

Modifikasi Metode Waldvogel Berdasarkan Identifikasi Karakteristik Hujan Es yang Dikelompokkan Berdasarkan Jarak Cakupan Radar Cuaca Pada Radar Cuaca Jakarta Tahun 2010-2019

**Marselinus Muaya^{1*}, Amalia Khoirunnisa², Rizky Umul Nisa Fadillah³, Eko Wardoyo⁴,
Fitria Puspita Sari⁵**

^{1,2,3}Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Perhubungan I No.5 Pondok Betung, Bintaro, Kec. Pd. Aren, Kota Tangerang Selatan, Banten 15221

^{4,5}Dosen Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jalan Perhubungan I No.5 Pondok Betung, Bintaro, Kec. Pd. Aren, Kota Tangerang Selatan, Banten 15221

^{*}E-mail: marcelmuaya21@gmail.com

Abstract: *Hail detection using information from satellite and weather radar is the right choice due to spatial and temporal variability of the phenomenon of high hail. Some algorithms that use single polarization radar data have been developed for hail detection. One method that has been applied in Reflectivity-based Hail Warning or ZHAIL radar product is the Waldvogel method. This research aims to find new threshold criteria for the application of the Waldvogel method in the Jakarta weather radar observation area which is grouped into three regions based on the distance of weather radar observation. In this research, hail events from 2010 to 2019 have been analysed. Analysis of weather and weather radar data was carried out to determine the climatological characteristics of reflectivity values, reflectivity heights, and freezing levels as parameters to be used to determine the criteria for modification in the Waldvogel method. The reflectivity and reflectivity values are obtained from the processing of radar data, while the freezing level is generated from the processing of the Himawari satellite image in the infrared channel. Waldvogel's algorithm with the three modifications that have been produced, then tested using Critical Success Index, Possibility of Detection, and False Alarm Ratio, calculations on the percentage value of Probability Of Hail. The results of the research is the reflectivity values, reflectivity altitude and the most accurate freezing level applied to each region that was differentiated according to the weather radar distance radius observation. Better accuracy of the application of Waldvogel method is expected to reduce the effects of the hail phenomenon.*

Keywords: *Hail, Waldvogel methods, Freezing Level, weather radar*

Abstrak: Metode Waldvogel merupakan metode deteksi hujan es yang mengubah reflectivity dari pengamatan radar menjadi produk Reflectivity-based Hail Warning atau ZHAIL. Penggunaan metode Waldvogel masih perlu disesuaikan dengan kondisi wilayah tropis termasuk Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan kriteria ambang batas baru untuk penerapan metode Waldvogel di daerah pengamatan radar cuaca Jakarta sehingga diperoleh akurasi metode Waldvogel yang lebih baik. Kriteria ambang dikelompokkan menjadi tiga wilayah berdasarkan jarak cakupan radar cuaca (wilayah I : <30 km, wilayah II : 30-100 km dan wilayah III : 100-150 km). Analisis data radar cuaca dilakukan untuk menentukan karakteristik klimatologis dari nilai reflectivity maksimum, ketinggian reflectivity maksimum, dan ketinggian freezing level sebagai parameter yang akan digunakan untuk menentukan kriteria modifikasi dalam metode Waldvogel. Verifikasi parameter diujikan dengan nilai Probability of Hail (POH), False Alarm Ratio (FAR), Possibility of Detection (POD), dan Critical Success Index (CSI). Hasil verifikasi menunjukkan metode Waldvogel dimodifikasi menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan metode Waldvogel awal untuk wilayah I dan II dengan kriteria metode Waldvogel modifikasi yang paling baik yaitu Waldvogel 3. Sedangkan untuk wilayah III, nilai kriteria yang lebih baik adalah Waldvogel tanpa modifikasi. Akurasi yang lebih baik dari penerapan metode Waldvogel diharapkan dapat mengurangi dampak buruk yang ditimbulkan dari fenomena hujan es.

Kata kunci: Hail, metode Waldvogel, Freezing Level, radar cuaca, ZHAIL

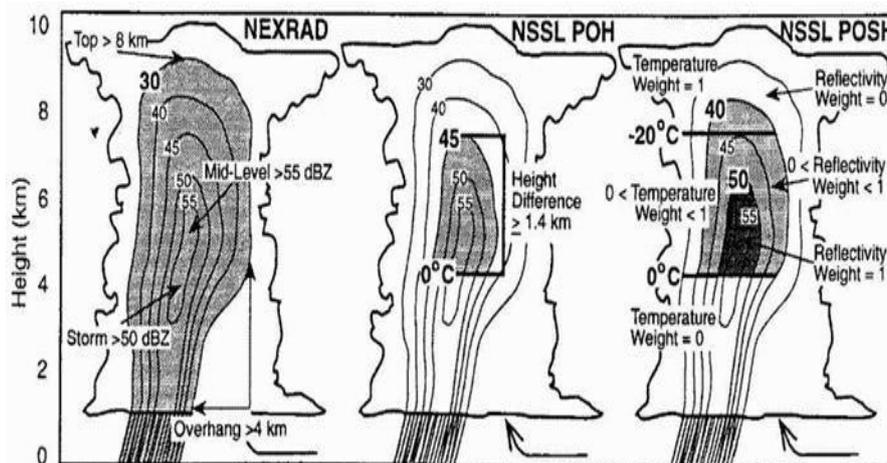
1. PENDAHULUAN

Hujan es dihasilkan dari gerakan massa udara (*updraft*) kuat awan *Cumulonimbus* bersel tunggal (*single cell*) maupun ganda (*multicell*) yang terletak dekat permukaan bumi (Zakir, 2008). Partikel es (*hailstone*) terbentuk saat tetes hujan yang membeku tumbuh melalui proses koalisi dan koalesensi dari tetes awan kelewat jenuh yang menyebabkan penambahan massa partikel (Roger dan Yau, 2006). Sistem konvektif kuat disertai ketinggian *freezing level* yang rendah menyebabkan butiran es berukuran besar tidak memiliki waktu yang cukup untuk menjadi tetes hujan ketika jatuh mencapai permukaan tanah (Lutgens dan Tarbuck, 2013).

