

Karakteristik Sistem Awan Konvektif *Cumulonimbus* Berbasis Radar Cuaca C-Band di Sekitar Bandara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar

Nabilla Akhirta^{1,2,*}, Eko Hadi Sujiono¹, Pariabti Palloan¹

¹Program Studi Fisika, Universitas Negeri Makassar, Makassar, 90222, Indonesia

²Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Hasanuddin, Maros, 90552, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 26 April 2023
Direvisi: 11 Mei 2023
Diterima: 18 Agustus 2023

Kata kunci:

awan
sistem konvektif
cumulonimbus
radar cuaca
tropis

Keywords:

Cloud
Convective System
Cumulonimbus
Weather radar
Tropic

Penulis Korespondensi:

Nabilla Akhirta
Email: bella.akhirta@gmail.com

ABSTRAK

Sistem konvektif *Cumulonimbus* merupakan kumpulan awan yang terdiri dari awan *Cumulonimbus* dan awan awan lain yang membentuk sebuah sistem, yang dapat menyebabkan perubahan cuaca signifikan. Penelitian karakteristik fisis dan dinamis *Cumulonimbus* diperoleh menggunakan radar cuaca berjenis C-Band yang terpusat pada radius 150 km di sekitar Bandara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar. Data yang digunakan yakni data radar, laporan pilot, dan media massa pada musim peralihan dan musim hujan September hingga Februari 2016 – 2022. Sembilan tipe morfologi sistem konvektif meso- β ditemukan dengan panjang awan 20-220 km dan panjang rata-rata awan 65 km dominan membentuk sistem linier. Morfologi yang paling banyak terbentuk adalah *Trailing Stratiform*. Pada musim peralihan, inisiasi *Cumulonimbus* dominan di dataran tinggi dan pada musim hujan inisiasi dominan di laut pesisir. Secara umum *Cumulonimbus* matang di laut pesisir pada siang hari. *Cluster of Cells* dan *Bow Echo* adalah sistem yang dominan terjadi di darat, dengan *windshear* yang relatif lebih kuat dari semua sistem konvektif. Sistem sebagian besar berpropagasi lambat / *slow-moving* (< 3 m/s). *Vertical wind shear* kategori kuat rata-rata terjadi pada lapisan 0,3 – 2 km.

The Cumulonimbus convective system is a cluster of clouds consisting of Cumulonimbus clouds and other clouds that form a system, capable of causing significant weather change. Cumulonimbus's physical and dynamic characteristics were obtained using C-Band type weather radar centered on a 150 km radius around Sultan Hasanuddin International Airport Makassar. Radar data, pilot reports, and mass media were utilized during the transition and rainfall season from September to February between 2016 and 2022. We identified nine morphological types of meso- β convective systems with cloud lengths ranging from 20 to 220 km and a median cloud length of 65 km, primarily adopting a linear shape. The most distinct morphology is Trailing Stratiform. Cumulonimbus mainly initiates in high terrain during the transition period and over the coastal ocean during rainfall. During the day, Cumulonimbus predominantly matures over the coastal ocean. The Cluster of Cells and Bow Echo were the dominant occur on land, exhibiting relatively stronger shear values compared to other systems. The systems generally propagate at a slow-moving pace (< 3 m/s). The most substantial vertical shear was observed in the 0.3–2 km layer.

Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Awan *cumulonimbus* adalah gumpalan awan yang menjulang tinggi di atas arus udara yang bergelombang atau tidak stabil, mewakili konveksi atmosfer yang intens. Awan *cumulonimbus* dewasa dapat membentuk guntur, kilat, hujan lebat, hujan es, angin kencang, dan bahkan pusaran massa udara (ICAO, 2005). Awan *cumulonimbus* dapat menimbulkan bencana hidrometeorologi di daerah yang dilaluinya. Berdasarkan infografik Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), dalam satu dekade terakhir bencana hidrometeorologi ini selalu mendominasi kejadian bencana di Indonesia (BNPB, 2021). Pendeteksian awan *cumulonimbus* dapat menggunakan radar cuaca yang dikenal baik dalam pengamatan fenomena di atmosfer secara *realtime*. Keunggulan radar cuaca dibanding yang lainnya adalah kemampuan gelombang elektromagnetiknya yang dapat menembus struktur awan hujan. (Wardoyo, 2015).

