

ANALISIS POLA DISTRIBUSI AWAN SEBELUM DAN SELAMA PELAKSANAAN TEKNOLOGI MODIFIKASI CUACA PADA PERIODE CENS (CROS-EQUATORIAL NORTHERLY SURGE) TAHUN 2022 DI PROVINSI BANTEN

Analysis of Cloud Distribution Patterns Prior to and During Weather Modification Technology Campaign Amidst 2022 Cross Equatorial Northerly Surge (CENS) Events over Banten Province

Rifatul Jannah¹⁾, Fiolenta Marpaung²⁾, Yayat Ruhiyat¹⁾, Asep Saefullah¹⁾

¹⁾ Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Jl. Raya Palka Km 3 Sindangsari, Pabuaran, Serang, Banten.

²⁾ Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat 10340.

*E-mail : jnhrifatul@gmail.com

Intisari

Kajian dari BMKG mengindikasikan bahwa aktifnya Cross-Equatorial Northerly Surge (CENS) pada bulan Desember 2022 hingga Januari 2023 dapat meningkatkan pembentukan awan hujan, yang berpotensi meningkatkan curah hujan di wilayah Pulau Jawa, termasuk Provinsi Banten. Untuk mengatasi cuaca ekstrem, Teknologi Modifikasi Cuaca diterapkan di Provinsi Banten pada tanggal 01-10 Januari 2023. Analisis distribusi awan sangat penting dalam penerapan teknologi ini, terutama untuk mengidentifikasi awan cumulus yang berpotensi menjadi target penyemaian. Data radar cuaca, yang disajikan dalam bentuk peta CMAX dengan nilai reflektivitas di atas 20 dBz, memberikan informasi penting mengenai keberadaan awan tersebut. Oleh karena itu, analisis pola distribusi awan sebelum (22-31 Desember 2022) dan selama (01-10 Januari 2023) pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca di Provinsi Banten dan sekitarnya merupakan fokus kajian ini. Analisis spasial menunjukkan bahwa pola distribusi awan cumulus sebelum pelaksanaan memiliki rata-rata rasio sebaran luasan sebesar 30%. Rasio distribusi awan yang luas (rasio > 75%) terjadi pada tanggal 25 Desember 2022 (90%) di daerah DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi; 26 Desember 2022 (92%) dan 28 Desember 2022 (97%) di daerah Sukabumi dan Bogor; serta pada tanggal 28 Desember 2022 (88%) di daerah Samudra Hindia dan Lebak. Selama pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (01-10 Januari 2023), persentase distribusi awan cumulus turun menjadi 7%, dengan rasio distribusi awan yang luas hanya terjadi di wilayah DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi (95%) pada tanggal 04 Januari 2023. Meskipun terjadi penurunan pola distribusi awan sebesar 23%, perbedaan dalam pola rata-rata dan variasi distribusi awan sebelum dan selama pelaksanaan teknologi tersebut tidak signifikan.

Kata Kunci: Teknologi Modifikasi Cuaca, Radar, Refektivitas, Distribusi awan, Awan cumulus.

Abstract

BMKG studies indicate that the active Cross-Equatorial Northerly Surge (CENS) from December 2022 to January 2023 could boost rain cloud formation, potentially leading to increased rainfall on Java Island, including Banten Province. Weather Modification Technology was deployed in Banten Province from January 1-10, 2023, to address extreme weather. Analyzing cloud distribution, particularly for cumulus clouds targeted for seeding, is crucial for this technology. Weather radar data, presented as CMAX maps with reflectivity values exceeding 20 dBz, provides essential insights into cloud dynamics. Therefore, this study focused on examining the distribution patterns of cumulus clouds before and during the implementation of the Weather Modification Technology in Banten Province. Spatial analysis reveals that before the technology's implementation (December 22-31, 2022), the average distribution of cumulus clouds in Banten Province and surrounding areas was 30%. The most extensive cloud cover, exceeding 75%, was observed on 25 December 2022, reaching 90% in DKI Jakarta, Tangerang, Depok, and Bekasi. This high coverage continued with ratios of 92% on 26 December 2022 and 97% on 28 December 2022 in Sukabumi and Bogor, and 88% on 28 December 2022 in the Indian Ocean and Lebak areas. During the Weather Modification Technology period (January 1-10, 2023), the average distribution of cumulus clouds decreased to

7%, with a peak of 95% occurring only on 4 January 2023 in DKI Jakarta, Tangerang, Depok, and Bekasi. Despite a 23% decrease in cloud distribution, the differences in mean and variance of cloud distribution before and during the implementation were not statistically significant.

Keywords: Weather Modification Technology, Radar, Reflectivity, Cloud Distribution, Cumulus Cloud.

1. PENDAHULUAN

Selama musim dingin di Belahan Bumi Utara, terutama Benua Asia; wilayah Indonesia, khususnya di bagian barat, akan mengalami peningkatan aktivitas konvektif. Hal ini terjadi karena adanya pola angin di wilayah Indonesia yang datang dari arah utara dan membawa uap air setelah melewati perairan hangat yang luas (Chang *et al.*, 2016). Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) telah merilis peringatan mengenai potensi cuaca ekstrem di Indonesia selama Natal 2022 dan Tahun Baru 2023 akibat adanya fenomena CENS (*Cross-Equatorial Northerly Surge*) yang aktif. CENS diidentifikasi sebagai kecepatan angin meridional rata-rata yang melebihi 5 m/s. CENS memiliki peran penting dalam memicu aktivitas konveksi yang kuat, yang dapat mengakibatkan hujan ekstrem dan banjir, dan biasanya terjadi dari akhir Desember hingga pertengahan Februari (Hattori *et al.*, 2011).

Provinsi Banten yang terletak di sebelah selatan Pantai Jawa dan sebelah Timur Selat Sunda merupakan wilayah yang dominan dilewati oleh aliran masa udara (CENS) yang sedang aktif sehingga Provinsi Banten diwaspadai terhadap ancaman banjir. BMKG merilis bahwa pada periode Dasarian III Desember 2022 (21-31 Desember 2022), curah hujan tinggi terjadi di wilayah Banten terutama wilayah Kabupaten Lebak. Fenomena CENS yang bertahan hingga Januari 2023, diprediksi akan memberikan dampak curah hujan yang tinggi di wilayah Banten, sebagian Jawa Barat, Jawa Tengah, sebagian Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, dan sebagian Sulawesi Selatan pada periode Dasarian I Januari 2023 (BMKG, 2023). Untuk menindak lanjuti hal tersebut, maka Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) diterapkan di Provinsi Banten untuk antisipasi cuaca ekstrem selama periode 1-10 Januari 2023. Dampaknya, strategi penyemaian banyak dilakukan di wilayah barat Provinsi Banten (Selat Sunda) dan di sebelah selatan Provinsi Banten (Samudera Hindia) (Lab. TMC, 2023).