Metode deteksi hujan es menggunakan radar cuaca telah banyak diteliti diberbagai negara. Penelitian yang dilakukan oleh Holleman (2001) di Belanda berupa verifikasi yang dilakukan terhadap delapan metode deteksi hujan es berbeda, didapatkan metode Waldvogel memiliki performa yang paling baik dengan nilai *Critical Success Index* (CSI) sebesar 0.54. Dalam penelitian Skripniková dan Řezáčová (2014) di Republik Ceko dan Jerman, mengungkapkan bahwa metode Waldvogel dan *Severe Hail Algorithm* dari *Next-Generation Radar* (NEXRAD) adalah yang paling akurat dari tujuh metode deteksi hujan es yang diujikan.

Metode Waldvogel yang dikembangkan oleh Albert Waldvogel (1979) adalah metode deteksi kejadian hujan es dengan menggunakan dua parameter, yaitu ketinggian pada *reflectivity* 45 dBZ (H45) dan ketinggian *freezing level* atau ketinggian pada suhu 0°C (H0). Ketika ketinggian pada *reflectivity* 45 dBz meningkat hingga 1.4 km atau lebih diatas *freezing level* maka hujan es akan sangat mungkin terjadi dan probabilitas kejadian hujan es meningkat seiring dengan meningkatnya ketinggian *reflectivity* inti sel awan 45 dBz diatas *freezing level* (Holleman, 2001). Selisih H45 dan H0 selanjutnya akan dikonversi menjadi probabilitas hujan es dalam persen (Gambar 1). Ketika selisih ketinggian lebih dari 5.5 km, persentase peluang kejadian hujan es akan lebih dari 100 % (Waldvogel, 1979).

Gambar 1 menunjukkan perkembangan metode deteksi hujan es (*Hail Detection Algorithm*). NEXRAD HDA lama memeriksa karakteristik tertentu, seperti *reflectivity* badai maksimum dan *overhang*, dan menerapkan bobot. NEXRAD HDA baru menghitung ketinggian antara *freezing level* dan tinggi maksimum reflektifitas 45 dBZ dan menerapkan kurva probabilitas yaitu *Probability of Hail* (POH) (Waldvogel, 1979). *Severe Hail Index* (SHI) dihitung dengan integrasi vertikal produk energi kinetik hujan es dengan fungsi suhu dan fungsi reflektifitas yang kemudian dikonversi menjadi indeks probabilitas yaitu *Probability of Severe Hail* (POSH) (Witt, 1998).



Gambar 1. Skema badai hujan es dan desain setiap *Hail Detection Algorithm* (Kessinger 1995).

Pengujian metode Waldvogel juga pernah dilakukan di Jakarta dan Bandung, Indonesia oleh Ali dan Sabitul (2016) dengan menggunakan 13 data kasus kejadian hujan es. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa nilai POD lebih besar dari nilai FAR, yakni 0.62 untuk nilai POD dan 0.43 untuk nilai FAR sedangkan nilai CSI 0.42. Penelitian tersebut menyatakan bahwa metode Waldvogel memiliki nilai kebenaran yang lebih tinggi dibandingkan tingkat kesalahan. Selanjutnya, Permata (2018) melakukan modifikasi terhadap kriteria parameter metode Waldvogel dengan mengidentifikasi karakteristik kejadian hujan es di wilayah Jawa bagian barat. Dalam penelitian tersebut, didapatkan kriteria parameter Waldvogel modifikasi yaitu dengan Z_{max} sebesar 52 dBZ, *freezing level* 5.0 km, dan selisih ketinggian *reflectivity* dengan *freezing level* (H_Z -FL) 1.6 dengan hasil verifikasi memiliki nilai CSI 0.54 yang lebih tinggi dibandingkan sebelum modifikasi yaitu 0.31. Dalam menentukan kriteria modifikasi, dilakukan analisis secara statistik terhadap 30 data kejadian hujan es dalam radius 0-150 km terhadap radar cuaca.

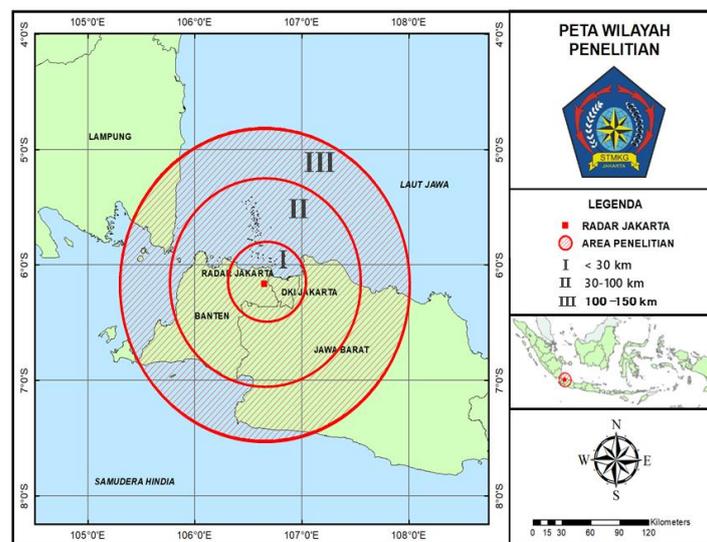
Penentuan kriteria metode Waldvogel yang teramati dalam suatu sistem konvektif membutuhkan profil awan vertikal yang utuh. Pengamatan radar cuaca sendiri memiliki limitasi yaitu berupa terbatasnya elevasi *scan* radar sehingga menghasilkan *Blank Zone* pada radius yang dekat (Hong dkk., 2015) dan pada jarak objek yang jauh dari radar menyebabkan pengurangan intensitas *beam* yang berakibat hasil estimasi lebih rendah dari keadaan yang sebenarnya (Holleman, 2006).