Pembentukan awan *cumulonimbus* dapat tumbuh, berkembang, dan meluas menjadi berbagai jenis morfologi. Para peneliti telah melakukan banyak upaya untuk mengklasifikasikan morfologi sistem konvektif. Pemahaman mengenai morfologi *cumulonimbus* sangat penting karena dapat melihat berbagai jenis badai dan cuaca buruk. Pettet dan Johnson (2003) menemukan bahwa sistem konvektif dengan morfologi *leading stratiform* (LS) dan *parallel stratiform* (PS) berperan dalam kejadian banjir bandang. Struktur busur gema / *bow echo* dan struktur garis linier dikaitkan dengan fenomena angin kencang (Trapp dkk., 2005). Sistem *Bow Echo* dapat menyebabkan angin merusak hingga intensitas tinggi bergantung lingkungannya (Mauri dan Gallus Jr, 2021). Selama masa hidupnya, *cumulonimbus* umumnya mengalami perambatan atau pergerakan sistem. Barnes dan Sieckman (1984) menyatakan bahwa sistem konvektif dengan struktur garis dan *leading edge* yang bergerak cepat menunjukkan adanya angin kencang. Sistem konvektif yang bergerak lambat memiliki risiko lebih tinggi menyebabkan banjir (El Afandi dan Morsy, 2020; Houze Jr, 2004).

Dalam penerbangan, informasi tentang awan *cumulonimbus* sangat penting untuk lepas landas, mendarat, dan prakiraan cuaca di sepanjang jalur penerbangan. Informasi ini sangat penting untuk penerbangan karena aliran udara di dalam dan sekitar sel *cumulonimbus* dewasa menjadi arus udara yang sangat kuat sehingga dapat menyebabkan *wind shear*. Signifikansi *wind shear* bagi penerbangan terletak pada pengaruhnya terhadap kinerja pesawat yang berpotensi menimbulkan turbulensi dan dampak buruk lainnya terhadap keselamatan penerbangan. Hal ini menyebabkan pentingnya pengarahannya cuaca yang menunjukkan area prediksi aktivitas awan *cumulonimbus* di sepanjang rute. Khususnya di daerah tropis, intensitas dan perkembangan awan *cumulonimbus* bisa lebih intensif pada waktu-waktu tertentu dalam sehari, (ICAO, 2005; SKYbrary, 2016).

Dengan memperhatikan keberadaan awan *cumulonimbus* di lingkup penerbangan, maka perlu diamati dan dipelajari lebih lanjut mengenai sifat fisis dan dinamisnya. Penelitian ini lebih fokus pada ruang udara di sekitar Bandara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar, Sulawesi Selatan yang memiliki aktivitas *take-off* dan *landing* yang cukup tinggi di Indonesia, dan wilayah tersebut sebagai pusat *Flight Information Region* untuk Indonesia bagian timur. Terlebih topografi sekitar Makassar yang dibatasi pegunungan di sebelah timur dan pantai di sebelah barat cukup berpengaruh terhadap kompleksitas cuacanya.