Awan yang dijadikan sasaran dalam kegiatan TMC adalah jenis awan cumulus (Cu) yang aktif atau berpotensi, yang terbentuk proses konveksi (Prasetyo, 2019). Renggono (2011) menjelaskan bahwa dengan mengidentifikasi jenis awan tersebut, dapat diperkirakan intensitas curah hujan yang terjadi, serta memberikan peringatan terhadap potensi

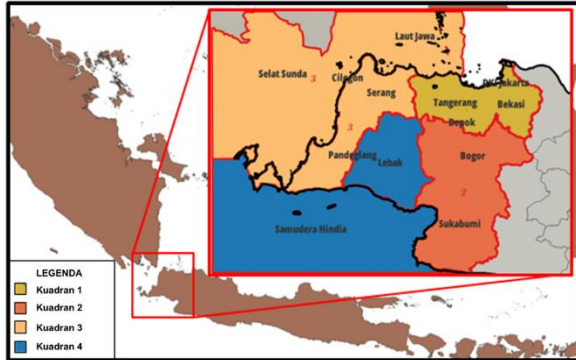
bencana yang mungkin ditimbulkan oleh awan tersebut. Penelitian Pandjaitan *et al.* (2020) mengungkapkan bahwa siklus cumulus dapat berubah dengan cepat. Oleh karena itu, deteksi yang akurat terhadap keberadaan awan menjadi sangat penting agar informasi tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal. Dalam kegiatan TMC di Indonesia, pemantauan keberadaan awan cumulus potensial sering kali dilakukan dengan mengamati produk radar cuaca. Prasetyo *et al.* (2020) menegaskan bahwa radar cuaca merupakan alat andal untuk menganalisis kondisi cuaca fluktuatif dalam skala lokal dan durasi singkat, terutama saat terjadi banjir akibat curah hujan tinggi. Radar cuaca digunakan untuk mengamati kondisi atmosfer, memantau sebaran hujan, serta memantau pergerakan dan pertumbuhan awan yang berpotensi menimbulkan hujan.

Renggono *et al.* (2022) mengungkapkan bahwa pemanfaatan teknologi modifikasi cuaca di Indonesia semakin berkembang, meliputi sektor pertanian dan mitigasi bencana hidrometeorologi. Penggunaan teknologi modifikasi cuaca dalam penanggulangan kebakaran hutan juga mengalami peningkatan pesat. Dalam menghadapi dampak perubahan iklim dan menjaga keberlanjutan lingkungan, TMC semakin mendapat perhatian sebagai salah satu solusi. Sidauruk *et al.* (2023) mengemukakan bahwa TMC dianggap sebagai salah satu strategi yang efektif dalam menghadapi bencana alam. Dengan begitu, teknologi ini dapat diimplementasikan di beberapa wilayah termasuk untuk antisipasi cuaca ekstrem di Provinsi Banten.

Analisis curah hujan sebelum dan selama kegiatan TMC sering dilaporkan, termasuk persentase curah hujan yang berhasil diturunkan dan perbandingannya dengan pola klimatologi. Namun, pola distribusi awan hanya dijelaskan secara umum dan hanya selama periode TMC. Oleh karena itu, penting untuk memahami perubahan pola distribusi awan sebelum dan selama TMC untuk menilai efektivitas TMC dalam memodifikasi awan. Selain itu, analisis pola awan cumulus menggunakan radar cuaca memberikan data yang lebih akurat dan rinci tentang kondisi dan pergerakan awan. Data ini memungkinkan prediksi cuaca yang lebih baik karena memberikan informasi yang lebih luas dan mendalam tentang kondisi atmosfer, dibandingkan dengan data curah hujan yang sering terbatas pada lokasi tertentu dan tidak mencakup kondisi atmosfer secara menyeluruh.

(Nugroho *et al.*, 2018). Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk menganalisis pola distribusi awan cumulus sebelum dan selama TMC di Provinsi Banten pada periode CENS 2022 yang aktif menggunakan data radar cuaca.

2. METODE



Gambar 1. Lokasi studi kasus Provinsi Banten dan sekitarnya.

2.1. Wilayah Studi

Provinsi Banten merupakan sebuah provinsi di Pulau Jawa, provinsi yang terletak di paling barat Pulau Jawa. Luas wilayah Banten adalah 9.160,70 km², letaknya berada antara 5°7'50"–7°1'11" LS dan 105°1'11"–106°7'12" BT (BPKP, 2007).

2.2. Data

Penelitian ini menggunakan produk data reflektivitas radar maksimum (CMAX) dalam format PNG selama 20 hari (22 Desember 2022–10 Januari 2023). Radar C-Band, yang beroperasi pada frekuensi 4-8 GHz dan panjang gelombang 4–8 cm, digunakan untuk pengawasan cuaca jangka pendek, termasuk di dekat bandara (Sinatra, 2014). Data CMAX (*Column Maximum*) dipilih karena dapat mengidentifikasi area dengan intensitas curah hujan yang sangat tinggi, sedangkan data CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) lebih sering digunakan untuk memahami distribusi curah hujan pada ketinggian tertentu. Selain itu, CMAX juga lebih akurat dalam memprediksi total curah hujan dibandingkan CAPPI, terutama di daerah yang terkena pengaruh curah hujan orografik (Yoon *et al.*, 2014). Data ini merupakan produk hasil pemrosesan BMKG setiap 8 menit dan dikelompokkan menjadi dua periode: sebelum TMC (22–31 Desember) dan selama TMC (01–10 Januari 2023). Data diperoleh dari website SiDarma

(<https://radar.bmkg.go.id/sidarma-nowcast/login.php>) yang dimiliki Stasiun Meteorologi Kelas I Soekarno-Hatta. Selain itu, data mengenai kegiatan TMC di Provinsi Banten, seperti informasi penerbangan (*cloud seeding flight*) dari posko Bandara Halim Perdana Kusuma diperoleh dari Laboratorium

Pengelolaan Teknologi Modifikasi Cuaca, Badan Riset dan Inovasi Nasional (Lab TMC, BRIN).

2.3. Pengolahan Data

Pengolahan dan analisis data sebelum dan selama kegiatan TMC difokuskan pada rentang waktu 07.05-13.05 WIB. Rentang ini dipilih karena *cloud seeding flight* dilaksanakan selama puncak hujan (awan potensial masuk di wilayah Banten) yang umumnya terjadi antara pukul 07.00-12.00 WIB di wilayah Banten, serta periode puncak hujan sebelum TMC, yang sering terjadi antara pukul 10.00-13.00 WIB. Selain itu, puncak hujan akibat fenomena aktif CENS umumnya terjadi pada dini hari hingga pagi menjelang siang (Lubis *et al.* 2022; Yulihastin *et al.*, 2020; Dewi *et al.*, 2023). Dengan demikian, rentang waktu 07.05–13.05 WIB mewakili puncak hujan sebelum dan selama TMC selama periode aktif CENS di Provinsi Banten. Data kemudian disusun dalam format yang dapat diolah perangkat lunak.

