrasi dengan radar cuaca Gematronik yang dapat digunakan untuk menganalisis dan mengolah data radar saat kondisi meteorologi tertentu, seperti hujan es [9]. *RainDART* memiliki alat yang dapat digunakan oleh pengguna dan visualisasi peta 2D/3D yang memudahkan interpretasi data radar serta memungkinkan untuk menganalisis fenomena tertentu secara *real-time*. Pada penelitian ini menggunakan produk MAX dan VCUT dalam melihat nilai reflektivitas dan cross section dari sistem awan Cb yang menyebabkan hujan es. Selain itu, digunakan juga produk Zhail dan VIL dalam mengidentifikasi potensi hujan es yang terjadi.

Data satelit Himawari-9 diolah menggunakan *SATAID (Satellite Animation and Interactive Diagnosis)*. Hasil pengolahan data satelit yaitu produk berupa peta *RGB Day Microphysics* dengan pengaturan *red (Band 4, 0.8 μm)*, *green (Band 7 solar component, 3.9 μm)*, *blue (Band 13, 0.8 μm reverse)* untuk analisis pola spasial awan dengan interpretasi warna [10]. Penggunaan *SATAID* untuk menganalisis awan pada fenomena hujan es dengan memastikan adanya awan Cb yang sangat dingin, tebal, serta *updraft* yang kuat yang mengandung partikel es di lokasi penelitian [6].

Metode selanjutnya untuk identifikasi hujan es di Kota Depok yaitu penggunaan data model ECMWF dengan resolusi $0.125^\circ \times 0.125^\circ$. Parameter yang digunakan yakni data *relative humidity (%)* dan *vertical velocity (Pa/s)* pada lapisan 2, 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 850, 900, 925, dan 1000 mb. Parameter tersebut kemudian diolah dan divisualisasikan dengan menggunakan software *GrADS (The Grid Analysis and Display System)*.

3. Hasil Dan Pembahasan

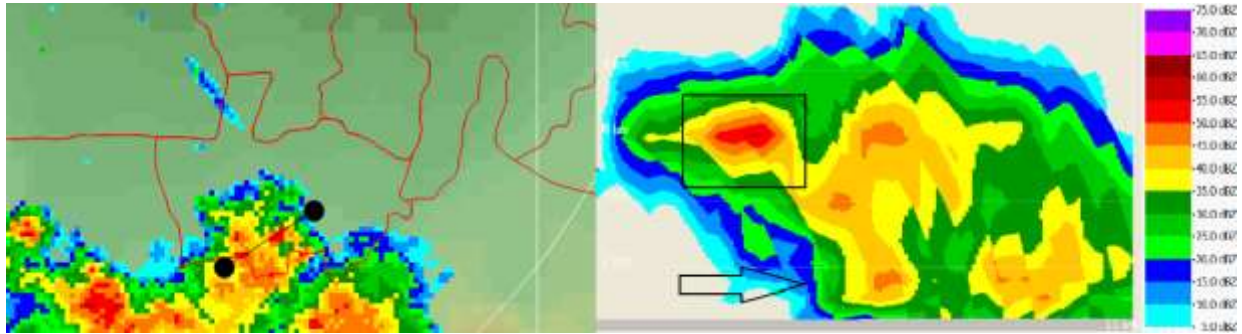
3.1 Analisis menggunakan citra radar

a). Analisis menggunakan CMAX dan VCUT

Fenomena hujan es dapat terjadi pada awan-awan konvektif. Awan konvektif merupakan awan yang terbentuk akibat adanya pemanasan yang intens di permukaan maupun akibat pengangkatan secara mekanis sehingga udara hangat dapat terangkat hingga lapisan atas dan menciptakan awan-awan towering

seperti awan Cb [11]. Mekanisme pertumbuhan dan siklus hidup awan konvektif seperti Cb dapat dibagi menjadi 3 yakni *cumulus stage*, *mature stage*, dan *dissipation stage* [12].

Tahap pertumbuhan (*cumulus stage*) awan konvektif sendiri dicirikan dengan adanya dominasi arus udara naik (*updraft*) yang membawa udara hangat dan lembab ke lapisan atmosfer atas. Berdasarkan hasil pengolahan citra radar, tahap pertumbuhan (*cumulus stage*) awan konvektif saat memasuki wilayah Depok diperkirakan mulai terjadi pada pukul 08.02 hingga 08.10 UTC dengan nilai reflektivitas dominan yakni 5 hingga 50 dBZ. Gambar 2 menunjukkan tahap pertumbuhan awan konvektif yang cukup signifikan berdasarkan peningkatan reflektivitas yang dihasilkan.



Gambar 2. Reflektivitas maksimum fase pertumbuhan awan konvektif pukul 08.10 UTC yang ditandai dengan pola *weak echo region* (tanda panah) dan *overhang echo* (kotak hitam).