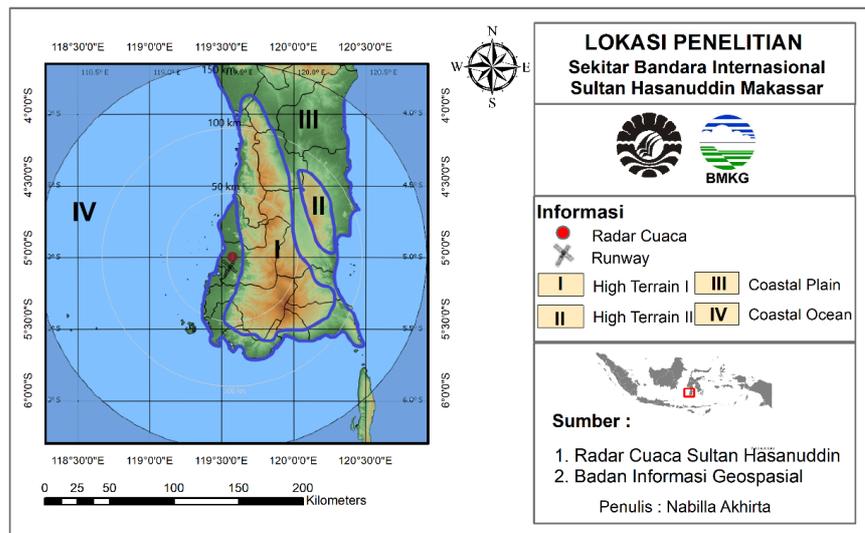
II. METODE

Lokasi penelitian berada di Bandara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar, dibuat oleh penulis menggunakan Rainbow 5.49.11 dan ArcGIS 10.4.1 dengan batas wilayah studi yang digunakan hingga radius 150 km dari pusat radar atau luas area sekitar 70.000 m² yaitu pada 3,64° - 6,35° LS dan 118,21° - 120,9° BT.

Gambar 1 menunjukkan daerah penelitian dibagi berdasarkan ketinggian dan topografinya:

- High Terrain* atau dataran tinggi (wilayah pegunungan dengan ketinggian > 100 mdpl),
- Coastal Plain* atau dataran rendah (wilayah dataran rendah dengan ketinggian 0-100 mdpl),
- dan *Coastal Ocean* atau laut pesisir (wilayah perairan/laut dengan ketinggian < 0 mdpl).

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian deskriptif dengan menggunakan pendekatan analisis kuantitatif dan kualitatif. Analisis kuantitatif dimaksudkan untuk menggambarkan morfologi awan, distribusi spasial, dan reflektivitas. Analisis kualitatif menggambarkan karakteristik masing-masing sistem konvektif di sekitar Bandar Udara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar.



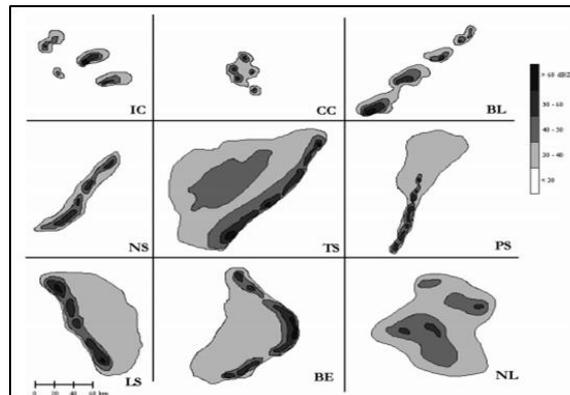
Gambar 1 Lokasi Penelitian Dibatasi 150 km dari Pusat Radar Cuaca dibuat menggunakan ArcGIS 10.4.1.

Data penelitian berupa data mentah radar, data *Pilot Report* (PIREP), dan data media massa digunakan selama periode transisi September, Oktober, dan November (SON) dan musim hujan Desember, Januari, dan Februari (DJF) selama 2016-2022. Data primer digunakan dari data radar cuaca mentah dalam format volumetrik (.vol) yang diperoleh dari BMKG Stasiun Meteorologi Sultan Hasanuddin yang terletak di dalam bandar udara, tepatnya pada $4,99^{\circ}$ LS dan $119,57^{\circ}$ BT. Spesifikasi radar tersebut adalah Radar cuaca tipe C-Band, polarisasi tunggal (horizontal) merek Gematronik dengan data resolusi temporal 10 menit dengan resolusi piksel hingga 125 m per titik piksel. Analisis fisis dan dinamis dilakukan dengan menggunakan produk pada Rainbow 5.49.11, sedangkan *plotting* dan pemetaan digunakan ArcGIS 10.4.1. Data mentah radar yang diambil dalam penelitian ini diolah menggunakan produk *software* Rainbow 5.49.11 berupa intensitas radar (dBZ), ukuran sel (m), waktu (menit), posisi sel (koordinat), kecepatan angin horizontal (knots), dan kecepatan angin vertikal dalam awan (m/s per km) dan secara subjektif menganalisis bentuk dan arah datangnya awan dari tampilan radar. Data PIREP didapatkan dari rekaman kondisi penerbangan yang dicatat oleh AirNav cabang Makassar Air Traffic Service Centre.

