

# KAJIAN PEMANFAATAN METODE *SEVERE HAIL INDEX* SECARA SPASIAL UNTUK DETEKSI KEJADIAN HUJAN ES DI JAWA BARAT

I Made Agus Satya

Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

E-mail korespondensi: agoessatya3@gmail.com

## ABSTRACT

*Hail is precipitation that is detrimental to the community, occurs in a short time, and is very local. It becomes a challenge to detect and give early warning. One method known to detect hail is the severe hail index (SHI) and its derivative product, the probability of severe hail (POSH). Utilize weather radar, the method detects by taking the value of the kinetic energy flux of hail by calculating the integration of the reflectivity weight and temperature flux from the freezing level to a temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ . This study aims to examine the spatial use of SHI and POSH methods to detect hail events in the West Java region. The results of SHI value obtained for  $350 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 400 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  for Depok and  $280 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 320 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  for Bogor, which met the threshold of average hail threshold of  $373 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Then POSH obtained a 70% – 80% probability for Depok and Bogor. Meanwhile, for Bandung, the SHI value is  $12 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 14 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  and 0% for POSH. Concluded that hail detection utilizing SHI and POSH methods effectiveness, influenced by the distance to the radar so it requires other additional methods such as RGB Composite from satellite imagery as support. Spatial calculations can also reduce value bias and give more accurate location occurrences.*

**Keywords:** Severe Hail Index, Hail, Weather Radar, Himawari-8.

## ABSTRAK

*Hujan es (hail) merupakan fenomena presipitasi yang merugikan masyarakat dan terjadi dengan waktu yang singkat dan sangat lokal sehingga menjadi tantangan tersendiri dalam mendeteksi untuk peringatan dini. Salah satu metode yang dikenal dapat mendeteksi hujan es adalah severe hail index (SHI) dan produk turunannya, probability of severe hail (POSH). Memanfaatkan instrumen radar cuaca, metode ini mendeteksi dengan mengambil besaran nilai fluks energi kinetik hujan es dengan menghitung integrasi fluks bobot reflektivitas dan suhu dari ketinggian freezing level hingga ketinggian suhu  $-20^{\circ}\text{C}$ . Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan metode SHI dan POSH secara spasial untuk mendeteksi kejadian hujan es di wilayah Jawa Barat. Hasil perhitungan nilai SHI diperoleh untuk  $350 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 400 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  untuk Depok dan  $280 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 320 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  untuk Bogor yang mana masing-masing nilai memenuhi untuk ambang batas rata-rata hujan es  $373 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Kemudian untuk POSH diperoleh probabilitas 70% – 80% untuk Depok dan Bogor. Sedangkan untuk Bandung nilai SHI diperoleh  $12 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 14 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  dan probabilitas 0% untuk POSH. Sehingga diketahui bahwa efektivitas deteksi hujan es dengan metode SHI dan POSH dipengaruhi oleh jarak ke radar sehingga memerlukan metode tambahan lain seperti RGB Composite dari citra satelit sebagai pendukung. Perhitungan secara spasial juga dapat mengurangi bias nilai dan lokasi kejadian yang lebih akurat.*

**Kata kunci:** Severe Hail Index, Hujan Es, Radar Cuaca, Himawari-8.

Diterima 12-09-2022 | Disetujui 27-09-2022 | Dipublikasi 30-11-2022

## PENDAHULUAN

Hujan es (hail) turun sebagai presipitasi dalam wujud batu es (*hailstone*) dengan bentuk tak beraturan dan memiliki diameter berkisar

5mm yang terbentuk dari awan konvektif atau awan *comulonimbus* [1] ketika butiran air super dingin (*supercooled droplet*) membeku akibat bertumbukan dengan inti kondensasi. Fenomena hujan es biasa terjadi pada keadaan

udara yang panas dan mendukung pertumbuhan awan *cumulonimbus* pada ketinggian 5 km – 10 km dengan *updraft* yang kuat sehingga mampu menahan kenaikan parcel di lapisan utama pembentukan es [2, 3]. Fenomena hujan es atau *hail* merupakan salah satu fenomena meteorologi yang mengakibatkan kerugian di masyarakat terutama pada rusaknya infrastruktur dan lahan pertanian. Hal ini menjadikan informasi peringatan dini melaluideteksi hujan es dibutuhkan bagi masyarakat. Fenomena hujan es tergolong terjadi cukup singkat dengan luasan yang sangat lokal sehingga hal ini menjadi tantangan tersendiri.