Untuk memudahkan analisis, wilayah sebaran awan potensial hujan dibagi menjadi empat kuadran berdasarkan batas administrasi. Kuadran 1 meliputi DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi; Kuadran 2 mencakup Sukabumi dan Bogor; Kuadran 3 meliputi Pandeglang, Serang, Cilegon, sebagian Selat Sunda, dan Laut Jawa; Kuadran 4 mencakup Lebak dan sebagian Samudera Hindia (Gambar 1). Perbedaan luasan setiap kuadran juga mempertimbangkan kepadatan informasi; wilayah dengan informasi rendah memerlukan cakupan yang lebih besar, sedangkan wilayah dengan informasi tinggi memerlukan cakupan yang lebih kecil (Saputri, 2010).

2.4. Analisis Spasial

Sebaran awan-awan tersebut secara spasial dianalisis dan dipresentasikan dalam QGIS (Quantum GIS). QGIS merupakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) berbasis open source dengan lisensi di bawah GNU *General Public License* yang dapat dijalankan dalam berbagai sistem operasi, QGIS bertujuan untuk menjadi GIS yang mudah digunakan dengan menyediakan fungsi dan fitur umum (Budiyanto, 2016). Analisis spasial dilakukan untuk memahami distribusi awan cumulus berdasarkan lokasi dan atributnya. Pada penelitian ini terdapat 3 tahapan utama analisis spasial, yaitu:

2.4.1 Georeferencer

Tahap georeferencer pada penelitian ini merupakan proses mengaitkan citra raster atau peta CMAX (.PNG) yang telah didapat dari Stasiun Meteorologi dengan koordinat geografis, sehingga citra tersebut dapat memiliki informasi koordinat geografis yang tepat di peta. Hal ini memungkinkan integrasi data citra dengan data

spasial lainnya dalam analisis SIG dan memahami lokasi yang tepat dari fenomena yang diamati.

2.4.2 Digitasi

Tahapan digitasi pada penelitian ini merupakan proses pembuatan representasi vector dari objek dalam citra raster atau peta CMAX yang telah diolah pada tahap georeferencer (.tiff). Hal ini dilakukan untuk membuat data vektor yang dapat digunakan dalam analisis spasial, seperti pengukuran atau identifikasi pola spasial.

2.4.3 Perhitungan Luas

Perhitungan luas dalam penelitian ini menghitung area dari kelompok sebaran nilai reflektivitas (> 20 dBZ) yang didigitalkan dalam citra pada tahap digitasi. Luasan sebaran reflektivitas kemudian disajikan sebagai rasio antara luas area reflektivitas yang terdigitasi dari data radar CMAX dan luas wilayah kuadrannya. Ini memberikan informasi tentang luas area tertentu dan distribusi spasial.

2.5 Uji Statistik

Uji asumsi merupakan syarat statistik yang harus dipenuhi sebelum melakukan uji *paired sample t-test* dan ANOVA (*Analysis of Variance*) seperti, data yang digunakan harus berdistribusi normal uji normalitas dapat dilakukan menggunakan kolmogorov-smirnov atau shapiro-wilk Varians dan dari kedua sampel berpasangan harus homogen. Uji statistik yang digunakan pada penelitian yaitu uji *paired sample t-test* yang digunakan untuk membandingkan rata-rata kelompok distribusi awan cumulus sebelum dan selama pelaksanaan TMC, uji ini diperuntukkan untuk menentukan apakah ada perbedaan yang signifikan antara dua kelompok yang di uji. Selanjutnya, uji *F* (ANOVA) yang digunakan untuk membandingkan variasi rata-rata antara distribusi awan cumulus sebelum dan selama pelaksanaan TMC. Rumus uji *paired sample t-test*:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \dots \dots \dots (1)$$

dimana $\bar{d}$ merupakan rata-rata dari perbedaan antara dua pengukuran. s_d merupakan standar deviasi dari rata-rata selisih dan n merupakan jumlah sampel yang diukur. Sedangkan, rumus uji *f*:

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \dots \dots \dots (2)$$

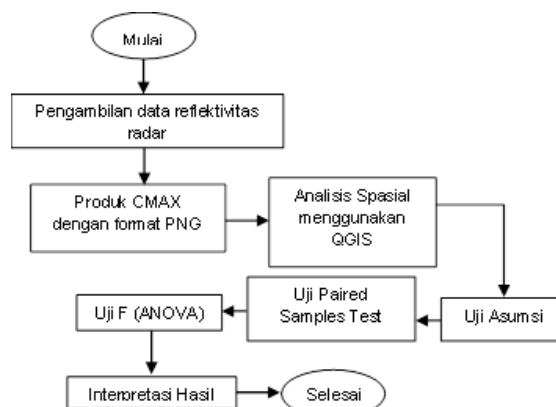
Dimana $MS_{between}$ merupakan *mean square* antara kelompok (dihitung sebagai variasi antar kelompok dibagi dengan derajat kebebasan antar kelompok) dan MS_{within} merupakan *mean square* dalam kelompok (dihitung sebagai variasi dalam kelompok dibagi derajat kebebasan dalam kelompok). Hipotesis uji *F* pada penelitian ini sbb:

- Hipotesis Nol (H_0): Tidak ada perbedaan signifikan antara kelompok distribusi awan

dan rata-rata distribusi awan cumulus sebelum dan selama pelaksanaan TMC.