Langkah-langkah yang perlu diikuti adalah :

1. Raw data radar dikumpulkan pada musim hujan dan transisi pada bulan SON-DJF 2016-2022.
2. Sistem konvektif skala meso- β (25-250 km) diidentifikasi dari data radar menurut kriteria masa hidup, reflektivitas, dan perbandingan panjang dan lebar sel berdasarkan Lombardo dan Colle (2010) yang menyatakan sistem konvektif harus bertahan setidaknya 30 menit dalam mempertahankan strukturnya dan reflektivitasnya lebih dari 35 dBZ dengan reflektivitas sel inti minimal 50 dBZ menjadi ke dalam tiga bentuk utama, yaitu seluler (panjang : lebar \approx 1:1), linier (panjang : lebar \approx 5:1), dan nonlinier. Sistem konvektif saat fase inisiasi ditandai reflektivitas maksimum ≥ 35 dBZ (kriteria munculnya awan konvektif), saat fase matang inti sel ≥ 50 dBZ (kriteria awan konvektif menjadi *cumulonimbus*), saat fase purnah ditandai reflektivitas maksimum mengalami pelemahan setelah fase matang menjadi < 50 dBZ (Lombardo dan Colle, 2010, 2012)
3. Sistem konvektif diidentifikasi secara fisis menggunakan kriteria Gallus dkk. (2008) pada Gambar 2 mengenai morfologi sistem konvektif yang dibagi menjadi 9 morfologi berupa: a) seluler – *Isolated Cell* (IC), sel yang dipisahkan oleh gema radar yang lebih lemah; b) seluler – *Cluster of Cells* (CC), dihubungkan oleh gema radar yang lebih lemah; c) seluler – *Broken Lines* (BL), sel individual tersusun dalam garis lurus; d) linier – *No Stratiform* (NS), tanpa disertai awan stratiform yang luas; e) linier – *Trailing Stratiform* (TS), disertai awan stratiform yang luas dalam jejak pergerakannya; f) stratiform linier - paralel (PS), disertai awan stratiform paralel dengan awan konvektif; g) linier - *Leading Stratiform* (LS), disertai awan stratiform di depan pergerakan awan linier; h) linier – *Bow Echo* (BE), gema radar busur / melengkung; dan i) struktur non-linier (NL). Berdasarkan perbandingan panjang dan lebarnya IC, CC, dan BL

termasuk kategori seluler; NS, TS, PS, LS, dan BE termasuk kategori linier; dan bentuk lainnya termasuk kategori non-linier.



Gambar 2 Klasifikasi morfologi sistem konvektif. Demonstrasi skematik masing-masing dari 9 morfologi badai. (Gallus *et al.*, 2008). © American Meteorological Society. Digunakan dengan ijin.

4. Sebaran sistem konvektif digambarkan dalam peta spasial dan diplot menggunakan ArcGIS 10.4.1 dari fase inisiasi (titik awal sistem konvektif), dan fase matang (sistem saat masif) berdasarkan 3 area topografi *High Terrain*, *Coastal Plain*, dan *Coastal Ocean*.
5. Distribusi temporal dikategorikan berdasarkan waktu inisiasi dan matangnya sistem konvektif. Waktu dalam data radar dikonversi dari UTC (GMT+0) menjadi Waktu Lokal WITA (GMT+8). Waktu dikategorikan menjadi pagi (06.00-11.59 WITA), siang (12.00-17.59 WITA), sore (18.00-23.59 WITA), dan dini hari (00.00 – 05.59 WITA). Durasi hidupnya dihitung dari inisiasi, matang, hingga disipasi dalam grafik dan boxplot.
6. Karakteristik dinamis dianalisis dari kecepatan perambatan/pergerakan awan. Arah perambatan awan ditentukan secara visual dan kecepatan dihitung berdasarkan koordinat dan waktu tempuh dari rumus jarak antara dua titik koordinat pada bidang Cartesian yang tertera pada rumus 1.