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan kriteria parameter Waldvogel baru berdasarkan data kejadian hujan es dengan mempertimbangkan jarak kejadian hujan es terhadap radar cuaca. Penentuan kriteria modifikasi ini didasarkan pada karakteristik parameter Waldvogel dari analisis statistik data klimatologis hujan es yang dikumpulkan. Penelitian ini akan mengelompokkan radius pengamatan kejadian hujan es menjadi tiga, dengan memisahkan jarak pengamatan terdekat dari pusat radar dan jarak yang jauh dari pusat radar. Hasil yang diharapkan berupa kriteria parameter Waldvogel baru yang lebih akurat pada masing-masing kelompok wilayah cakupan radar. Diharapkan modifikasi terhadap kriteria parameter Waldvogel ini dapat menjadi panduan ataupun referensi yang lebih akurat dalam memberikan peringatan dini maupun analisis terhadap kasus kejadian hujan es.

2. METODE

2.1. Lokasi dan Data Penelitian

Lokasi penelitian adalah wilayah dalam jangkauan pengamatan radar cuaca Jakarta sejauh 150 km yang secara administratif mencakup wilayah provinsi DKI Jakarta, Banten, dan Jawa Barat (**Gambar 2**). Radar cuaca Jakarta terletak pada koordinat 6,1669 °LS dan 106,6502 °BT. Jangkauan pengamatan radar cuaca Jakarta dikelompokkan menjadi tiga wilayah berdasarkan jarak dari pusat radar yaitu wilayah I berada dalam radius kurang dari 30 km, wilayah II berada di radius 30 hingga 100 km dan wilayah III berada di radius 100 hingga 150 km. Pengelompokkan tersebut didasarkan pada beberapa limitasi pengamatan radar cuaca dalam mengamati fenomena meteorologi (khususnya awan *Cumulunimbus*) seperti terdapat *Blank Zone* pada radius yang dekat (Hong dkk., 2015) dan pengurangan intensitas *beam* pada jarak objek yang jauh dari radar yang menyebabkan hasil estimasi lebih rendah dari keadaan yang sebenarnya (Holleman, 2006).



Gambar 2. Peta lokasi penelitian

Data kejadian hujan es yang merupakan laporan dari berita media *online* yang dikumpulkan dari tahun 2010 hingga 2019 yang masuk pada area lokasi penelitian. Informasi yang dikumpulkan berupa tempat dan tanggal dilaporkan kejadian hujan es. Waktu kejadian yang dilaporkan akan diverifikasi kembali dengan data pengamatan radar cuaca. Kejadian hujan es yang menjadi bahan analisis dalam penelitian ini berjumlah 39 kasus yang dapat dilihat pada **Tabel 1**

Tabel 1. Tabel Kejadian Hujan Es pada Wilayah I

No	Tanggal	Jarak dari Radar Cuaca	Lokasi
1	28 Maret 2017	15 km	Jakarta Selatan
2	22 April 2014	14 km	Palmerah
3	29 Oktober 2013	18 km	Lebak Bulus
4	30 Oktober 2011	20 km	Pamulang, Tangsel
5	27 November 2010	20 km	Klender, Jakarta Timur
6	21 Oktober 2010	23 km	Cilandak

Tabel 2. Tabel Kejadian Hujan Es pada Wilayah II

No	Tanggal	Jarak dari Radar Cuaca	Lokasi
1	22 Februari 2019	86 km	Kec. Cicantayan, Sukabumi
2	12 Desember 2018	31 km	Kota Depok
3	22 November 2018	81 km	Kec. Klari, Karawang
4	17 November 2018	78 km	Kec. Pacet, Cianjur
5	12 Juni 2018	39 km	Kec. Jasinga, Bogor Barat
6	20 Maret 2018	31 km	Depok
7	22 Oktober 2017	35 km	Bekasi
8	1 Oktober 2017	33 km	Depok
9	8 Agustus 2017	51 km	Leuwiliang, Bogor
10	25 September 2016	37 km	Jatiasih, Bekasi
11	5 Juli 2016	48 km	Kota Bogor
12	26 Maret 2016	88 km	Sukabumi
13	30 November 2015	76 km	Karawang
14	30 November 2015	42 km	Bogor Barat, Bogor
15	21 September 2015	54 km	Baranangsiang, Bogor
16	31 Juli 2015	47 km	Dramaga, Bogor Barat
17	6 Maret 2014	39 km	Pabuaran, Cibinong
18	10 Januari 2014	44 km	Cileungsi, Bogor
19	11 Juni 2012	54 km	Bogor Selatan

Tabel 3. Tabel Kejadian Hujan Es pada Wilayah III

No	Tanggal	Jarak dari Radar Cuaca	Lokasi
1	23 Februari 2019	134 km	Cigadung, Kota Bandung
2	12 Februari 2019	138 km	Kiaracodong, Kota Bandung
3	10 Januari 2019	134 km	Kota Bandung
4	22 Juli 2018	141 km	Bojongsoang, Bandung
5	20 Maret 2018	134 km	Bandung
6	3 Mei 2017	135 km	Jl. Braga, Bandung
7	17 Maret 2017	137 km	Bandung
8	7 Oktober 2015	137 km	Bandung
9	24 Desember 2014	137 km	Bandung
10	10 Januari 2014	135 km	Bandung
11	8 Oktober 2013	136 km	Bandung
12	10 September 2012	133 km	Bandung
13	29 November 2010	144 km	Bandung
14	24 April 2010	137 km	Bandung

Data radar cuaca yang digunakan adalah *raw data* radar cuaca Jakarta dengan format *volume* (.vol) yang didapatkan dari BMKG sub-bidang pengolahan citra radar. Metode operasional radar cuaca Jakarta menggunakan teknik *Volume Coverage Pattern* (VCP) 21 yang memiliki 11 elevasi, yaitu dari 0.50° hingga 19.50° . Radar cuaca Jakarta merupakan radar cuaca *Doppler* dengan tipe C-Band, merek EEC serta menggunakan polarisasi tunggal (*single polarization*). Kemudian data satelit Himawari 7 dan 8 yang digunakan adalah data kanal IR-1 (*infrared*) atau B13 yang diolah untuk mendapatkan data ketinggian *freezing level*.