Pada fase pertumbuhan, terdapat pola berupa *weak echo region* (WER) dan *overhang echo* (OE) dari hasil penginderaan radar menggunakan VCUT 08.10 UTC pada Gambar 2. Pola echo dari WER dan OE dapat digunakan dalam mengidentifikasi fase perkembangan dari awan konvektif karena menggambarkan aliran *updraft*. Pola WER memiliki karakteristik berupa wilayah dengan tingkat reflektivitas yang rendah di sekitar wilayah dengan reflektivitas tinggi pada bagian atasnya serta berada di bawah dari udara masuk atau inflow pada sel konvektif [13,14]. Pola tersebut dapat terjadi karena aliran *updraft* membawa tetesan hujan yang memiliki reflektivitas tinggi dan menyisakan beberapa partikel dengan konsentrasi yang lebih sedikit sehingga nilai reflektivitasnya menjadi rendah. Selain itu, terdapat pola OE yang memiliki karakteristik nilai reflektivitas yang tinggi serta berada di atas dari WER akibat perpindahan tetesan hujan oleh *updraft* [9,15].

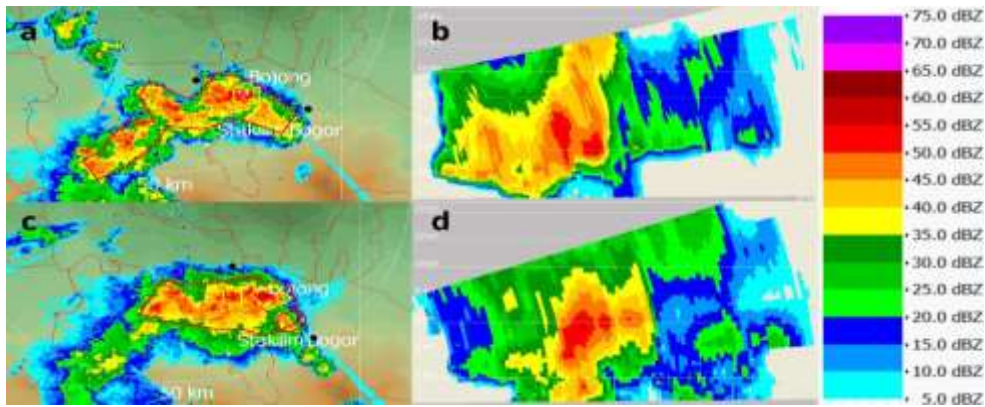
Pada tahap *mature stage*, kondisi atmosfer dapat diidentifikasi dengan adanya aliran *updraft* dan *downdraft* pada sistem awan Cb serta tetesan *supercooled water* dan partikel es yang tetap berada di atas *freezing level*. Keberadaan partikel es di atas awan dapat dicirikan dengan adanya reflektivitas yang besar akibat adanya partikel es di dalam awan Cb tersebut. Keberadaan partikel es ini dapat terus tumbuh karena mekanisme *updraft* yang terjadi di dalam sistem awan. Pengangkatan oleh *updraft* terhadap beberapa partikel hidrometeorologi dapat berperan dalam menjadi inti es dan *supercooled water* sehingga dapat menjadi es pada lapisan di atas *freezing level* [8]. Partikel es yang telah terbentuk akan mengalami *updraft* dan *downdraft* sehingga dapat mengalami proses *riming* dan *aggregation* yakni interaksi partikel es dengan *supercooled water* atau partikel es lainnya sehingga menambah densitas dari partikel es tersebut. Partikel es yang telah berukuran besar akan mengalami gaya gravitasi akibat penambahan densitas yang tidak dapat diangkat oleh *updraft* yang dikenal dengan hujan es (*hail*) [16].

Pada Gambar 3 menunjukkan tahap matang (*mature stage*) yang terjadi pada pukul 08.18 dan 08.42 UTC. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai reflektivitas yang mencapai nilai tertinggi dibandingkan beberapa waktu sebelumnya di beberapa lokasi tersebut. Pada tahap tersebut, khususnya pada pukul 08.18 dan 08.42 UTC, nilai reflektivitas di wilayah Kota Depok dapat mencapai > 55 dBZ. Hujan es sedikit dicirikan dengan nilai reflektivitas > 55 dBZ, terutama ketika berada di atas *freezing levels* [17].

Pada pukul 08.18 UTC, nilai reflektivitas maksimum mencapai 59,5 dBZ dengan ketinggian minimal sekitar 2,56 km serta maksimal sekitar 8,12 km yang berada di dua wilayah, yakni Kelurahan Bojong Pondok Terong dan Kalimulya. Selain itu, pada pukul 08.42, nilai reflektivitas maksimum mencapai 59,5 dBZ dengan ketinggian minimal sekitar 2,56 km serta maksimal sekitar 8,12 km yang juga terjadi di sekitar Kelurahan Pancoran Mas, Depok.