Instrumen radar cuaca dinilai mampu untuk mendeteksi fenomena meteorologi seperti hujan es dengan resolusi spasial dan temporal yang cukup tinggi. Radar cuaca dapat melakukan *scanning* area yang luas dan menghasilkan jutaan pengukuran dalam hitungan menit. Pada radar polarisasi tunggal dengan kerja doppler memiliki keluaran berupa parameter *reflectivity*, *radial velocity*, dan *spectral width*. Berdasarkan keluaran data tersebut radar dapat memiliki kemampuan untuk mengenali objek dari jarak, arah gerak, ukuran, dan karakteristiknya, yang dapat digunakan untuk mendeteksi fenomena yang terjadi di atmosfer secara kuantitatif dan interpretatif [4, 5].

Metode pendeteksian hujan es dengan menggunakan instrumen radar cukup beragam. Pengujian terhadap masing-masing metode telah banyak dilakukan, salah satunya oleh Holleman di Belanda dengan menggunakan metode *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI), *Maximum Plan Position Indicator* (MaxPPI), metode Auer, Waldvogel, *Severe Hail Index* (SHI), *Vertically Integrated Liquid* (VIL), dan VIL-Density [6]. Algoritma pendeteksian hujan es dengan menggunakan *severe hail index* (SHI) dikembangkan oleh Witt dkk tahun 1998 untuk mengestimasi dari kemungkinan tingkat keparahan dari suatu peristiwa hujan es [7]. Dalam metode ini digunakan hubungan semi-empiris antara fluks energi kinetik dari *hailstone* ( $\dot{E}$ ) dan reflektivitas yang ditemukan oleh Waldvogel

pada tahun 1978 [8]. Penelitian di wilayah tropis benua maritim terkait metode SHI dilakukan oleh Ali dan Hidayati pada kejadian hujan es Denpasar menghasilkan nilai 382,2  $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  di atas rata-rata penelitian Witt dkk untuk nilai SHI 373  $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  [7] dan pada kejadian hujan es wilayah Jakarta berada di bawah rata-rata dengan 304,8  $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  [9]. Penelitian lainnya terkait metode SHI untuk mendeteksi hujan es di Indonesia adalah penelitian oleh Kristianto [10]. Indikator yang dapat dijadikan acuan kejadian hujan es antara lain nilai reflektivitas lebih besar dari 55 dBZ dengan ketinggian puncak awan di atas 8km dan *freezing level* berada pada ketinggian 3 km – 4 km.

Penginderaan jauh dengan instrumen satelit juga dapat membantu dalam pendeteksian dan analisis dari awan hujan es. Sensor yang dimiliki oleh satelit cuaca mampu menangkap informasi berupa data spektrum radiasi dari objek di bumi. Informasi tersebut terbagi ke dalam beberapa kanal sesuai dengan *wavelength* masing-masing spektrum [11]. Satelit Himawari-8 membawa sensor *Advanced Himawari Imager* (AHI) dengan 16 jenis kanal [12] yang informasi masing-masing kanal dapat digabungkan dalam *red*, *green* dan *blue* (RGB) untuk mendapatkan informasi yang lebih mumpuni dari objek yang diamati. Diperkenalkan oleh Shimizu skema *day microphysics* dan *24-hour microphysics* merupakan salah satu dari metode penggabungan RGB (*RGB Composite*) yang mampu mengamati karakteristik awan berdasarkan proses mikrofisik yang terjadi di dalamnya [13].

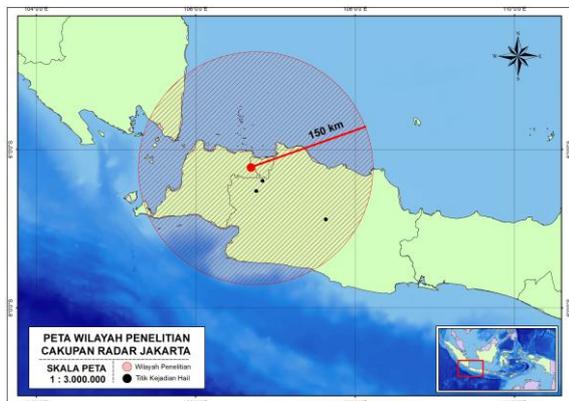
## METODE PENELITIAN

### Lokasi dan Data

Lokasi wilayah penelitian ini adalah mencakup wilayah pengamatan radar BMKG Jakarta pada koordinat 6,1669 °LS dan 106,6502 °BT dengan jangkauan 150 km dari instrumen radar. Sedangkan titik lokasi penelitian utama adalah wilayah Bandung,

Depok, dan Bogor yang terdampak hujan es pada masing-masing tanggal.