Format data yang digunakan yaitu .Z dengan resolusi data 5.55 km x 5.55 km yang didapatkan dari BMKG sub-bidang pengolahan citra satelit. Data satelit Himawari 7 untuk data tahun 2010-2015 dan data satelit Himawari 8 untuk data tahun 2016-2019.

3. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif dengan melakukan pengolahan data, menganalisis dan menginterpretasikan citra radar cuaca maupun satelit pada setiap kasus - kasus kejadian hujan es. Selanjutnya, hasil berupa data kuantitatif diolah secara statistik untuk menentukan kriteria parameter Waldvogel modifikasi. Kemudian teknik/metode eksperimental dilakukan untuk mengujikan setiap kriteria yang telah didapatkan dan dilakukan verifikasi untuk dapat mengetahui efektifitas atau performa dari suatu kriteria.

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan kejadian hujan es melalui laporan media berita *online*. Kejadian hujan es dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan wilayah cakupan radar cuaca, yaitu wilayah I (kurang dari 30 km), wilayah II (30-100 km) dan wilayah III (100-150 km). Selanjutnya, menentukan nilai parameter kriteria Waldvogel dengan menggunakan produk radar *Maximum Display* (MAX) dan *Echo Height* (EHT) serta data satelit kanal IR-1 (*infrared*) atau kanal B13 yang diolah dengan aplikasi SATAID (*Satellite Animation and Interactive Diagnosis*). Kasus kejadian hujan es pada wilayah II digunakan untuk acuan penentuan kriteria modifikasi dengan anggapan bahwa pada radius 30 hingga 100 km limitasi pengamatan radar adalah yang paling minimum. Setelah itu, dilakukan penentuan kriteria parameter waldvogel modifikasi melalui analisis statistik parameter waldvogel yang didapatkan. Nilai *reflectivity* maksimum dimasukkan ke dalam tabel distribusi frekuensi data kelompok untuk mendapatkan nilai *reflectivity* maksimum rata-rata (mean), median, dan modus. Selanjutnya ketinggian ketiga nilai *reflectivity* maksimum tersebut dihitung selisihnya dengan ketinggian *freezing level*. Maka didapatkan tiga kriteria Waldvogel modifikasi yaitu : kriteria Waldvogel 1 dari *reflectivity* rata-rata (mean), kriteria Waldvogel 2 dari *reflectivity* median, dan kriteria Waldvogel 3 dari *reflectivity* modus.

Berikutnya dilakukan perhitungan *Probability of Hail* (POH) seluruh kejadian hujan es dengan menggunakan tiga kriteria parameter Waldvogel modifikasi. Perhitungan POH dilakukan dengan menggunakan produk radar *Reflectivity-based Hail Warning* (ZHAIL). Perhitungan probabilitas kejadian hujan es dalam metode Waldvogel dirumuskan :

$$POH = \frac{100\%}{\Delta H(H'_{TH} - (H_0 + H_{Hail}) + \frac{\Delta H}{2})}$$

dimana :

POH = *Probability of Hail*

Δ = *Interval transition*

H_0 = *Tinggi freezing level*

H_{Hail} = *Ketebalan antara reflectivity dengan tinggi freezing level*

Hasil yang diperoleh pada masing-masing wilayah kemudian diverifikasi menggunakan tabel kontingensi 2x2 (Tabel 4) untuk mendapatkan nilai dari *Possibility of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR) dan *Critical Succes Index* (CSI) berdasarkan empat kategori (Wilks, 1995).

Tabel 4. Tabel kontingensi 2x2 kejadian hujan es

Prakiraan	Observasi	
	Hail	No Hail
Hail	Hits	False Alarm
No Hail	Miss	Correct Negative

Dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

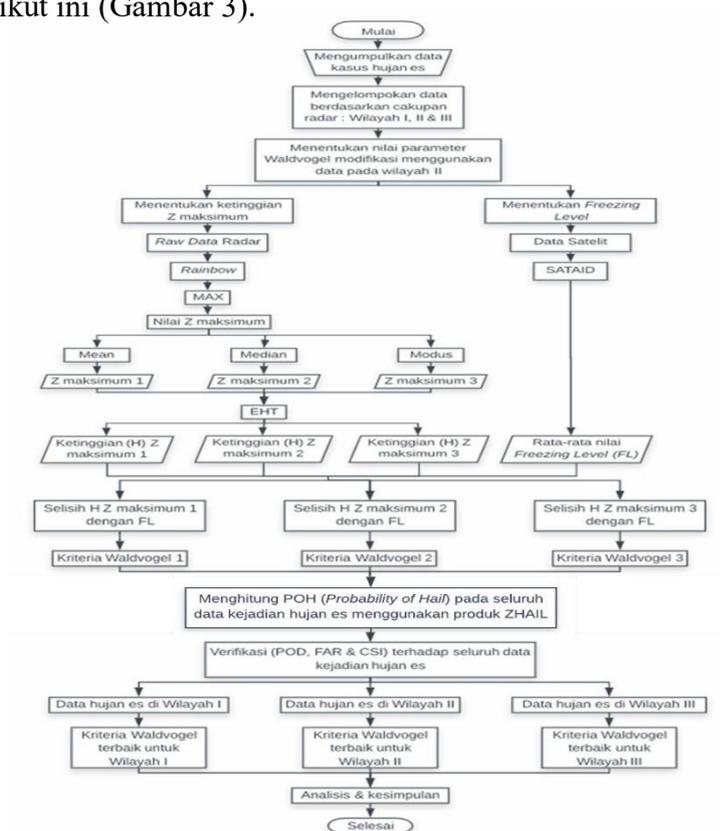
$$POD = \frac{Hits}{(Hits + Miss)}$$

$$FAR = \frac{False\ Alarm}{(Hits + False\ Alarm)}$$

$$CSI = \frac{Hits}{(Hits + Miss + False\ Alarm)} = \left[\frac{1}{POD} + \frac{1}{1 - FAR} - 1 \right]^{-1}$$

Nilai POD yang tinggi dan FAR rendah menunjukkan bahwa metode tersebut dianggap baik. Sedangkan nilai CSI untuk melihat performa metode yang digunakan, dimana hasil dengan nilai CSI tertinggi menunjukkan bahwa metode tersebut dianggap baik (Holleman, 2001). Langkah terakhir yaitu mengambil kesimpulan kriteria Waldvogel dengan tingkat akurasi terbaik pada masing-masing wilayah. Metode eksperimental dilakukan dengan menguji efektivitas kriteria Waldvogel modifikasi sehingga akan didapatkan kriteria terbaik sesuai pengelompokkan masing-masing wilayah cakupan radar cuaca.