Terdapat penelitian yang menunjukkan bahwa ketinggian *freezing levels* dengan radiosonde di Cengkareng (wilayah dengan pengamatan udara atas terdekat dengan Depok) menunjukkan ketinggian

sekitar 4,7 km hingga 4,9 km [18]. Berdasarkan nilai refektifitas serta ketinggian yang berada di atas *freezing level* tersebut, partikel es berpotensi terbentuk di atmosfer pada pukul 08.18 UTC dan 08.42 UTC di beberapa wilayah tersebut. Akan tetapi, berdasarkan ketinggian dari refektivitas maksimum di wilayah Kalimulya, ketinggian refektivitas maksimum berada sekitar di bawah *freezing levels* yang dapat diakibatkan oleh limitasi radar, terutama resolusi temporal yang per 8 menit. Hal berpotensi tidak tertangkapnya refektifitas maksimum akibat hujan es yang terjadi dengan cepat.



Gambar 3. Reflektivitas maksimum di wilayah Depok pada fase matang dengan (a) produk MAX 08.18 UTC, (b) produk *vertikal cross-section* 08.18 UTC, (c) produk MAX 08.42 UTC, dan (d) produk *vertikal cross-section* 08.42 UTC.

b). Analisis berdasarkan produk VIL dan ZHAIL

Selain menggunakan nilai reflektivitas maksimum dalam melakukan identifikasi potensi kejadian es di wilayah Depok, digunakan juga beberapa metode dalam mengidentifikasi kejadian hujan es di suatu wilayah. Penggunaan beberapa metode tersebut dilakukan untuk dapat memahami kejadian hujan es dengan lebih komprehensif dengan menggunakan beberapa produk radar cuaca. Beberapa metode yang digunakan dalam mengidentifikasi kejadian hujan es yakni *vertical integrated liquid* (VIL) serta *hail detection* (ZHAIL).

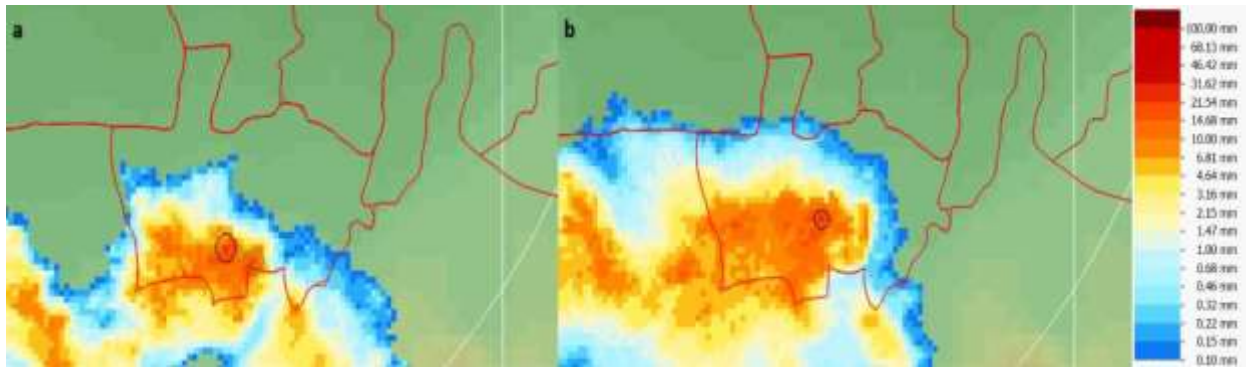
VIL merupakan representasi dari jumlah total air cair yang terdapat pada kolom udara di atas sebuah wilayah di atmosfer. VIL merupakan salah satu produk radar yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi potensi kejadian hujan es di suatu wilayah [9]. Beberapa penelitian mengidentifikasi threshold dari VIL sekitar lebih dari 20 mm atau 20 kg/m² dapat berpotensi mendukung hujan es di atmosfer, khususnya jika berada di atas *freezing level* [9,19].

Gambar 4 tersebut menunjukkan nilai VIL maksimum yang terjadi pada wilayah Kelurahan Bojong Pondok Terong, Kalimulya, dan Pancoran Mas, Depok. Gambar 4(a) menunjukkan nilai VIL maksimum pada wilayah Bojong Pondok Terong (lingkaran hitam) dan Kalimulya (lingkaran hijau) pada 08.18 UTC dengan nilai VIL maksimum Bojong Pondok Terong dan Kalimulya secara berurutan, yakni 24.13 mm dan 17.22 mm. Selain itu, Gambar 4(b) menunjukkan nilai VIL maksimum pada wilayah Pancoran Mas (lingkaran hitam) pada 08.42 UTC dengan nilai VIL maksimum yakni 21.58 mm. Berdasarkan nilai VIL maksimum tersebut, nilai VIL Kalimulya tidak memenuhi ambang batas tersebut. Hal tersebut kemungkinan dapat diakibatkan oleh limitasi radar, terutama akibat resolusi temporal per 8 menit, sehingga tidak dapat menangkap VIL ketika mencapai nilai terbesarnya.