- Hipotesis Alternatif (H_1): Ada perbedaan signifikan antara kelompok distribusi awan dan rata-rata distribusi awan cumulus sebelum dan selama pelaksanaan TMC

dimana jika nilai sig. < 0,1 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara kelompok distribusi awan dan variasi rata-rata distribusi sebelum dan selama pelaksanaan TMC di Provinsi Banten, dan jika nilai sig. > 0,1 menunjukkan tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kelompok distribusi awan dan variasi rata-rata distribusi awan sebelum dan selama pelaksanaan TMC di Provinsi Banten. Secara ringkas, bagan alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

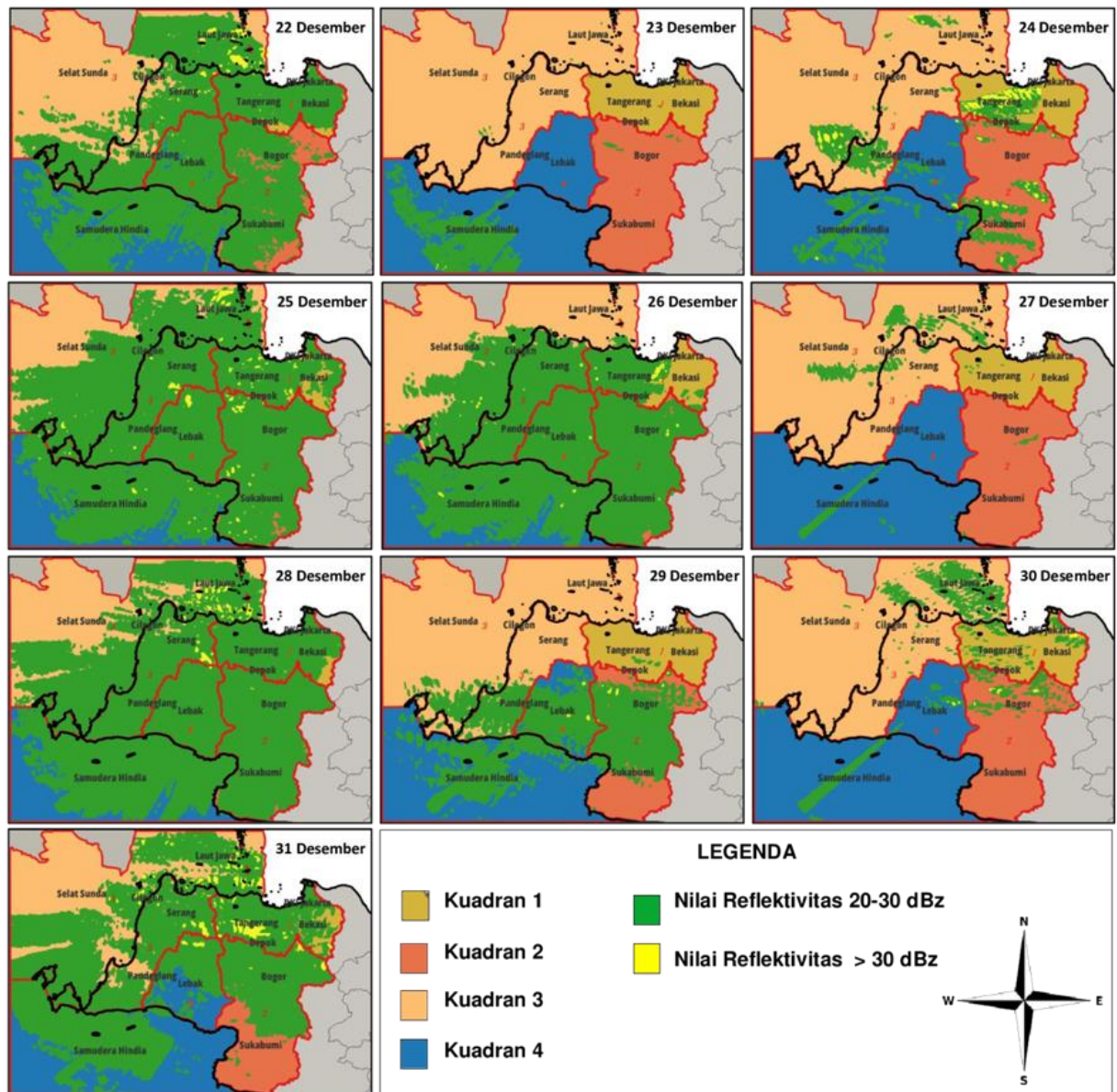


Gambar 2. Bagan alir penelitian.

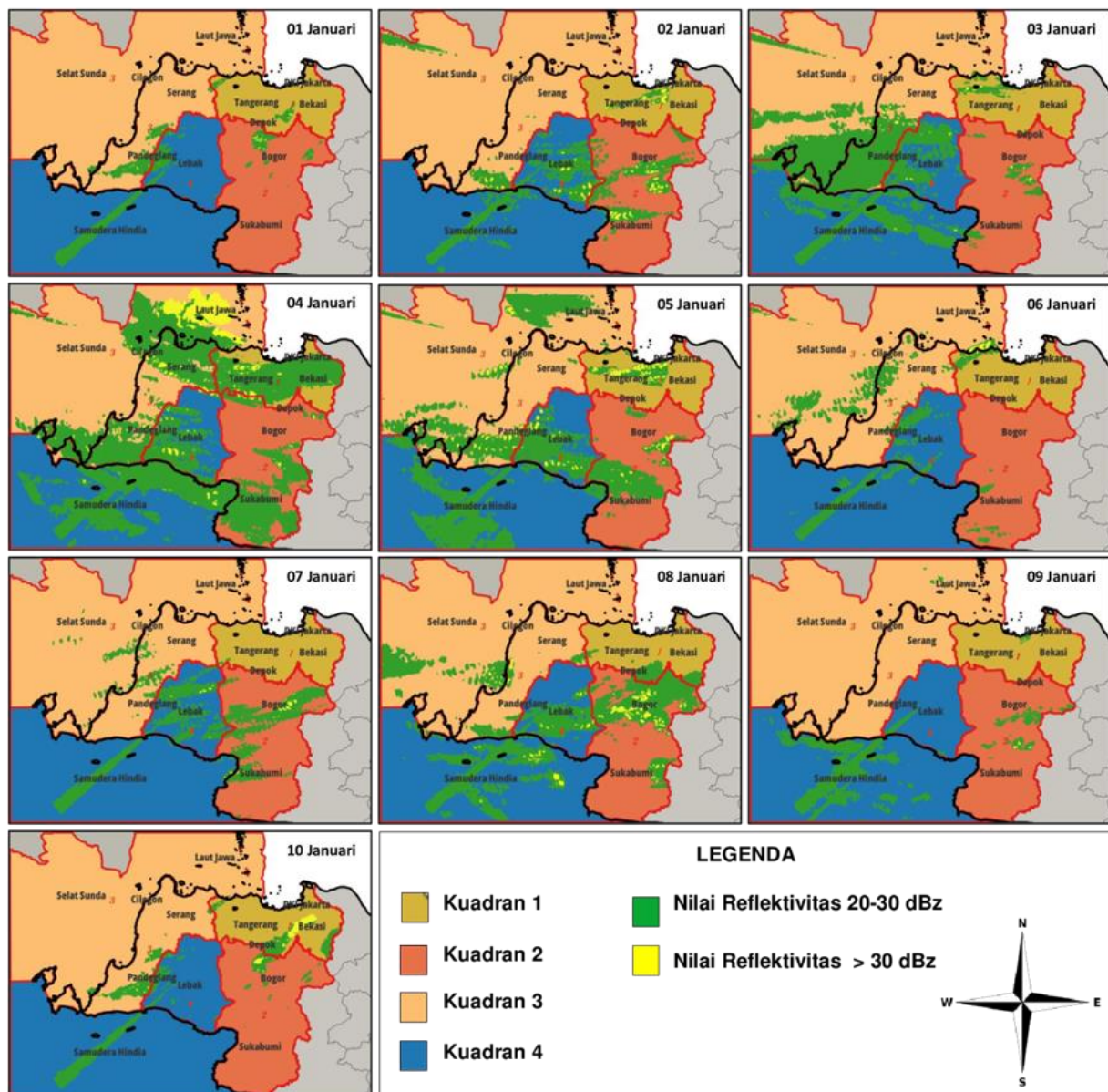
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pola Distribusi Awan Cumulus Sebelum dan Selama Pelaksanaan TMC