Data radar cuaca, berasal dari radar cuaca Jakarta dalam format volumetrik (.vol) yang diperoleh dari sub koordinator pengelolaan citra radar BMKG, beroperasi menggunakan *scanning strategy VCP (Volume Coverage Pattern)* 21. Kemudian data Satelit Himawari untuk produk RGB Composite diperoleh dari layanan Himawari-Cast STMKG. Data radiosonde hasil pengamatan di Stasiun Meteorologi Kelas I Soekarno Hatta Tangerang dalam format sandi (TTAA).



Gambar 1. Peta wilayah penelitian.

### Severe Hail Index

Menggunakan nilai fluks energi kinetik hujan es, persamaan dari *Severe Hail Index* dihitung dari integrasikan fluks bobot yang diperoleh berdasarkan reflektifitas  $W(Z)$  dan suhu  $WT(H)$ :

$$SHI \equiv \frac{1}{10} \int_{H_0}^{H_T} W(Z(h)) \cdot W_T(h) \cdot E(Z(h)) dh \quad (1)$$

dimana bobot berdasarkan reflektifitas didefinisikan sebagai:

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & Z \leq Z_L \\ \frac{z - z_L}{z - z_L} & Z < Z_L < Z_u \\ 1 & Z_L \geq Z_u \end{cases} \quad (2)$$

Bobot berdasarkan temperatur didefinisikan dengan persamaan:

$$W_T(H) = \begin{cases} 0 & H \leq H_0 \\ \frac{H - H_0}{H_{m20} - H_0} & H_0 < H < Z_{m20} \\ 1 & H \geq H_{m20} \end{cases} \quad (3)$$

Nilai  $\dot{E}$  sebagai hubungan antara fluks energi kinetik hujan es dan reflektivitas  $Z$  dirumuskan:

$$\dot{E}(Z) = 5.0 \times 10^{-6} Z^{0.84} \quad (4)$$

Nilai *cut-off* reflektifitas  $Z_L$  dan  $Z_U$  masing-masing ditetapkan dengan nilai 40 dan 50dBz, sedangkan  $HT_0$  ( $HT_{m20}$ ) merupakan ketinggian dari temperatur lingkungan pada nilai  $0^\circ\text{C}$  dan  $-20^\circ\text{C}$ . Dengan menggunakan metode ini maka SHI akan sensitif terhadap reflektifitas dengan nilai tinggi pada temperatur mendekati  $-20^\circ\text{C}$  atau lebih. Probabilitas dari hujan es dihitung dari nilai SHI dan ambang peringatan yang diperoleh menggunakan hubungan empiris kembali. Ambang batas dari peringatan SHI dirumuskan dengan:

$$WT = 57.5H_0 - 121 \quad (5)$$

dan nilai probabilitas dari hujan es didapatkan dengan:

$$POSH = 29 \ln\left(\frac{SHI}{WT}\right) + 50 \quad (6)$$

Rincian dari tahapan penelitian yang dilalui antara lain:

1. Mengolah data radar cuaca dalam format volumetrik yang telah dikonversi dari keluaran radar ECC agar dapat dibaca oleh aplikasi *Rainbow*. Pengolahan meliputi ekstraksi produk radar berupa CMAX ( $Z$ ) dan EHT. Kemudian produk keluaran dilakukan konversi menjadi format NetCDF untuk dilakukan perhitungan nilai SHI.
2. Mengolah data radiosonde untuk mendapatkan ketinggian *freezing level* pada saat kejadian dengan menggunakan aplikasi RAOB.
3. Mengolah data dari parameter yang telah diekstraksi sebelumnya dari data radar dan radiosonde untuk dilakukan kalkulasi nilai SHI dan POSH menggunakan *python*.

- Mengolah data citra satelit Himawari dengan menggunakan aplikasi SATAID untuk menghasilkan citra *RGB Composite* dengan skema *Day Microphysics* dan *24-Hour Microphysics* dengan menggunakan kanal B04, B07, B13, B15, B11, B13 yang diatur masing masing pada kelompok *red*, *green*, dan *blue* seperti klasifikasi pada Tabel 1.
- Menganalisis keluaran dari produk SHI dan *RGB Composite* untuk mengetahui indikator turunnya hujan es merujuk nilai rata-rata Witt dkk (1998) pada masing-masing tanggal [7].