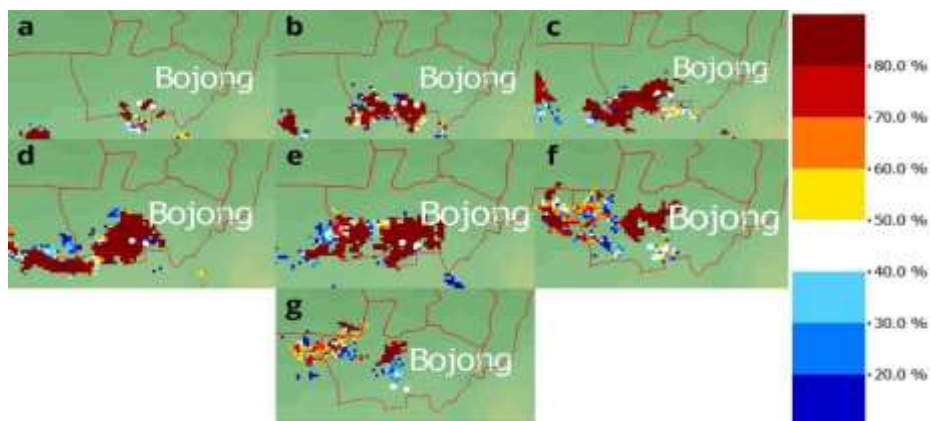
Selain menggunakan VIL, digunakan juga metode ZHAIL dalam mengidentifikasi potensi kejadian hujan es di wilayah Depok karena kemampuannya dalam mengidentifikasi probabilitas pembentukan hujan es di suatu wilayah [9]. Gambar 5 merupakan ZHAIL di wilayah Depok pada pukul 08.10 hingga 08.58 UTC. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diidentifikasi bahwa pada pukul 08.10 UTC telah terdapat probabilitas hujan es sebesar > 80% di sebagian kecil wilayah Depok. Nilai probabilitas ZHAIL yang mencapai > 80% teramati dari pukul 08.10 hingga 08.58 UTC dengan luasan terbesar terjadi pada pukul 08.34 hingga 08.42 UTC.

Wilayah Kelurahan Bojong Pondok Terong dan Kelurahan Kalimulya yang sebelumnya memiliki nilai refektifitas > 55 dBZ, memiliki probabilitas ZHAIL > 80% pada pukul 08.18, 08.26, 08.34, dan 08.42 UTC. Selain itu, wilayah Kelurahan Pancoran Mas yang juga sebelumnya memiliki nilai refektifitas > 55

dBZ, memiliki propabilitas ZHAIL > 80% pada pukul 08.42 UTC. Hal tersebut dapat mendukung kejadian hujan es di wilayah tersebut. Akan tetapi, penggunaan metode ZHAIL dapat *overestimate* terhadap persentase atau propabilitas yang dihasilkan [9].



Gambar 4. Nilai VIL maksimum di wilayah (a) Bojong Pondok Terong (lingkaran hitam) dan Kalimulya (lingkaran hijau) pada 08.18 UTC serta (b) Pancoran Mas (lingkaran hitam) pada 08.42 UTC.