Pola distribusi awan cumulus sebelum dan selama kegiatan TMC di Provinsi Banten dan sekitarnya—termasuk DKI Jakarta, Tangerang, Depok, Bekasi (Kuadran 1), Sukabumi, Bogor (Kuadran 2), Pandeglang, Serang, Cilegon, Selat Sunda, dan Laut Jawa (Kuadran 3), serta Samudera Hindia dan Lebak (Kuadran 4)—dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Nilai reflektivitas menunjukkan intensitas hujan: warna hijau mewakili hujan ringan (dBZ = 20–30), sedangkan warna kuning menunjukkan hujan sedang hingga lebat (dBZ > 30). Pada Gambar 3, sebelum TMC, awan cumulus dengan intensitas hujan ringan hingga tinggi menyebar hampir di seluruh Provinsi Banten. Puncak sebaran awan terjadi pada 28 Desember 2022, sementara terendah pada 27 Desember 2022. Sedangkan selama periode pelaksanaan TMC, sebaran awan cumulus dominan dengan intensitas hujan ringan hampir di seluruh wilayah Provinsi Banten, dengan puncak sebaran terjadi pada 4 Januari 2023 (Gambar 4).



Gambar 3. Sebaran nilai refletivitas radar CMAX wilayah Kuadran 1 (coklat: DKI Jakarta, Tangerang, Depok dan Bekasi), Kuadran 2 (merah: Sukabumi dan Bogor), Kuadran 3 (jingga: Pandeglang, Serang, Cilegon, Selat Sunda, dan Laut Jawa; dan Kuadran 4 (biru: Samudera Hindia dan Lebak) sebelum periode pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (22–31 Desember 2022) di Provinsi Banten.



Gambar 4. Sebaran nilai refletivitas radar CMAX wilayah Kuadran 1 (coklat: DKI Jakarta, Tangerang, Depok dan Bekasi), Kuadran 2 (merah: Sukabumi dan Bogor), kuadran 3 (jingga: Pandeglang, Serang, Cilegon, Selat Sunda, dan Laut Jawa; dan Kuadran 4 (biru: Samudera Hindia dan Lebak) selama periode pelaksanaan Teknologi Modifikasi Cuaca (1–10 Januari 2023) di Provinsi Banten.

Selanjutnya, untuk lebih mengetahui rasio distribusi awan cumulus terbesar pada periode sebelum dan selama pelaksanaan TMC pada masing-masing kuadran, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan perbedaan rasio distribusi awan cumulus sebelum dan selama TMC. Rata-rata rasio sebaran awan sebelum TMC adalah $30 \% \pm 31 \%$, sedangkan selama TMC menurun menjadi $7 \% \pm 16 \%$. Penurunan rasio ini terjadi di setiap kuadran, dengan penurunan lebih dari 15 %. Di Kuadran 1, penurunannya sebesar 17 %, di Kuadran 2 sebesar 28 %, di Kuadran 3 sebesar 25 %, dan di Kuadran 4 sebesar 21 %.

Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa pada periode sebelum TMC, sebaran awan cumulus yang luas (rasio > 75%) terjadi pada

tanggal 25 Desember 2022 di Kuadran 1 (DKI Jakarta, Tangerang, Depok, Bekasi) dengan rasio 90 %, tanggal 26 Desember 2022 di Kuadran 2 (Sukabumi dan Bogor) dengan rasio 92 %, serta pada tanggal 28 Desember 2022 di Kuadran 2 (Sukabumi dan Bogor) dan Kuadran 4 (Samudera Hindia dan Lebak) dengan rasio masing-masing 97 % dan 88 %. Sebaliknya, selama TMC, sebaran awan cumulus yang luas hanya terjadi pada tanggal 4 Januari 2023 di Kuadran 1 (DKI Jakarta, Tangerang, Depok, Bekasi) dengan rasio 95 %.

3.2. Distribusi Awan Cumulus Per 2 Jam

Rasio distribusi awan cumulus yang luas (rasio > 75 %) yang telah diuraikan sebelumnya pada Subbab 3.1 kemudian disajikan lebih detail

pada rentang waktu per 2 jam (Tabel 2–5) untuk masing-masing tanggal 25 Desember 2022, 26 Desember 2022, 28 Desember 2022, dan 4 Januari 2023.

Tabel 1. Rasio luasan distribusi awan cumulus sebelum (22–31 Desember 2022) dan selama (01–10 Januari 2023) pelaksanaan TMC pada masing-masing kuadran di Provinsi Banten dalam satuan presentase.

Periode	Tgl	Kuadran			
		1	2	3	4
Sebelum TMC	22	59	33	51	20
	23	0	0	0	4
	24	11	3	2	1
	25	90	25	74	46
	26	58	92	58	56
	27	0	0	1	1
	28	49	97	41	88
	29	0	27	3	9
	30	3	2	5	3
	31	44	37	59	28
Rataan±SD		32±31	32±34	30±28	25±28
Selama TMC	1	0	0	0	1
	2	35	5	4	4
	3	2	1	17	5
	4	95	13	16	10
	5	5	6	5	6
	6	3	0	1	6
	7	0	6	1	1
	8	5	19	2	3
	9	0	1	0	5
	10	3	2	1	2
Rataan±SD		15±28	5±6	5±6	4±2

Tabel 2. Rasio luasan distribusi awan cumulus pada tanggal 25 Desember 2022 pada masing-masing kuadran di Provinsi Banten.

Waktu	Kuadran			
	1	2	3	4
07.05-09.05	0 %	3 %	12 %	10 %
09.13-11.05	9 %	17 %	10 %	32 %
11.13-13.05	81 %	6 %	52 %	3 %

Tabel 3. Rasio luasan distribusi awan cumulus pada tanggal 26 Desember 2022 pada masing-masing kuadran di Provinsi Banten.