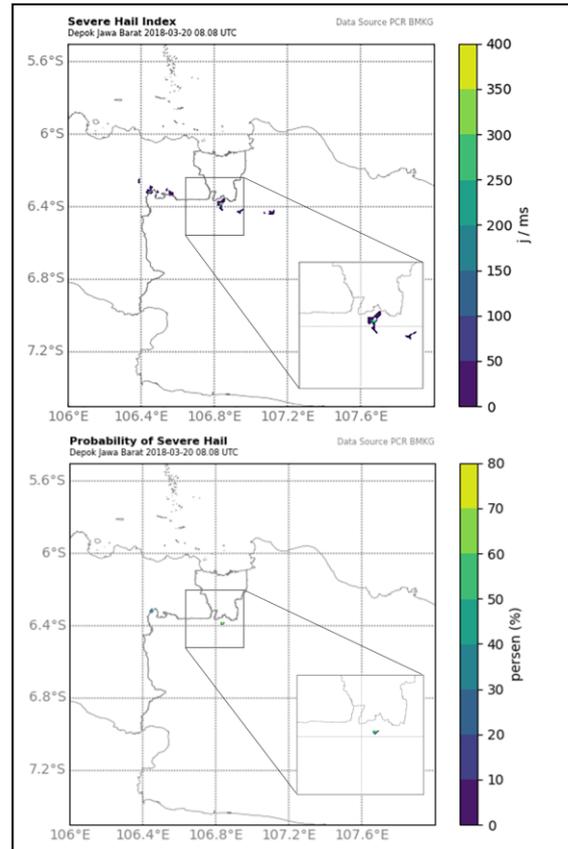
**Tabel 1.** Klasifikasi jenis dan karakteristik awan dari *RGB Composite* [13].

24-hour microphysics	Day microphysics
Awan es yang tebal, tinggi, dan dingin	Awan yang mengendap dalam
Awan air tebal	Cb cloud dengan updraft yang kuat
Awan dengan partikel kecil	Awan air tebal yang sangat dingin
Awan cirrus tipis	Awan air tipis yang sangat dingin

## HASIL DAN PEMBAHASAN

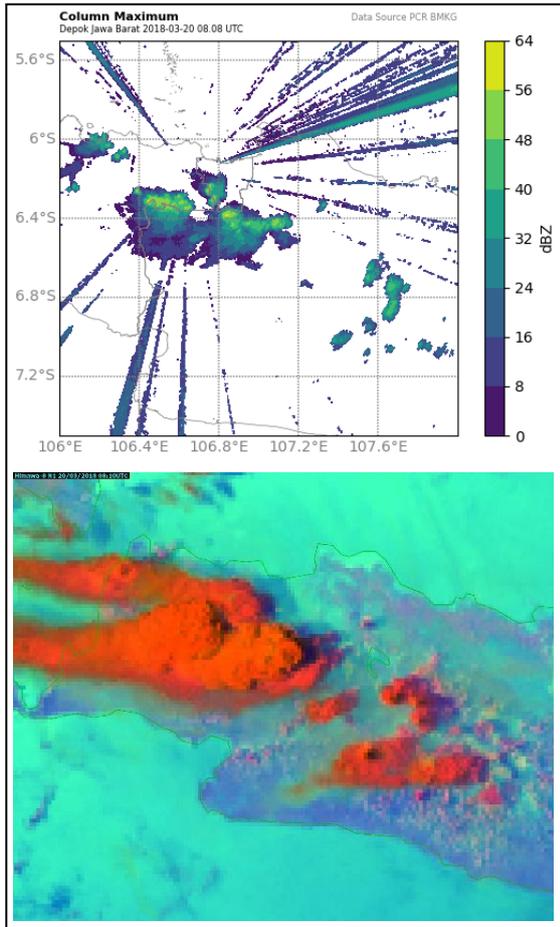
### Hujan Es Depok 20 Maret 2020

Hasil dari perhitungan nilai SHI pada kejadian hujan es di Depok, tanggal 20 Maret 2018 menunjukkan bahwa nilai SHI mencapai puncak tertingginya pada pukul 08.08 UTC dengan nilai  $350 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 400 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Nilai SHI ini mencerminkan nilai besaran fluks energi kinetik dari hujan es dari ketinggian *freezing level* hingga ketinggian suhu  $-20^\circ\text{C}$ . Nilai dari POSH didapati bernilai kisaran 70% – 80% probabilitas untuk turun hujan es parah. Untuk ketinggian *freezing level* yang diperoleh dari pengamatan radiosonde tanggal 20 Maret 2018 pukul 00 UTC di stasiun meteorologi Soekarno Hatta tercatat pada ketinggian 4700 meter dan ketinggian untuk profil suhu  $-20^\circ\text{C}$  tercatat pada ketinggian 8100 meter.