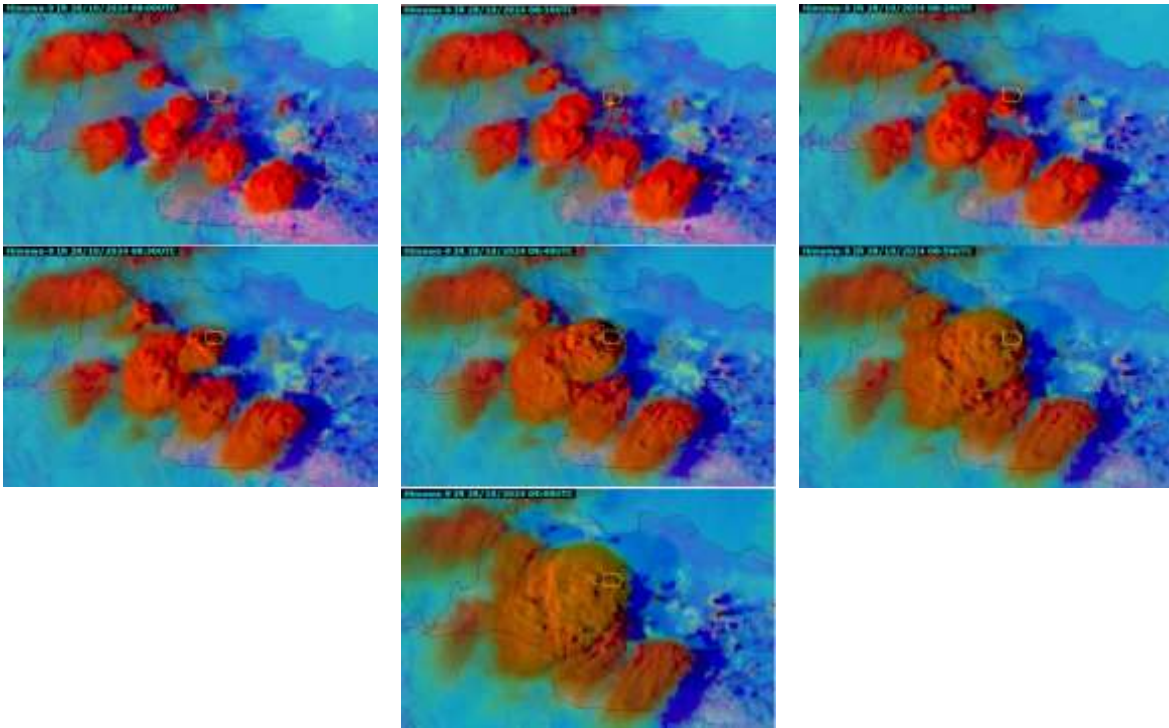


Gambar 5. Nilai ZHAIL di wilayah Depok pada (a) 08.10 UTC, (b) 08.18 UTC, (c) 08.26 UTC, (d) 08.34 UTC, (e) 08.42 UTC, (f) 08.50 UTC, dan (g) 08.58 UTC.

3.2 Analisis berdasarkan citra satelit Himawari-9

Selain melakukan identifikasi dan analisis kondisi atmosfer saat kejadian hujan es di wilayah Depok menggunakan radar cuaca, khususnya radar EEC C-Band Doppler, identifikasi dan analisis kejadian es dapat dilakukan menggunakan citra satelit Himawari [6]. Identifikasi dan analisis kondisi atmosfer menggunakan data citra satelit Himawari-9 dapat dilakukan menggunakan produk *RGB Day Microphysics*. Produk *RGB day microphysics* memiliki kelebihan dalam menganalisis mikrofisis awan konvektif serta menganalisis ketebalan awan dan partikel penyusun awan seperti es [6]. Penggambaran mikrofisis awan mencakup proses pelepasan panas laten ketika uap air berubah menjadi inti kondensasi dan tetes air, serta penyerapan molekul air oleh inti kondensasi dan penggabungan tetes air dalam awan. Proses ini secara signifikan menunjukkan pertumbuhan awan Cb yang kuat.

Produk *RGB Day Microphysics* menggunakan satelit Himawari-9 dengan 3 kanal. Pengaturan tersebut menggunakan kanal *red* (*band 4*, 0.8 μm), *green* (*band 7 solar component*, 3.9 μm), dan *blue* (*band 13*, 0.8 $\mu\text{m reverse}$) dengan penentuan gamma yakni *red* (1), *green* (2.5), dan *blue* (1). Hasil dari visualisasi peta *RGB Day Microphysics* dapat mendeskripsikan kondisi mikrofisis dalam sebuah awan konvektif. Warna jingga menunjukkan kondisi awan konvektif seperti Cb yang memiliki suhu dingin, tebal, serta memiliki arus *updraft* yang intens dan tersusun atas partikel es. Warna cokelat kehijauan menunjukkan struktur awan cirrus yang tipis. Warna merah menunjukkan pertumbuhan awan menjadi awan yang lebih intens dan besar. Selain itu, melalui produk *RGB day microphysics* dapat dianalisis struktur dari awan konvektif seperti *overshooting top* yang berwarna sedikit jingga dan tekstur yang cembung pada puncak awan.



Gambar 6. Peta *RGB day microphysics* pertumbuhan awan konvektif dari fase pertumbuhan hingga mendekati purnah (08.00 – 09.00 UTC) dari citra satelit Himawari-9 di wilayah Depok.