Waktu	Kuadran			
	1	2	3	4
07.05-09.05	3 %	60 %	6 %	5 %
09.13-11.05	9 %	25 %	10 %	29 %
11.13-13.05	46 %	7 %	42 %	22 %

Tabel 4. Rasio luasan distribusi awan cumulus pada tanggal 28 Desember 2022 pada masing-masing kuadran di Provinsi Banten.

Waktu	Kuadran			
	1	2	3	4
07.05-09.05	30 %	35 %	15 %	20 %
09.13-11.05	10 %	28 %	11 %	44 %
11.13-13.05	10 %	34 %	16 %	24 %

Tabel 5. Rasio luasan distribusi awan cumulus pada tanggal 4 Januari 2023 pada masing-masing kuadran di Provinsi Banten.

Waktu	Kuadran			
	1	2	3	4
07.05-09.05	36 %	3 %	8 %	2 %
09.13-11.05	34 %	2 %	7 %	2 %
11.13-13.05	25 %	7 %	1 %	5 %

Pada 25 Desember 2022, rasio sebaran awan cumulus luas (rasio > 75 %) di Kuadran 1 (DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi) mencapai 81 % antara pukul 11.13–13.05 WIB (Tabel 2). Namun, rasio luas sebaran awan cumulus pada setiap dua jam untuk tanggal 26 Desember 2022, 28 Desember 2022, dan 4 Januari 2023 tidak terdeteksi (Tabel 4–5).

Pada Tabel 3, rasio sebaran tertinggi sebesar 60 % terjadi di Kuadran 2 (Sukabumi dan Bogor) pada 26 Desember 2022. Pada 28 Desember 2022, rasio sebaran awan cumulus tertinggi mencapai 44 % di Kuadran 4 (Samudera Hindia dan Lebak) antara pukul 09.13–11.05 WIB (Tabel 4). Selama periode pelaksanaan TMC pada 4 Januari 2023, rasio sebaran awan cumulus relatif rendah (< 8 %) di kuadran 2–4, kecuali di Kuadran 1, di mana rasio sebaran mencapai 31,7 % dengan nilai tertinggi 36% antara pukul 07.05–09.05 WIB (Tabel 5).

3.3. Hasil Uji Statistik

Hasil uji *paired samples test* menunjukkan nilai signifikansi (sig.) 0,608, yang lebih besar dari 0,1, dan uji F (ANOVA) menunjukkan nilai sig. 0,552, juga lebih besar dari 0,1. Ini berarti tidak ada cukup bukti statistik untuk menolak hipotesis nol (H_0), sehingga perbedaan distribusi awan cumulus sebelum dan selama TMC tidak signifikan secara keseluruhan.

Namun, hasil uji statistik untuk setiap kuadran menunjukkan nilai signifikansi 0,044, 0,027, dan 0,049 untuk kuadran 2, 3, dan 4 ($p\text{-value} < 0,1$). Ini mengindikasikan adanya perbedaan signifikan dalam distribusi awan cumulus antara periode sebelum dan selama TMC di Kuadran 2, 3, dan 4. Sebaliknya, untuk Kuadran 1, nilai signifikansi sebesar 0,128 ($p\text{-value} > 0,1$) menunjukkan bahwa tidak ada cukup bukti statistik untuk menolak hipotesis nol (H_0). Ini ini mengindikasikan bahwa perbedaan distribusi awan cumulus sebelum dan selama TMC tidak signifikan di Kuadran 1. Hasil ini mungkin dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti fokus analisis pada puncak hujan antara pukul 07.05–13.05 WIB dan pembagian kuadran yang mencakup lebih banyak daratan dibandingkan dengan area semai TMC yang sebagian besar berada di laut, khususnya di Kuadran 3 (Laut Jawa dan Selat Sunda) dan Kuadran 4 (Samudra

Hindia) (Tabel 6). Secara keseluruhan, meskipun curah hujan menurun selama pelaksanaan TMC, distribusi awan cumulus tidak menunjukkan penurunan yang signifikan.

3.4 Diskusi

Pola sebaran awan cumulus sebelum TMC menunjukkan bahwa nilai reflektivitas mencerminkan intensitas hujan ringan hingga tinggi yang menyebar hampir di seluruh Provinsi Banten dan sekitarnya. Puncak sebaran awan dengan nilai reflektivitas 20–30 dBz (hijau, intensitas hujan ringan) terjadi pada tanggal 28 Desember 2022, sementara puncak sebaran awan dengan nilai reflektivitas >30 dBz (kuning, intensitas hujan lebat) terjadi pada tanggal 31 Desember 2022 (lihat Gambar 3). Pola ini dipengaruhi oleh aktivitas MJO (Madden-Julian Oscillation), yaitu osilasi non-musiman dari anomali awan-awan konvektif bergerak melalui wilayah Benua Maritim ke Pasifik barat (Abhik *et al.*, 2023; Zhang, 2005). MJO yang sedang aktif di Indonesia pada fase 4 dan 5 (Benua Maritim) dari tanggal 22 hingga 28 Desember 2022, dan diperkuat oleh CENS aktif yang kuat pada tanggal 30 Desember 2022–4 Januari 2023 (www.bmkg.go.id), menyebabkan peningkatan intensitas curah hujan di Pulau Jawa, termasuk di Provinsi Banten. Namun, dari tanggal 29 Desember 2022 hingga 6 Januari 2023, MJO berada di Pasifik Barat pada Fase 6 dan 7, dan

pada tanggal 7 hingga 10 Januari 2023, MJO berada pada kondisi netral di Pasifik Barat (fase 7) (<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>), sehingga pengaruhnya terhadap kondisi atmosfer di wilayah Jawa, termasuk Provinsi Banten, menjadi kurang signifikan.

Secara umum, selama periode Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) dari 1 hingga 10 Januari 2023, terjadi pengurangan intensitas hujan di wilayah Jawa Barat dan Provinsi Banten. Namun, pada 4 Januari 2023, rasio sebaran distribusi awan tetap cukup tinggi (> 75 %) di daerah DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi, dengan nilai rasio mencapai 95 %. Kondisi ini disebabkan oleh fenomena CENS aktif yang kuat yang masih mempengaruhi wilayah tersebut. Selain itu, pengaruh gelombang Kelvin yang aktif (3–5 Januari 2023), juga menyebabkan pertumbuhan awan di selatan Pulau Jawa dan Sumatra, khususnya di Samudra Hindia tumbuh cukup signifikan

(<https://ncics.org/pub/mjo/archive/2023/2023-01-09/v2/>). Walaupun penerbangan *cloud seeding* difokuskan pada wilayah Selat Sunda pada tanggal 3 – 5 Januari 2023, rasio luasan distribusi awan pada rentang waktu tersebut berkisar antara 5–12% yang relatif lebih tinggi dibandingkan rasio distribusi awan pada rentang waktu lainnya (0–2%) (lihat Tabel 6, Tabel 5, dan Gambar 4).