$$s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

Komponen s adalah jarak (m), dan komponen xy adalah koordinat lintang dan bujur yang dikonversi ke dalam satuan meter. Setelah didapatkan jarak, kecepatan digunakan rumus 2

$$v = ds/dt \quad (2)$$

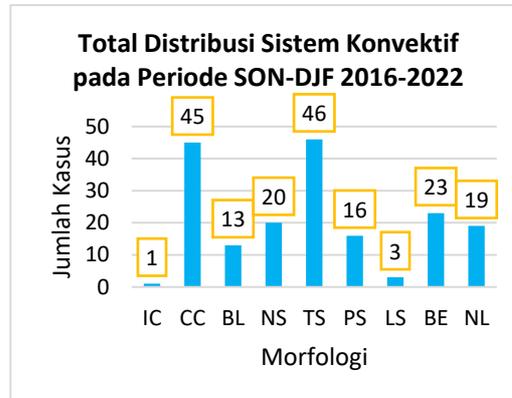
Komponen v adalah kecepatan (m/s), dan t adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik tertentu. Kecepatan awan dibagi menjadi bergerak lambat, bergerak menengah, dan bergerak cepat, menurut penelitian dari Barnes dan Sieckman (1984), yaitu *slow-moving* dengan kecepatan $<3 m/s$, *intermediate-moving* dengan kecepatan $3-7 m/s$, dan *fast-moving* dengan kecepatan $>7 m/s$.

7. Angin horizontal dianalisis pada ketinggian $0,5 km$ dengan tujuan mendapatkan nilai *wind shear* lapisan bawah, dekat dengan permukaan (*Low Level Wind Shear*) untuk keperluan *take-off* dan *landing* menggunakan produk *Horizontal Wind* (HWIND) pada radar. Arah dan kecepatan paling massif didokumentasikan.
8. Komponen *wind shear* vertikal pada fase matang dianalisis dari angin vertikal di dalam awan menggunakan *Vertical Velocity Product* (VVP) pada radar. Kekuatan *wind shear* vertikal diidentifikasi menggunakan kategori kekuatan *windshear* dari Chaudhari dkk. (2010). Data *wind shear* vertikal diambil dari lapisan $0,3 km$ di atas permukaan hingga puncak awan dengan kerapatan data per 300 meter. Jelaskan dalam grafik.
9. Dilakukan verifikasi keberadaan dan dampak sistem konvektif *cumulonimbus* menggunakan data Pilot Report (PIREP) dan berita dari media massa.