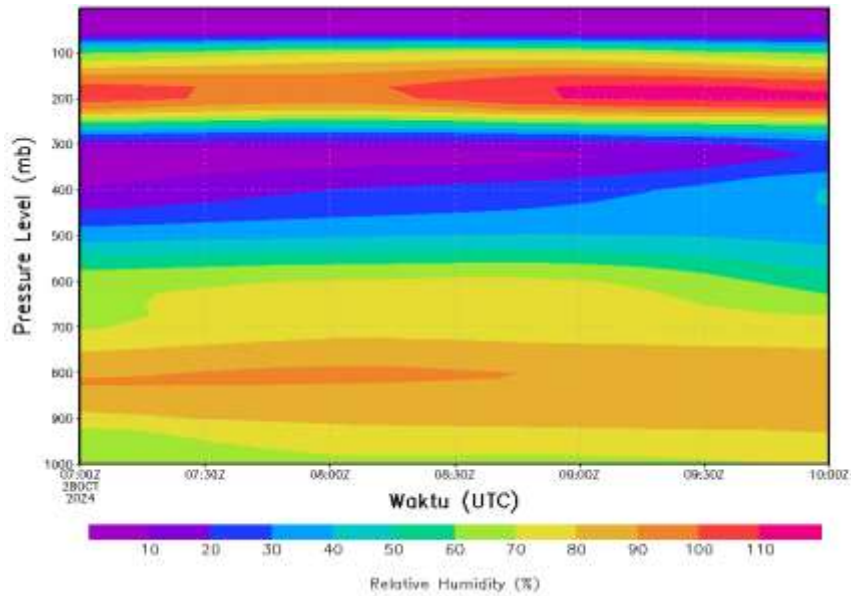
Berdasarkan peta *RGB day microphysics* di wilayah Depok yang berupa kotak kuning pada Gambar 6. Dapat dilihat bahwa pada pukul 08.00 UTC pertumbuhan awan konvektif belum terlihat di atas wilayah Depok. Pada jam 08.10 UTC mulai terlihat pertumbuhan awan konvektif yang diidentifikasi berwarna jingga kemerahan pada kotak kuning. Pada pukul 08.20 UTC hingga pukul 08.50 UTC terlihat awan yang berwarna jingga mulai menutupi wilayah Depok yang dapat mengidentifikasi pembentukan awan Cb yang memiliki suhu dingin, tebal, serta memiliki arus *updraft* yang intens dan dapat tersusun atas partikel es. Pada pukul tersebut, dapat diamati terdapat tekstur cembung pada puncak awan yang dapat mengidentifikasi adanya *overshooting top* pada waktu tersebut. Hal serupa juga ditunjukkan pada citra radar dimana pada kondisi tersebut, reflektivitas mencapai kondisi maksimum dengan intensitas > 55 dBZ. Pada pukul 09.00, terlihat awan berwarna kecoklatan dengan struktur awan yang terlihat meluas dengan *overshooting top* yang mulai berkurang, sehingga mengidentifikasi *updraft* yang berkurang dan mulai membentuk awan-awan sisa dari Cb.

3.3 Analisis berdasarkan model ECMWF

a). *Relative humidity*

Kelembaban relatif atau *relative humidity* (RH) merupakan parameter yang menggambarkan jumlah uap air di udara dibandingkan dengan jumlah maksimum uap air yang dapat ditampung udara pada suhu tertentu. Grafik RH dalam fenomena hujan es sangat penting karena memberikan informasi tentang ketersediaan uap air sebagai bahan bakar pembentukan awan konvektif. Berdasarkan data reanalisis ECMWF, kelembaban relatif pada lapisan atmosfer dianalisis secara vertikal dari permukaan hingga 100-an mb.

Berdasarkan Gambar 7 yang menggambarkan *relative humidity* di wilayah Depok. Kelembapan udara terutama pada lapisan bawah hingga menengah (sekitar 950 - 570 mb) didominasi dengan kelembapan yang cukup tinggi yakni 60% - 100%. Nilai kelembapan tertinggi berada pada ketinggian sekitar 900 - 720 mb dengan nilai mencapai 80 hingga 100%. Kondisi ini mendukung *updraft* udara lembab ke lapisan atmosfer yang lebih tinggi, memfasilitasi proses kondensasi dan pembentukan awan Cb. Hal ini sesuai dengan karakteristik atmosfer yang *unstable* dan kaya akan uap air.

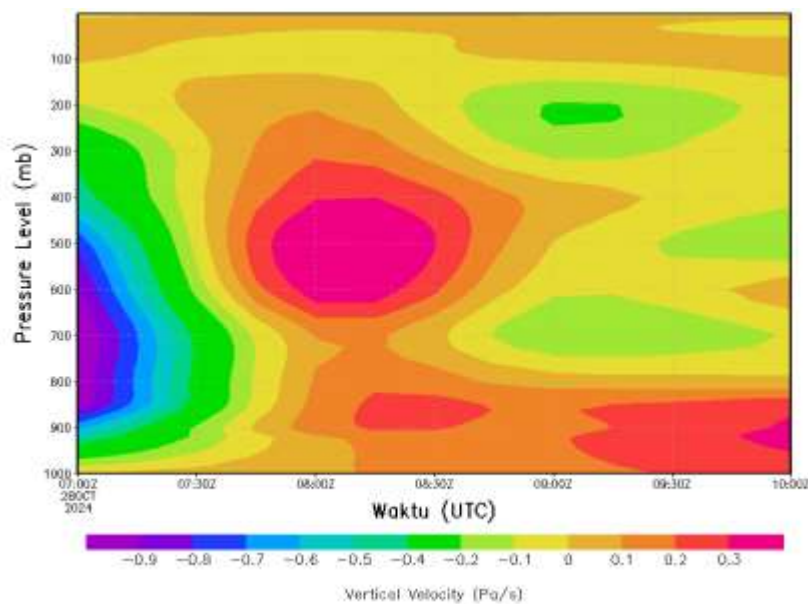


Gambar 7. Grafik *hovmoller relative humidity* di wilayah Depok.