Langkah-langkah pengolahan data dan verifikasi tersebut di atas direpresentasikan dalam diagram alir berikut ini (Gambar 3).

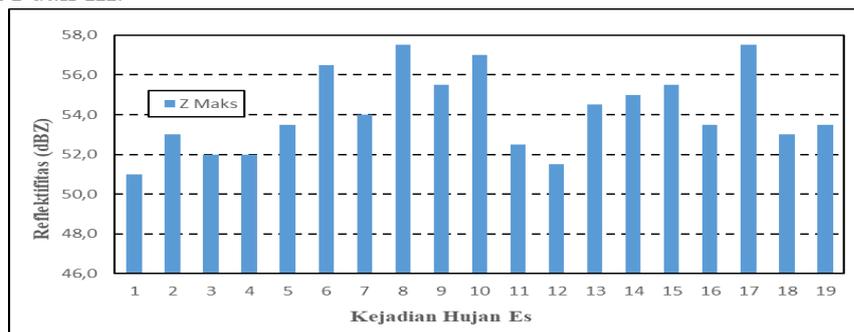


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Karakteristik Nilai Parameter Waldvogel Modifikasi

Analisis karakteristik dilakukan terhadap nilai *reflectivity* maksimum (Z_{maks}), ketinggian *reflectivity* maksimum dan *freezing level* pada setiap kejadian hujan es dalam cakupan radar dalam wilayah II sebanyak 19 kasus kejadian. Analisis karakteristik parameter tersebut mengambil kasus kejadian hujan es pada wilayah II dimaksudkan untuk mendapatkan kriteria parameter dengan efek pengaruh limitasi radar yang paling minimum jika dibandingkan dengan wilayah I dan III.



Gambar 4. Grafik Nilai Z Maksimum

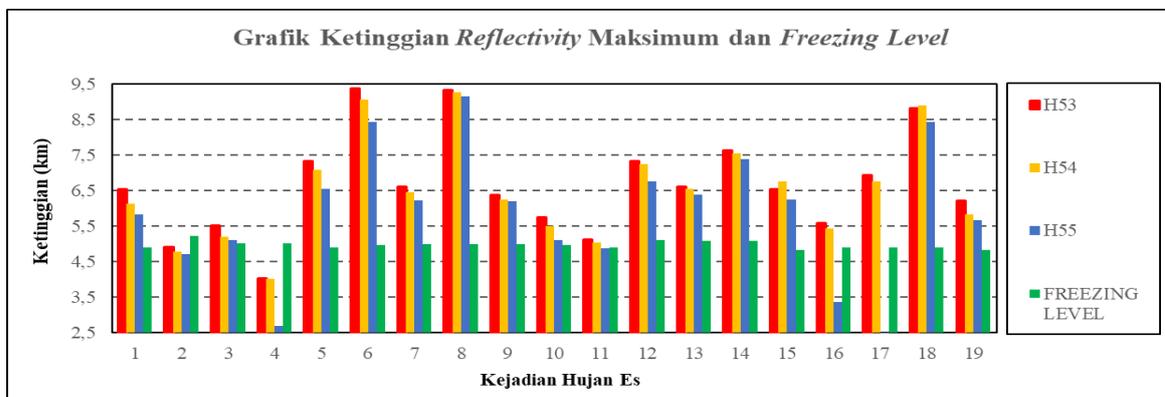
Hasil pengolahan menunjukkan nilai *reflectivity* maksimum terendah adalah 51 dBZ dan nilai *reflectivity* maksimum tertinggi adalah 57 dBZ (Gambar 4). Hal ini menunjukkan bahwa seluruh kasus hujan es yang diteliti disebabkan oleh adanya pertumbuhan awan konvektif jenis *Cumulonimbus* yaitu yang memiliki nilai *reflectivity* lebih dari 40 dBZ (Roberts dan Rutledge, 2003). Dari hasil tersebut, dilakukan analisis statistik untuk menentukan nilai rata-rata, median, dan modus dari nilai Z_{maks} pada 19 kasus tersebut. Sebelumnya, 19 nilai *reflectivity* dibagi ke dalam enam rentang kelas berdasarkan jangkauan data untuk ditampilkan dalam bentuk tabel distribusi frekuensi (Tabel 5). Setelah dilakukan penghitungan statistik didapatkan nilai median sebesar 53.60 dBZ, nilai modus 53.91 dBZ, serta nilai rata-rata 54.81 dBZ. Untuk menentukan kriteria, hasil akhir perhitungan dibulatkan untuk menyederhanakan.

Tabel 5. Distribusi frekuensi nilai Z_{maks} (dBZ) dan analisis statistik

Z_{maks}	Frekuensi
51.0-52.3	4
52.4-53.7	6
53.8-55.1	3
55.2-56.5	3
56.6-57.9	3
Minimum	51
Maksimum	57
Rata-rata	55
Median	53
Modus	54

Dari nilai tersebut dilakukan pengolahan ketinggian *reflectivity* dengan menggunakan produk EHT pada aplikasi Rainbow 5.49.11. Pengaturan produk EHT diubah pada bagian

Minimum Reflectivity dengan nilai 53, 54, dan 55 dBZ sesuai dengan nilai yang didapatkan pada langkah sebelumnya. Kemudian didapatkan nilai ketinggian dalam kilometer (km) yang selanjutnya menjadi nilai ketinggian *reflectivity* maksimum (Hz) yang kemudian akan diambil rata-ratanya. Parameter tersebut menjadi salah satu parameter dalam metode waldvogel.