**Gambar 2.** Sebaran spasial nilai SHI, POSH, pada hujan es Depok 20 Maret 2018.

Profil awan penyebab hujan es yang turun di Depok dapat terlihat dengan menggunakan hasil produk olahan citra satelit *RGB Composite* dengan skema *Day Microphysics* dikarenakan pada saat kejadian matahari belum terbenam, yakni pukul 15.08 *Local Time* (LT). Dapat diketahui bahwa jenis awan tersebut menurut klasifikasi [13] merupakan awan bertipe *deep precipitating cloud* dengan *updraft* yang kuat dan dapat menghasilkan cuaca buruk. Hal ini dapat terlihat dari awan dengan warna merah kekuningan dengan *overshooting top* juga terlihat dari kontur bayangan hitam pada sekitaran awan tersebut. Sedangkan hasil dari citra radar teridentifikasi bahwa reflektifitas maksimum dari awan tersebut berkisar 56 dBZ – 64 dBZ. Sehingga dapat diketahui bahwa pada kejadian hujan es di Depok tanggal 20 Maret 2018 dapat terdeteksi dengan metode yang digunakan.

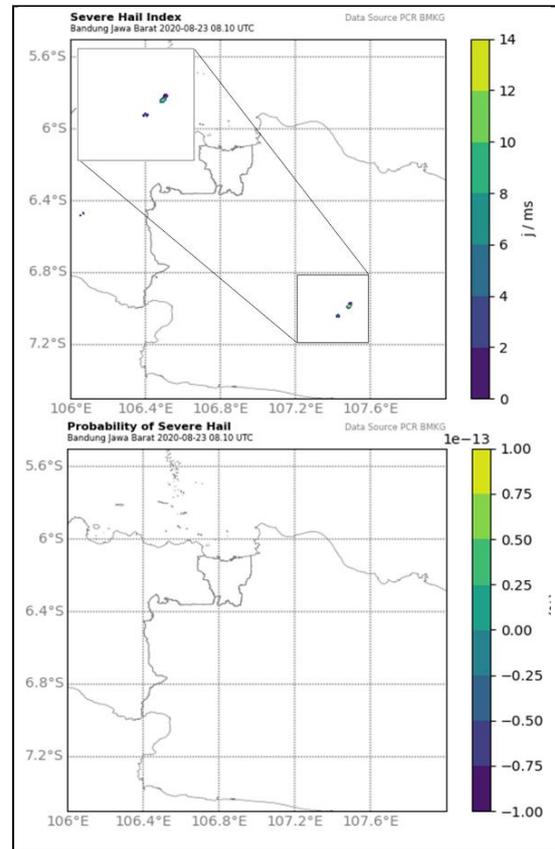


**Gambar 3.** Sebaran spasial nilai reflektivitas maksimum (CMAX), dan citra RGB *Day Microphysics* pada hujan es Depok 20 Maret 2018.

### Hujan Es Bandung 12 Agustus 2020

Berdasarkan hasil pengamatan radiosonde stasiun meteorologi Soekarno Hatta pada tanggal 12 Agustus 2020 pukul 00 UTC, tercatat nilai *freezing level* pada ketinggian 4698 meter di atas permukaan laut dan profil suhu vertikal dengan nilai  $-20^{\circ}\text{C}$  pada ketinggian 8405 meter. Kemudian untuk hasil perhitungan nilai SHI pada kejadian hujan es di Bandung tanggal 12 Agustus 2020 berada pada kisaran  $12 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 14 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  pada nilai maksimumnya yang berada jauh di bawah ambang batas rata-rata yang diperoleh [7] yakni pada kisaran angka  $373 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Sedangkan nilai POSH yang tercatat dari hasil perhitungan pada waktu yang sama juga pada pukul 08.10 UTC adalah 0% untuk kemungkinan terjadinya hujan es tingkat parah. Kecilnya nilai SHI dan POSH