Kelembaban relatif atmosfer pada saat nilai reflektivitas radar maksimum (08.18 UTC dan 08.42 UTC) mencapai 90 hingga 100% terutama pada lapisan bawah (sekitar 920 - 790 mb). Hal tersebut mendukung keberlimpahan uap air sebagai salah satu bahan bakar pembentukan sistem konvektif. Selain itu, kelembaban yang tinggi hingga mencapai lapisan menengah serta berada di atas lapisan *freezing levels* mendukung terjadinya pertumbuhan partikel es di dalam awan Cb [20].

b). Vertical velocity

Profil *vertical velocity* merupakan visualisasi distribusi pergerakan parcel udara yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi stabilitas atmosfer secara vertikal. Data ECMWF terutama *vertical velocity* menggunakan komposisi koordinat secara vertikal dalam melihat perubahan tekanan. Nilai negatif mengidentifikasi distribusi suatu partikel yang mengalami pengangkatan (*updraft*). Selain itu, nilai positif merepresentasikan distribusi suatu partikel di atmosfer yang cenderung mengalami penurunan (*downdraft*) [21]. *Vertical velocity* umumnya menggunakan satuan Pa/s yang menunjukkan perubahan tekanan udara (Pascal) per satuan waktu (s).



Gambar 8. Grafik *hovmoller vertical velocity* di wilayah Depok.

Gambar 8 merupakan *vertikal velocity* di wilayah Depok pada lapisan 1000 - 2 mb yang digambarkan pada diagram *hovmoller*. Berdasarkan gambar tersebut, dapat diidentifikasi bahwa selama pengamatan hingga pukul 08.00 UTC, kondisi atmosfer memiliki *vertikal velocity* yang negatif. Nilai *vertikal velocity* tersebut berada pada hampir di setiap lapisan (permukaan hingga atas) dengan nilai kurang dari (-0,9) Pa/s hingga 0 Pa/s. Pada tahap tersebut, nilai *vertikal velocity* yang negatif mengindikasikan terdapat aliran *updraft* yang mendukung kondisi atmosfer *unstable*, serta membawa sumber kelembaban hingga lapisan menengah dan atas sehingga mendukung pertumbuhan awan-awan konvektif [22].

Pada saat nilai reflektivitas radar maksimum (08.18 UTC dan 08.42 UTC), *vertikal velocity* yang bernilai positif mendominasi yakni 0 Pa/s hingga lebih dari 0,3 Pa/s. Hal tersebut mengidentifikasi terdapat aliran *downdraft* pada sistem awan konvektif tersebut, terutama pada lapisan menengah (di atas *freezing levels*) dengan *vertikal velocity* lebih dari 0,3 Pa/s. Hal tersebut merepresentasikan telah terdapat pergerakan partikel ke lapisan bawah yang dapat berupa hujan maupun hujan es [22]. Setelah melewati tahap matang, *vertikal velocity* didominasi dengan *downdraft* di lapisan bawah serta *updraft* di lapisan atasnya. Nilai *vertikal velocity* yang bernilai positif pada lapisan bawah dapat merepresentasikan jatuhnya hujan dalam bentuk cair karena berada di bawah lapisan *freezing levels* dari awan konvektif yang telah terbentuk.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis multi-instrumentasi menggunakan radar cuaca, satelit Himawari-9, dan data ECMWF, kejadian hujan es di Depok pada 28 Oktober 2024 berkaitan erat dengan perkembangan signifikan awan cumulonimbus (Cb). Radar cuaca mencatat reflektivitas maksimum >55 dBZ di tiga wilayah, yakni Pondok Terong dan Kalimulya pada pukul 08.18 UTC serta Pancoran Mas pada pukul 08.42 UTC, yang mengindikasikan keberadaan partikel es di dalam awan, meskipun beberapa parameter seperti ketinggian dan VIL tidak sepenuhnya terpenuhi akibat keterbatasan radar. Deteksi pola *weak echo region* (WER) dan *overhang echo* (OE) pada fase pertumbuhan menunjukkan adanya *updraft* kuat yang mendukung pembentukan dan penguatan awan Cb. *RGB day microphysics* Himawari-9 memperlihatkan pertumbuhan awan Cb dengan indikasi potensi partikel es pada rentang waktu 08.20–08.50 UTC. Temuan tersebut diperkuat oleh data ECMWF yang menunjukkan kelembapan relatif >70% pada lapisan 980 - 590 mb, *vertikal velocity* negatif pada fase pertumbuhan yang mendukung penguatan konveksi, serta *vertikal velocity* positif pada fase matang yang merepresentasikan *downdraft* berupa hujan dan hujan es. Kombinasi kondisi termodinamika yang lembap, *updraft* kuat, dan dinamika awan konvektif yang intens menegaskan bahwa hujan es di Depok merupakan hasil langsung dari aktivitas awan Cb.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), serta Copernicus Programme atas ketersediaan data radar cuaca, satelit, dan model ECMWF yang sangat membantu dalam penelitian ini. Data dan informasi yang disediakan menjadi dasar penting dalam proses analisis dan pemahaman fenomena yang dikaji. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Meteorologi Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas fasilitas dan dukungan pembelajaran yang menunjang pemahaman serta pelaksanaan penelitian ini.