Gambar 5. Grafik Ketinggian *Reflectivity* Maksimum dan *Freezing Level*

Selain itu parameter metode Waldvogel selanjutnya adalah *freezing level*. Profil nilai ketinggian *reflectivity* maksimum dan *freezing level* pada 19 kasus kejadian hujan es dapat dilihat pada Gambar 5. Secara umum terlihat nilai minimum untuk H53, H54, dan H55 berturut-turut adalah 3.84, 3.84, dan 3.72 km. Nilai maksimumnya berturut-turut adalah 9.33, 9.27, dan 9.15 km. Nilai rata-rata, yaitu 6.65, 6.51, dan 6.37 km. Sementara itu nilai *freezing level* berkisar antara 4.8 hingga 5.1 km dengan rata-rata 4.9 km. Nilai yang digunakan sebagai modifikasi adalah nilai rata-rata dari masing-masing parameter modifikasi.

4.2. Kriteria Waldvogel Modifikasi

Berdasarkan analisis statistik maka diambil empat nilai Z_{maks} sebagai kriteria modifikasi yaitu 53, 54, dan 55 dBZ. Nilai ini jauh lebih tinggi dari nilai awal kriteria Waldvogel yaitu 45 dBZ. Begitupun dengan ketinggian FL, didapatkan nilai yang lebih tinggi dari kriteria awal sebesar 3.0 km. Sedangkan untuk selisih antara ketinggian *reflectivity* maksimum dengan *freezing level* (HZ-FL) hasilnya relatif sama dengan kriteria awal yaitu sebesar 1.2 hingga 1.6 km.

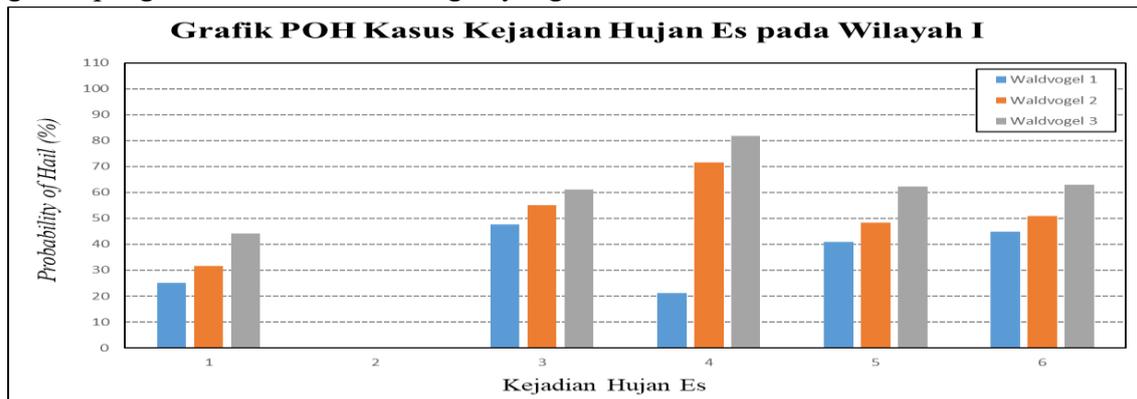
Tabel 6. Kriteria parameter-parameter metode Waldvogel modifikasi

	Z (dBZ)	H _Z	FL	H _Z -FL
Waldvogel 1	5	1	9	.2
Waldvogel 2	4	5	9	.6
Waldvogel 3	3	6	9	.3

Dengan didapaknya 3 nilai *reflectivity* maksimum dan nilai rata-rata *freezing level* maka dihasilkan 3 kriteria modifikasi metode Waldvogel yaitu Waldvogel 1, Waldvogel 2 & Waldvogel 3 (Tabel 6). Ketiga kriteria inilah yang digunakan untuk menghitung *Probability of Hail* (POH). Hasil perhitungan ini kemudian diverifikasi menggunakan produk ZHAIL pada aplikasi rainbow dan dilakukan perbandingan dengan hasil verifikasi jika menggunakan kriteria awal yaitu tanpa modifikasi.

4.3. Verifikasi

Verifikasi dilakukan terhadap nilai probabilitas hujan es (*Probability of Hail*) yang teramati di radar pada seluruh kasus kejadian hujan es. Verifikasi terhadap kasus kejadian hujan es dilakukan secara terpisah menurut pembagian wilayah yaitu Wilayah I, Wilayah II dan Wilayah III. Produk radar ZHAIL dengan parameter modifikasi menghasilkan nilai POH yang bervariasi bergantung pada kriteria yang ditentukan (Waldvogel 1, Waldvogel 2 & Waldvogel 3). Selain itu hasil verifikasi pada masing-masing wilayah menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antara satu dengan yang lain.