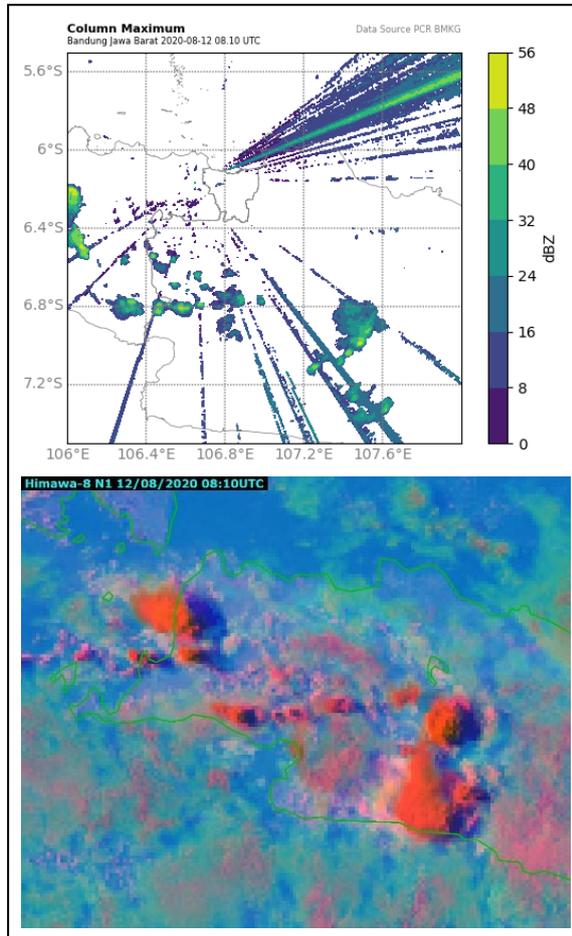
bernilai 0% yang diperoleh diduga disebabkan oleh jarak lokasi dari pusat radar pada kisaran jarak 130 km sehingga menyebabkan atenuasi yang dapat mengurangi nilai reflektivitas sebenarnya yang ditangkap oleh radar dan menjadi salah satu dari limitasi radar [14].



**Gambar 4.** Sebaran spasial nilai SHI, POSH, pada hujan es Bandung 12 Agustus 2020.

Karakteristik awan yang menjadi penyebab hujan es, terpantau dari produk hasil *RGB Composite* skema *Day Microphysics* adalah *deep precipitating cloud* dengan warna kemerahan, namun tidak teridentifikasi adanya puncak awan yang *overshooting*. Sedangkan nilai reflektivitas yang terpantau dari produk CMAX citra radar Jakarta berada pada kisaran 48 dBZ – 56 dBZ pada nilai maksimumnya. Rendahnya nilai dari semua aspek antara lain SHI, POSH, dan reflektivitas radar menandakan bahwa hujan es yang terjadi tidak terdeteksi dengan metode yang digunakan. Baik untuk metode SHI dan POSH. Hal ini kiranya disebabkan oleh nilai reflektivitas dibaca oleh radar, tidak cukup tinggi untuk dideteksi

sebagai *hail* dengan perhitungan nilai SHI dan POSH meskipun di lapangan, nyatanya terjadi hujan es di wilayah Bandung pada tanggal 12 Agustus 2020. Sehingga nilai ambang batas SHI dan POSH yang diperoleh belum dapat dijadikan indikator turunnya hujan es di wilayah Bandung.

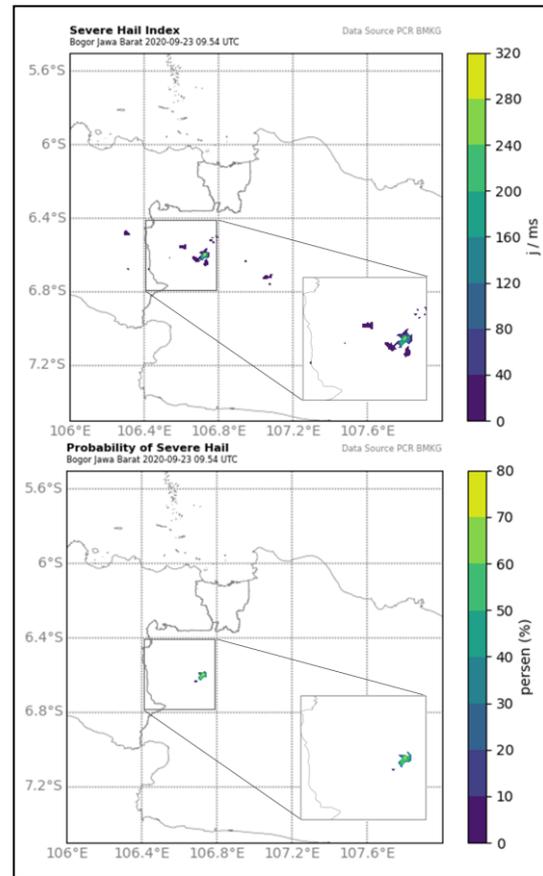


**Gambar 5.**Sebaran spasial nilai reflektivitas maksimum (CMAX), dan citra RGB *Day Microphysics* pada hujan es Bandung 12 Agustus 2020.