Tabel 6. Rasio luasan distribusi awan cumulus selama periode pelaksanaan TMC (01-10 Januari 2023) di Provinsi Banten berdasarkan frekuensi penerbangan (*cloud seeding flight*).

Tanggal	Waktu (WIB)	Klasifikasi Waktu	Jumlah Penerbangan	Area Semai	Rasio Luasan Distribusi Awan	Kuadran
01 Jan 2023	07.21-08.56	1	3	Laut Jawa	0%	3
	08.14-09.50	1-2		Selat Sunda	0%	
	10.16-11.56	2-3		Laut Jawa	1%	
02 Jan 2023	09.09-10.58	2	3	Laut Jawa	0%	3
	09.00-12.12	2-3		Laut Jawa	0%	
	11.24-13.16	3		Selat Sunda	0%	
03 Jan 2023	08.09-09.44	1-2	2	Selat Sunda	1%	3
	10.21-12.30	2-3		Selat Sunda	12%	
04 Jan 2023	09.35-13.39	2-3	1	Selat Sunda	8%	3
05 Jan 2023	07.55-11.05	1-2	2	Selat Sunda	5%	3
	10.59-12.52	2		Selat Sunda	0%	
06 Jan 2023	09.54-11.49	2-3	1	Selat Sunda	1%	3
07 Jan 2023	09.10-11.17	2	1	Selat Sunda	1%	3
08 Jan 2023	08.39-10.39	1-2	1	Selat Sunda	2%	3
09 Jan 2023	09.53-12.27	2-3	1	Sam. Hindia	3%	4
10 Jan 2023	11.55-14.38	3	1	Selat Sunda	0%	3

Sumber: Data laporan penerbangan dari Lab. TMC BRIN yang diolah untuk kepentingan penelitian ini. Klasifikasi waktu semai disesuaikan dengan klasifikasi pola distribusi awan cumulus tiap 2 jam-an, dengan klasifikasi waktu 1 (07.05-09.05, klasifikasi waktu 2 (09.13-11.05) dan klasifikasi waktu 3 (11.13-13.05).

Berdasarkan rasio sebaran distribusi awan sebelum dan selama kegiatan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) di Provinsi Banten, rata-rata penurunan distribusi awan cumulus adalah sebesar 23 %. Penurunan ini cukup signifikan jika dibandingkan dengan prediksi *Global Data Assimilation System* (GDAS), yang memperkirakan curah hujan tetap tinggi di Provinsi Banten pada tanggal 1–4 Januari 2023. Kondisi topografi di Provinsi Banten, terutama pegunungan di sebelah barat dan selatan, sangat mempengaruhi cuaca dengan menghalangi pergerakan awan dari selatan ke utara. Awan hanya dapat bergerak ke utara jika terdapat pola *surge* yang kuat, seperti yang terjadi pada 4 Januari 2023, ketika CENS masih aktif dan gelombang Kelvin juga aktif. Hal ini mungkin menjelaskan mengapa tidak ditemukan perbedaan signifikan dalam distribusi awan cumulus sebelum dan selama TMC, terutama di Kuadran 1 (DKI Jakarta, Tangerang, Depok, dan Bekasi).

Sebaran area semai (*cloud seeding area*) sebagian besar dilakukan di Kuadran 3 (Selat Sunda: 11 sorti, dan Laut Jawa: 4 sorti) dengan 15 sorti penerbangan, dan di Kuadran 4 (Samudra Hindia) dengan 1 sorti penerbangan (Tabel 6). Ini menunjukkan bahwa puncak sebaran awan cumulus yang berpotensi menyebabkan hujan atau hujan lebat terjadi di sekitar Kuadran 3 dan 4. Penyemaian awan di wilayah tersebut menyebabkan adanya penurunan rasio distribusi awan cumulus sebelum dan setelah TMC adalah 28 % di kuadran 2, 25 % di Kuadran 3, dan 21% di Kuadran 4, jauh lebih besar dibandingkan dengan penurunan di Kuadran 1 (Tabel 1). Lab. TMC (2023) juga menjelaskan bahwa sebelum pelaksanaan TMC untuk mengantisipasi cuaca ekstrem di Provinsi Banten, hujan umumnya terjadi pada siang hari dan sore menjelang malam, dengan puncak hujan antara pukul 10.00 WIB hingga 13.00 WIB dan 18.00 WIB hingga 02.00 WIB. Setelah TMC yang dilakukan pada di wilayah prioritas—yaitu perairan di selatan Provinsi Banten (Samudra Hindia) dan barat Provinsi Banten (Selat Sunda) (Tabel 6)—intensitas hujan pada siang hari (pukul 13.00 WIB) hingga malam hari (pukul 06.00 WIB) dapat ditekan. Kondisi ini dapat dijelaskan dari sebaran awan-awan hujan (> 30 dBz, kuning), sebagai indikator hujan dengan intensitas sedang–lebat; mengalami penurunan distribusi sebaran (Gambar 3–4). Hujan dengan intensitas tinggi justru terjadi pada pagi hari (mulai pukul 07.00 WIB hingga pukul 12.00 WIB). Pola ini mendukung temuan sebelumnya yang menunjukkan bahwa pada Januari, fenomena CENS aktif berkaitan dengan pembentukan saluran sempit anomali gelombang angin utara yang kuat di lepas Pantai Indochina dan Semenanjung Malaysia. Anomali ini bergerak melalui Selat Sunda dan Laut Jawa,

meningkatkan kelembapan udara dan menyebabkan hujan lebat di Selat Sunda, sebagian Laut Jawa, dan wilayah pesisir sekitarnya (Lubis *et al.*, 2022; Yulihastin *et al.*, 2020; Mori *et al.*, 2018). Peningkatan kelembapan udara ini, akibat terhalangnya gelombang utara hingga barat laut Jawa oleh angin selatan, menciptakan kondisi yang mendukung perkembangan konveksi yang dalam dan hujan deras di wilayah tersebut. Selain itu, konvergensi kelembapan skala besar, yang disebabkan oleh beberapa jenis gelombang khatulistiwa dan MJO, semakin meningkatkan kelembapan lokal dan mendukung pembentukan sel konvektif serta curah hujan ekstrem (Lubis *et al.*, 2022). Detail distribusi awan cumulus selama pelaksanaan TMC, berdasarkan frekuensi penerbangan dari posko Halim Perdana Kusuma antara pukul 07.05–13.05 WIB, dapat dilihat pada Tabel 6.