Gambar 6. Grafik POH kasus kejadian hujan es Wilayah I

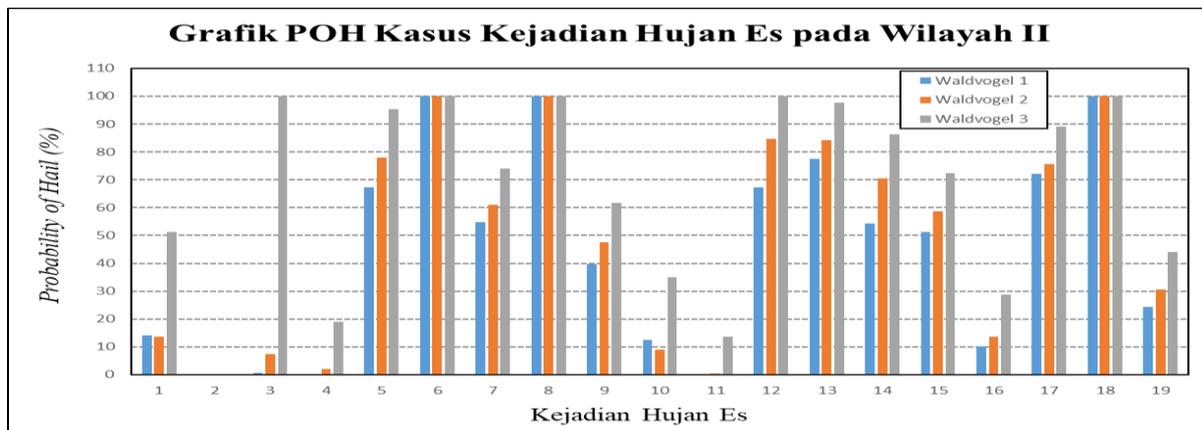
Dari Gambar 6 terlihat nilai POH kejadian hujan es di wilayah I berkisar 20-30 % untuk kriteria Waldvogel 1, 30-72 % untuk Waldvogel 2 dan 44-82 % untuk Waldvogel 3. Nilai POH pada kasus kejadian 22 April 2014 di Palmerah menunjukkan hasil 0% untuk semua kriteria modifikasi. Hal tersebut dikarenakan jarak yang cukup dekat antara kasus kejadian dengan pusat radar yaitu 14 km. Hal ini membuat profil awan penyebab hujan es tidak tertangkap seluruhnya oleh radar cuaca akibat terbatasnya elevasi pengamatan atau sering disebut dengan *cone of silence*. Kondisi tersebut menyebabkan nilai ketinggian *reflectivity* maksimum yang teramati bernilai dibawah *freezing level* dan kemudian menghasilkan nilai nilai POH 0 %

Tabel 7. Nilai POD, FAR dan CSI dari POH Wilayah I

	POD	FAR	CSI
Waldvogel 1	0.83	0.61	0.35
Waldvogel 2	0.83	0.61	0.35
Waldvogel 3	0.83	0.61	0.35
Waldvogel Awal	1.00	0.87	0.18

Verifikasi menunjukkan nilai yang sama dari tiga kriteria yang diujikan (Tabel 7). Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai POH antara ketiga kriteria yang cenderung tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan hasil perhitungan POH di wilayah II. Hal tersebut dimungkinkan karena kontur *reflectivity* pada awan bagian atas diatas *freezing level* relatif menunjukkan nilai yang sama. Hal ini disebabkan awan bagian atas/puncak mencapai elevasi tertinggi dari pengamatan *beam* radar sehingga sangat memungkinkan ada bagian awan yang tidak teramati oleh *beam* radar dan nilai yang masih teramati akan memiliki nilai ketinggian yang berdekatan atau bahkan sama. Jika dibandingkan dengan metode Waldvogel dengan kriteria awal, nilai POD dan FAR Waldvogel awal lebih tinggi yaitu

masing-masing 1.0 dan 0.87. Tetapi, nilai CSI dengan modifikasi menunjukkan nilai yang lebih baik dari kriteria awal yang hanya menunjukkan nilai CSI 0.18. Hal tersebut dikarenakan metode dengan kriteria awal menunjukkan hasil deteksi yang *overestimate*. Dalam penelitian Permata (2018) juga menyimpulkan hasil yang *overestimate* jika menggunakan metode awal tanpa modifikasi. Metode tersebut cenderung sering mendeteksi terjadi hujan es pada wilayah II yang faktanya tidak terjadi hujan es.



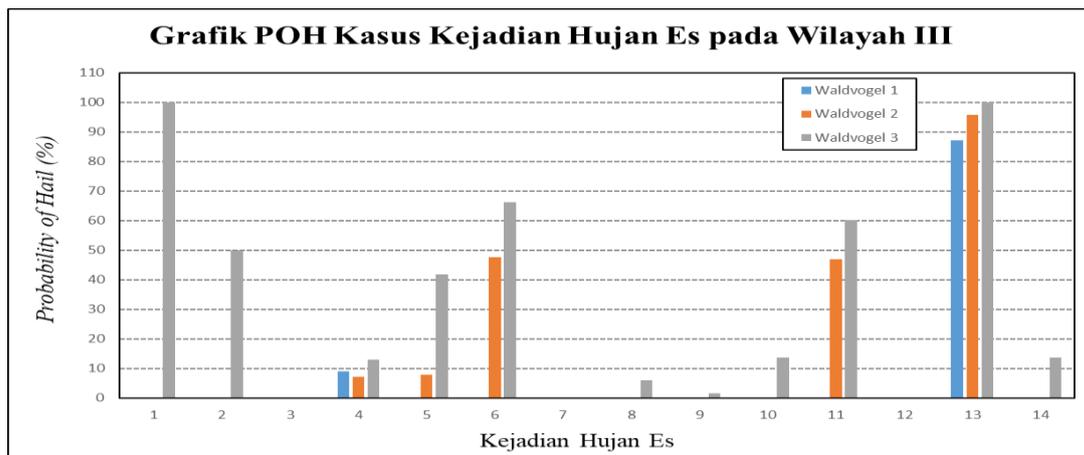
Gambar 7. Grafik POH kasus kejadian hujan es Wilayah II

Perhitungan POH tiga kriteria metode Waldvogel modifikasi yang diujikan pada Gambar 7 menunjukkan variasi POH yang bervariasi. Sebagian besar kejadian hujan es menunjukkan *Probability of Hail* (POH) di atas 60 %. Hal ini disebabkan reflektivitas profil awan vertikal dapat teramati secara utuh oleh radar. Limitasi radar seperti *blank zone* maupun pengurangan intensitas *beam* pada wilayah II adalah paling minimum.

Tabel 8. Nilai POD, FAR dan CSI dari POH Wilayah II

	POD	FAR	CSI
Waldvogel 1	0.84	0.33	0.59
Waldvogel 2	0.89	0.32	0.62
Waldvogel 3	0.94	0.31	0.66
Waldvogel Awal	1.00	0.80	0.13

Hasil verifikasi pada nilai POH Wilayah II (Tabel 8) menunjukkan bahwa Waldvogel 3 dengan nilai POD, FAR dan CSI berturut-turut 0.94, 0.31 dan 0.66 adalah metode yang paling tepat diterapkan. Selain karena memiliki nilai POD yang tinggi, nilai FAR yang terendah dan CSI yang tertinggi memuat Waldvogel 3 menjadi kriteria yang paling baik.