### Hujan Es Bogor 23 September 2020

Nilai yang ditunjukkan dari hasil perhitungan SHI menunjukkan angka  $280 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1} - 320 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  pada pukul 09.54 UTC yang merupakan nilai tertinggi dari kejadian hujan es di Bogor tanggal 23 September 2020. Kemudian untuk nilai POSH didapat hasil perhitungan dengan nilai 70% – 80% probabilitas untuk terjadinya hujan es parah di wilayah Bogor. Hasil perhitungan diperoleh dengan nilai ketinggian

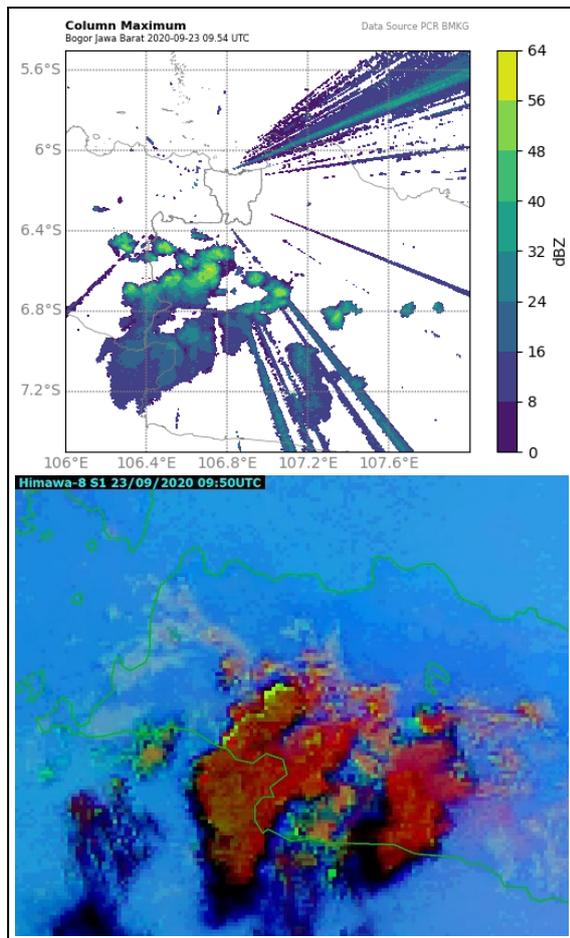
*freezing level* pada 4743 meter diatas permukaan laut dan suhu  $-20^{\circ}\text{C}$  tercatat pada ketinggian 8571 meter, diperoleh dari hasil pengamatan radiosonde yang dilakukan pada pukul 00 UTC di stasiun meteorologi Soekarno Hatta.



**Gambar 6.** Sebaran spasial nilai SHI, POSH, pada hujan es Bogor 23 September 2020.

Karakteristik dari awan penyebab hujan es yang turun, kemudian diidentifikasi dengan menggunakan produk olahan *RGB Composite* untuk citra satelit Himawari-8 dengan skema *24-Hour Microphysics*. Pemilihan jenis skema tersebut didasari oleh kejadian hujan es yang terjadi ketika matahari telah memasuki fase terbenamnya, sehingga tidak mampu teramati oleh skema *Day Microphysics* yang masih menggunakan kanal *visible* dari satelit Himawari-8. Terlihat bahwa awan tersebut diklasifikasikan sebagai awan dingin dengan tingkat ketebalan cukup tinggi yang ditandai dengan warna merah disertai dengan bintik-bintik kuning. Luasan tumbuh awan juga

terbilang cukup luas yang mencakup hingga wilayah Sukabumi, Jawa Barat. Sedangkan hasil dari produk citra radar CMAX tercatat awan tersebut memiliki reflektifitas berkisar 56 dBZ – 64 dBZ pada nilai maksimumnya. Sehingga dapat diketahui bahwa metode yang digunakan belum dapat mendeteksi kejadian hujan es yang terjadi di wilayah Bogor.