4. KESIMPULAN

Secara umum pada periode 01–10 Januari 2023, terjadi pengurangan intensitas hujan di wilayah Jawa Barat dan Provinsi Banten kecuali pada tanggal 4 Januari 2023. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada tanggal tersebut, rasio sebaran distribusi awan masih cukup tinggi (ratio > 75 %) di daerah DKI Jakarta, Tangerang, Depok dan Bekasi dengan nilai rasio sebesar 95 %. Dilihat dari segi rasio sebaran distribusi awan sebelum dan selama kegiatan TMC di Provinsi Banten, rata-rata penurunan distribusi sebaran awan-awan cumulus tersebut sebesar 23 %. Walaupun terjadi penurunan pola distribusi awan (23 %), perbedaan pola rata-rata dan pola variasi dari sebaran distribusi awan sebelum dan selama pelaksanaan tersebut tidak signifikan, namun sebaran awan-awan hujan yang memiliki intensitas hujan sedang hingga lebat (> 30 dBz) mengalami penurunan yang signifikan.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Teknologi Modifikasi Cuaca, Badan Riset dan Inovasi Nasional dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika yang telah mendukung dalam pemberian data dan informasi untuk penelitian ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abhik, S., Hendon, H. H., & Zhang, C. (2023). The Indo-Pacific maritime continent barrier effect on MJO prediction. *Journal of Climate*, 36(3), 945-957.
- Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG). (2022). Tahun Baru 2023, BMKG Proyeksi Hampir Seluruh Indonesia Dilanda Hujan Lebat. Tanggal 21

- Desember 2022.
<https://www.bmkg.go.id/berita/?p=waspad-a-potensi-cuaca-ekstrem-selama-periode-nataru-21-desember-2022-01-januari-2023&lang=ID&tag=berita-utama>
- BPKP. (2007). Geografis Banten. <https://bcpk.go.id/dki2/konten/1092/GEOG RAFIS>
- Budiyanto, E. (2016). Panduan Praktikum Sistem Informasi Geografis Dasar I, Perolehan dan Instalasi Prangkat Lunak GIS (Quantum GIS/QGIS). Jurusan Pendidikan Geografi, UNESA.
- Chang, C.-P., Lu, M.-M., & Lim, H. (2016). *Monsoon Convection in the Maritime Continent: Interaction of Large-Scale Motion and Complex Terrain. Meteorological Monographs*, 56, 6.1-6.29. DOI: 10.1175/amsmonographs-d-15-0011.1
- Dewi, B. P., Amri, S., Robi, M., Veanti, D. P. O., & Novria, S. (2023). The influence of cross-equatorial northerly surge in the western maritime continent. In *E3S Web of Conferences* 464,. EDP Sciences.
- Hattori, M., Mori, S., & Matsumoto, J. (2011). The cross-equatorial northerly surge over the maritime continent and its relationship to precipitation patterns. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 89A, pp. 27-47.
- Lab. TMC,BRIN. (2023). Laporan Kegiatan TMC Dalam Antisipasi Cuaca Ekstrem di Pulau Jawa.
- Lubis, S. W., Hagos, S., Hermawan, E., Respati, M. R., Ridho, A., Risyanto, et al. (2022). Record-breaking precipitation in Indonesia's capital of Jakarta in early January 2020 linked to the northerly surge, equatorial waves, and MJO. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL101513. DOI: 10.1029/2022GL101513
- Mori, S., Hamada, J. I., Hattori, M., Wu, P. M., Katsumata, M., Endo, N., ... & Yamanaka, M. D. (2018). Meridional march of diurnal rainfall over Jakarta, Indonesia, observed with a C-band Doppler radar: an overview of the HARIMAU2010 campaign. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 1-23.
- Nugroho, A. D., & Fadlan, A. (2018). Analisis kejadian hujan es berdasarkan kondisi atmosfer dan citra satelit Himawari-8 (studi kasus: Magelang, 24 Januari 2018). *JlIF (Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika)*, 2(2), 80-87. Departemen Fisika FMIPA Universitas Padjadjaran. DOI: 10.1234/jiif.2018.02.02.80
- Pandjaitan, B. S., Rachmawati, A., Hidayat, R., Wirahma, S., & Vahada, A. D. (2020). Pemanfaatan Skema Daytime Microphysics Rgb Himawari 8 Untuk Mendeteksi Awan Cumulus Potensial Dalam Kegiatan Teknologi Modifikasi Cuaca. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 20(2), 91-103. DOI: 10.29122/jstmc.v20i2.3873
- Prasetio, A. (2019). Kajian Distribusi dan Lokasi Menara Ground Base Generator sebagai Sarana Cloud Seeding guna Optimalisasi Pengelolaan Sumber Daya Air di DAS Larona (Doctoral dissertation, Thesis TF185471, Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya).
- Renggono, F. (2011). Pola Sebaran Hujan Di Das Larona. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 12(1), 17. DOI: 10.29122/jstmc.v12i1.2186
- Renggono, F., Kudsy, M., Adhitya, K., Purwadi, P., Belgaman, H. A., Dewi, S., Syahdiza, R., Mulyana, E., Aldrian, E., & Arifian, J. (2022). Hygroscopic ground-based generator cloud seeding design: A case study from the 2020 weather modification in Larona Basin, Indonesia. *Atmosphere*, 13(6), 968. DOI: 10.3390/atmos13060968
- Saputri, A. S. (2010). *Pengaruh perubahan kuadran terhadap hasil klasifikasi sebaran titik spasial*. [Skripsi, Universitas IPB]. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/62905>
- Sidauruk, M., Saragih, H. J. R., Utomo, S. T., & Widodo, P. (2023). Pemanfaatan Teknologi Modifikasi Cuaca sebagai Upaya Penanggulangan Bencana Hidrometeorologi di Indonesia. *PENDIPA Journal of Science Education*, 7(2), 195-200.
- Sinatra, T., & Noersomadi. (2014). *Pemanfaatan transportable radar cuaca Doppler X-band untuk pengamatan awan*. Pusat Sain dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.
- Stasiun Meterologi Kelas I Sokerno-Hatta. Data Radar Cuaca dari Aplikasi SiDarma. BMKG. Tanggal 27 Desember 2023. <https://radar.bmkg.go.id/sidarma-nowcast/login.php>
- Yoon, S., Jeong, C., & Lee, T. (2014). Flood flow simulation using CMAX radar rainfall estimates in orographic basins. *Meteorological Applications*, 21(3), 596-604.
- Yulihastin, E., Wahyu Hadi, T., Sari Ningsih, N., & Ridho Syahputra, M. (2020, February). Early morning peaks in the diurnal cycle of precipitation over the northern coast of West Java and possible influencing factors. In *Annales Geophysicae* 38(1), 231-242. Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, 43(2), RG2003. DOI: 10.1029/2004RG000158