Gambar 8. Grafik POH kasus kejadian hujan es Wilayah III

Dari Gambar 8 terlihat nilai POH kejadian hujan es di wilayah III cukup berbeda dengan POH di wilayah I dan II. Hasil POH banyak kasus kejadian yang memiliki nilai POH 0 %. Kriteria Waldvogel 3 bernilai 9 % dan 86 % untuk kasus kejadian masing-masing 22 Juli 2018 dan 8 Oktober 2013. Kriteria Waldvogel 2 berkisar 7-96 % pada kasus kejadian 22 Juli 2018, 20 Maret 2018, 3 Mei 2017, 8 Oktober 2013 dan 29 November 2010. Kriteria Waldvogel 3 memiliki nilai presentasi yang lebih tinggi berkisar 3-100 % dengan jumlah kasus kejadian dengan tidak terdeteksi (0 %) berjumlah 3 kasus. Rendahnya nilai POH pada masing-masing kriteria dimungkinkan akibat kasus-kasus kejadian pada wilayah ini memiliki jarak yang jauh dari pusat radar. Selain terkena efek *beam spreading* (pengurangan intensitas energi *beam*) (Holleman, 2006), lokasi terbentuknya awan yang terletak jauh dari radar memungkinkan *beam* radar yang hanya mendeteksi sebagian struktur awan bagian atas. Hal ini menyebabkan nilai ketinggian *reflectivity* rendah pada radar yang jika lebih rendah dari ketinggian *freezing level* maka nilai POH akan bernilai 0 %.

Tabel 9. Nilai POD, FAR dan CSI dari POH Wilayah III

	POD	FAR	CSI
Waldvogel 1	0.14	0.80	0.09
Waldvogel 2	0.35	0.61	0.22
Waldvogel 3	0.78	0.41	0.50
Waldvogel Awal	0.87	0.70	0.60

Verifikasi menunjukkan kriteria Waldvogel 3 lebih baik dari 2 kriteria lainnya dengan nilai POD, FAR dan CSI berturut-turut 0.78, 0.41 dan 0.50. Akan tetapi hasil ini masih lebih rendah dibandingkan dengan kriteria metode awal dengan nilai POD, FAR dan CSI berturut-turut 0.87, 0.70 dan 0.60. Hal ini berarti untuk wilayah 3 kriteria yang paling baik diterapkan adalah kriteria metode Waldvogel awal dengan nilai Z_{maks} yang rendah yaitu 45. Hal ini sesuai dengan sifat radar mengalami pengurangan intensitas energi *beam* yang dipancarkan. Sehingga nilai *reflectivity* yang besar pada jarak yang dekat akan terdeteksi memiliki nilai *reflectivity* yang lebih rendah di jarak yang lebih jauh. Maka kriteria dengan *threshold* nilai *reflectivity* yang lebih rendah menjadi pilihan yang tepat.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan deteksi hujan es di tiga wilayah menghasilkan rata-rata nilai probabilitas yang berbeda-beda yang merupakan akibat dari perbedaan jarak dari radar cuaca. Hasil verifikasi menunjukkan metode Waldvogel modifikasi menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan metode Waldvogel awal untuk wilayah I dan II dengan kriteria metode Waldvogel modifikasi yang paling baik yaitu Waldvogel 3. Sedangkan untuk wilayah III, nilai kriteria yang lebih baik adalah Waldvogel tanpa modifikasi.

Penambahan kasus kejadian dan lokasi cakupan yang lebih luas perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat. Selain itu pengaplikasian hasil penelitian dalam operasional secara langsung juga sangat berguna untuk mengetahui seberapa akurat hasil yang didapatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Hidayati, S. dan Ali, A., 2016, Uji Metode Waldvogel sebagai Indikator Probabilitas Hujan Es di Indonesia Berbasis Data Radar Cuaca Doppler, Prosiding Seminar Hari Meteorologi Dunia 2016, STMKG, Jakarta.
- Holleman, I., 2001, Hail detection using single-polarization radar, Scientific Report KNMI WR-2001- 01, Belanda.
- Holleman, I., 2006, Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations, Technical Report KNMI TR-290, Belanda.
- Hong, Y., Gourley, J. J., 2015, Radar Hydrology: Principles, Models, and Applications, CRC Press, New York.
- Kessinger, C. J., E. A. Brandes, and J. W. Smith: 1995, A comparison of the NEXRAD and NSSL hail detection algorithms. 27th conference on Radar Meteorology, AMS, 603–605.
- Lutgens, F. K. dan Tarbuck, E. J., 2013, The Atmosphere: an Introduction to Meteorology, 12th ed. Pearson Education Inc., New York.
- Permata, C.A.D., 2018, Modifikasi Metode Waldvogel Berdasarkan Identifikasi Karakteristik Hujan Es di Wilayah Jawa Bagian Barat, Skripsi, Program Sarjana Terapan Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang.
- Roberts, R. D. dan S. Rugledge, 2003, Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data, *Weather and Forecasting*, 18, 562-584.
- Rogers, R.R., Yau, M.K, 2006, A Short Course in Cloud Physics (Third Edition): Hal 235. Burlington: Elsevier Science.
- Skripniková, K. dan Řezáčová, D., 2014, Radar-based hail detection, *Atmospheric Research*, 144, 175– 185.
- Waldvogel, A., Federer, B., dan P. Grimm, 1979, Criteria for the detection of hail cells, *J. Appl. Meteor.*, 18, 1521–1525.
- Wilks, D.S, 1995, *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press. Chapter 7.
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W., dan Thomas, K. W., 1998, An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 13(2), 286–303.
- Zakir, A., 2008, Modul Praktis Analisis dan Prakiraan Cuaca, BMKG, Jakarta.