Pustaka

- [1] Fadholi A 2012 Analisa Kondisi Atmosfer pada Kejadian Cuaca Ekstrem Hujan Es (Hail) *Simetri J. Ilmu Fis. Indones.* **1** 74–80
- [2] Wicaksono H, Sadarang F R dan Fadlan A 2019 Analisis Hujan Es Di Kota Lubuklinggau Dengan Memanfaatkan Data Citra Satelit Himawari-8 Dan Radiosonde *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)* vol 3 hal 130–40
- [3] Auliya M N dan Mulya A 2022 Identifikasi Hail Berdasarkan Analisis Faktor Cuaca Dan Pemanfaatan Teknik Rgb Serta Swa Pada Citra Satelit Himawari 8 (Studi Kasus: Kejadian Hujan Es Di Kabupaten Malang Pada 2 Maret 2021) *J. Sains Teknol. Modif. Cuaca* **23** 39–51
- [4] Ali A dan Hidayati S 2015 Peringatan Dini Potensi Hujan Es Menggunakan Metode Severe Hail Index

- Berdasarkan Pengamatan Radar Cuaca Doppler *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2015*
- [5] Zakir A 2008 Modul Praktis Analisis dan Prakiraan Cuaca *BMKG, Jakarta*
 - [6] Paski J A I, Permana D S, Sepriando A dan 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) *Atmospheric Dynamics Analysis of Hail Event Utilizing Radar and Himawari-8 Satellite Imagery (Case Study: May 3, 2017 in Bandung City) Seminar Nasional Penginderaan Jauh*
 - [7] Shimizu A 2020 Introduction to Himawari-8 RGB composite imagery *Meteorol. Satell. Cent. Tech. Note* **65** 42
 - [8] Haryadi H, Mahendra P R dan Widodo P 2024 Studi Profil Awan Konvektif Penyebab Hujan Es Di Jakarta Dengan Menggunakan Radar Cuaca (Studi Kasus Hujan Es Di Jakarta 17 Desember 2022) *Pendipa J. Sci. Educ. Ученые UNIB Press* **8** 210–6
 - [9] Prasetyo S, Abdilah S, Nugraheni I R dan Sagita N 2022 Studi Awan Konvektif Penyebab Hujan Es Menggunakan Radar Cuaca Doppler Single Polarization di Bogor (23 September 2020) *J. Apl. Meteorol.* **1** 32–42
 - [10] Sagita P N, Hironobu I dan Tadahiro H 2018 Notes And Correspondence: Evolution of Mesoscale Convective System Properties as Derived from Himawari-8 High Resolution Data Analyses *気象集誌. 第 2 輯* **96** 239–50
 - [11] Ahrens C D 2015 *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment* (Cengage Learning Canada Inc)
 - [12] Wallace J M dan Hobbs P V 2006 *Atmospheric science: an introductory survey* vol 92 (Elsevier)
 - [13] Marwitz J D 1972 The structure and motion of severe hailstorms. Part I: Supercell storms *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **11** 166–79
 - [14] Browning K 1965 Some inferences about the updraft within a severe local storm *J. Atmos. Sci.* **22** 669–77
 - [15] Shi J, Wang P, Wang D dan Jia H 2019 Radar-based automatic identification and quantification of weak echo regions for hail nowcasting *Atmosphere (Basel)*. **10** 325
 - [16] Grant L D dan Van Den Heever S C 2014 Microphysical and dynamical characteristics of low-precipitation and classic supercells *J. Atmos. Sci.* **71** 2604–24
 - [17] Mason B J 1972 The Bakerian Lecture, 1971. The physics of the thunderstorm *Proc. R. Soc. London. A. Math. Phys. Sci.* **327** 433–66
 - [18] Ariwibowo F S dan Anang Ahmad Khairin Nur I 2018 Identifikasi Fenomena Hujan Es Berbasis Analisis Faktor Cuaca Menggunakan Citra Satelit Himawari-8 dan Data Upper Air Sounding (Studi Kasus: Kejadian Hujan Es Tanggal 20 Maret 2018 di Depok) *JIIF (Jurnal Ilmu dan Inov. Fis.* **2** 145–54
 - [19] Kitzmiller D H, McGovern W E dan Saffle R F 1995 The WSR-88D severe weather potential algorithm *Weather Forecast.* **10** 141–59
 - [20] Hernández Comi B I, Sánchez Ruiz F J, León Cruz J F dan Martínez Tavera E 2023 Análisis estadístico, sinóptico y termodinámico de las granizadas en el Altiplano Mexicano *Investig. geográficas*
 - [21] Frystine M, Mulya A, Kristianto A dan Maulidyah M P 2022 Analysis of atmospheric condition on hail event at Pelalawan (case study: September 23rd, 2019) *J. Meteorol. dan Geofis.* **23** 45
 - [22] Ayasha N 2022 Kajian Analisis Parameter Vertical Velocity dan Kaitannya dengan Kondisi Parameter Cuaca saat Kejadian Hujan ES *Bul. GAW Bariri* **3** 17–24.