**Gambar 7.**Sebaran spasial nilai reflektivitas maksimum (CMAX), dan citra RGB 24-hour Microphysics pada hujan es Bogor 23 September 2020.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan nilai SHI pada tiga kejadian hujan es di wilayah Jawa Barat diketahui nilai maksimum untuk masing-masing kejadian adalah  $350 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  –  $400 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  untuk kejadian di Depok, kemudian  $12 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  –  $14 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  untuk kejadian di Bandung, dan terakhir  $280 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  –  $320 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$  untuk kejadian di wilayah Bogor. Nilai SHI yang diperoleh

dari kedua kejadian hujan es yakni Depok dan Bogor, mendekati nilai rata-rata yang diperoleh Witt dkk yakni  $373 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ [7] dan sesuai dengan nilai rata-rata kejadian hujan es dengan ukuran diameter 19 mm – 33 mm yakni  $288 \text{ Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Kemudian untuk hasil perhitungan nilai POSH untuk kejadian Depok dan Bogor masing-masing memperoleh nilai probabilitas 70% – 80%.

Berbeda dengan kejadian hujan es Depok dan Bogor, hujan es di wilayah Bandung memperoleh nilai SHI yang jauh di bawah rata-rata yang diperoleh Witt dkk. [7]. Hal ini menunjukkan kejadian hujan es tidak berhasil terdeteksi oleh metode SHI. Hal yang sama juga terjadi untuk nilai POSH yang memperoleh probabilitas 0% yang diduga disebabkan oleh pengaruh jarak radar ke lokasi kejadian yang cukup jauh sehingga menyebabkan atenuasi nilai reflektivitas. Untuk kasus kejadian seperti ini, maka perbandingan ataupun *ensemble* dengan metode lain diperlukan, contohnya dengan menggunakan citra satelit yang mana untuk ketiga kejadian yang dijadikan kajian, mendeteksi jenis awan yang seragam yakni *deep precipitating cloud* dengan *updraft* yang kuat berdasarkan metode *RGB Composite* yang digunakan.

Sehingga dapat diketahui, metode yang digunakan SHI dan POSH memiliki batasan dalam hal jarak radar. Perhitungan nilai dalam bentuk spasial memiliki kelebihan, baik dalam hal pemberian informasi lokasi kejadian yang lebih akurat, maupun dalam hal pengurangan bias nilai yang diperoleh jika dibandingkan dengan pengambilan titik dengan nilai reflektivitas maksimum ataupun dengan rata-rata wilayah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sub Koordinator Pengelolaan Citra Radar BMKG yang memberi dukungan berupa data Radar Jakarta serta kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika atas penyediaan data Himawari-Cast yang mendukung berlangsungnya penelitian ini.

## REFERENSI

1. Tjasyono, B. H. (2004). *Klimatologi*. Bandung: Penerbit ITB.
2. Nelson, S. P. (1983). *The Influence of Storm Flow Structure on Hail Growth*, *Journal Atmospheric Science*.
3. Zakir, A. (2008). *Modul Praktis Analisis dan Prakiraan Cuaca*. Jakarta: BMKG.
4. Battan, L. J. (1973). *Radar Observation of the Atmosphere*. Chicago: University of Chicago.
5. Rinehart, R. E. (2010). *Radar Meteorologist*. Nevada: Rinehart Publications.
6. Holleman, I. (2001). *Hail detection using single-polarization radar*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
7. Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., & Thomas, K. W. (1998). An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, **13**(2), 286–303.
8. Waldvogel, A., Schmid, W., & Federer, B. (1978). The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 515–520.
9. Ali, A., & Hidayati, S. (2015). Peringatan Dini Potensi Hujan Es menggunakan Metode Severe Hail Index berdasarkan Pengamatan Radar Cuaca Doppler. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*. Jakarta
10. Kristianto, A., Arizona, I. J. S., Larasati, G., & Akib, K. (2018). Identifikasi Kejadian Hujan Es Menggunakan Citra Radar dan Satelit Cuaca. *Prosiding PIT Ke-5 Riset Kebencanaan IABI Universitas Andalas Padang*, **1**, 349–362.
11. Lilesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1990). *Penginderaan Jauh dan Interpretasi Citra Terjemahan*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
12. Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., ... & Yoshida, R. (2016). An introduction to Himawari-8/9 — Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **94**(2), 151–183.
13. Shimizu, A. (2020). Newly proposed RGBs by Himawari-8 and some case studies. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, (65).
14. Zawadzki, I. (1984). Factors affecting the precision of radar measurements of rain. *In 22nd conference on radar meteorology*, Zurich, Switzerland, 251–256.



Artikel ini menggunakan lisensi  
[Creative Commons Attribution  
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)