III. HASIL DAN DISKUSI

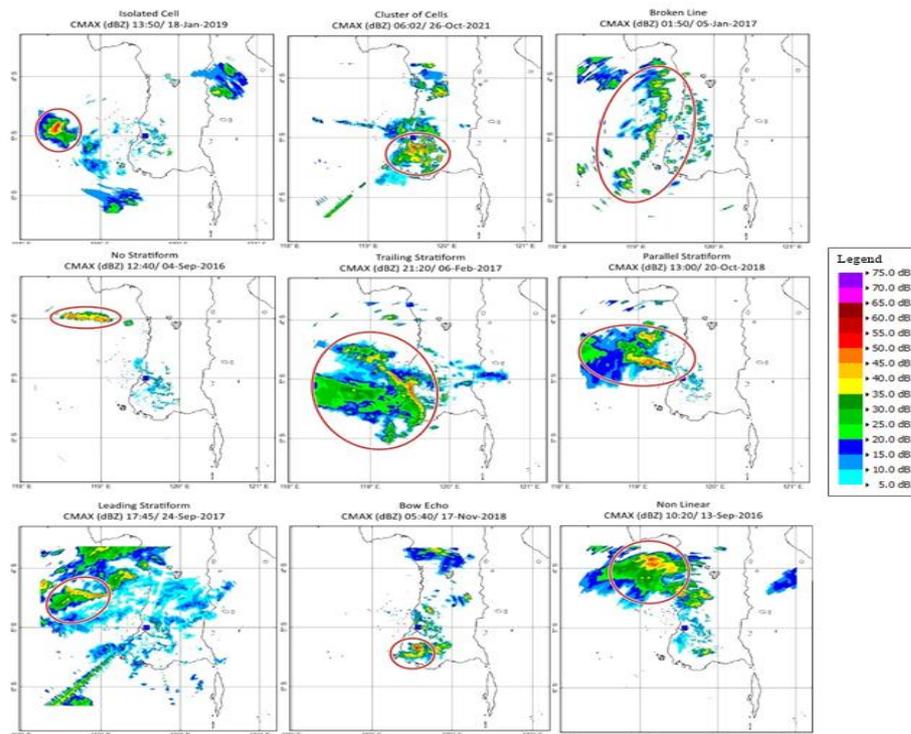
3.1 Analisis Sifat Fisis

3.1.1 Analisis morfologi



Gambar 3 Total Distribusi Sistem Konvektif pada Periode SON-DJF 2016-2022

Sistem konvektif *cumulonimbus* meso- β (25-250 km) teridentifikasi dapat terbentuk menjadi sembilan morfologi sistem konvektif berdasarkan kriteria Gallus, dkk (2008) di sekitar Makassar dengan ditemukannya 186 kasus sistem konvektif. Terdapat 59 kasus sistem konvektif sirkular, 108 kasus linier, dan 19 kasus nonlinier, yang berarti bentuk linier paling banyak terjadi di sekitar bandara Makassar. Distribusi data meliputi 1 kasus IC (0,5%), 45 kasus CC (24,2%), 13 kasus BL (7%), 20 kasus NS (10,7%), 46 kasus TS (24,7%), 16 kasus PS (8,6%), 3 kasus LS (1,6%), 23 kasus BE (12,4%), dan 19 kasus NL (10,2%), yang ditampilkan dalam Gambar 3. Masing-masing morfologi sistem konvektif yang terdeteksi di radar ditampilkan pada Gambar 4. Hasil distribusi reflektivitas sel inti berkisar antara 50,5 hingga 60,5 dBZ. Perluasan maksimum panjang sistem berkisar 20 - 220 km dengan nilai median 65 km, dan lebar berkisar 8 - 63 km dengan nilai median 15 km. Hasil penelitian menunjukkan sistem konvektif berbentuk linier mendominasi di wilayah sekitar bandara dengan dominan bergerak dari barat. Hal ini dikarenakan saat musim SON-DJF seiring dengan aktifnya monsun baratan (monsun Asia) sehingga awan bergerak dari barat mendapat bloking topografi pegunungan secara tegak lurus di sisi timur bandara Makassar melintang dari utara hingga selatan, memungkinkan seringnya terjadi awan berbentuk linier yang mengikuti pola topografi. Sejalan dengan pernyataan Wallace dan Hobbs, (2006) bahwa di wilayah benua tropis, hujan didominasi oleh monsun, yang bermigrasi utara selatan (untuk Indonesia monsun Asia-Australia) berdasarkan musimnya mengikuti gerakan matahari, dan Siregar dkk., (2017) menyatakan saat musim SON merupakan musim peralihan ke monsun barat dan saat DJF bersamaan dengan monsun baratan yang sedang aktif mendorong massa udara basah dari Asia membawa awan-awan hujan ke wilayah Indonesia.

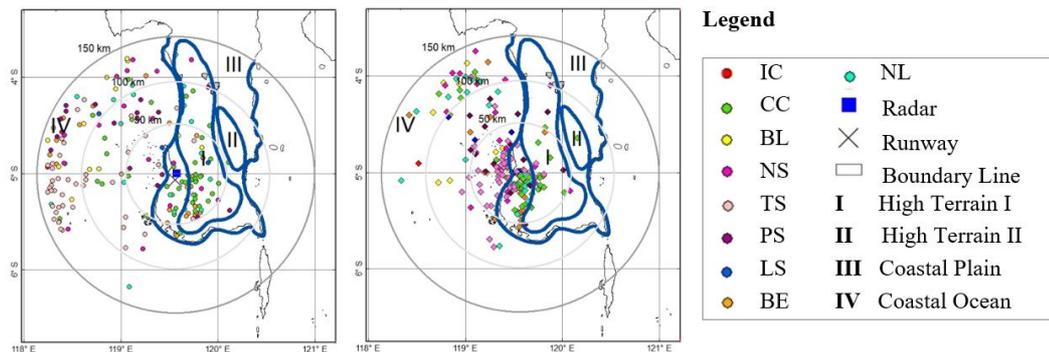


Gambar 4 Contoh Morfologi Sistem Konvektif Cumulonimbus pada Tampilan Radar Cuaca CMAX(Z).

3.1.2 Distribusi spasial

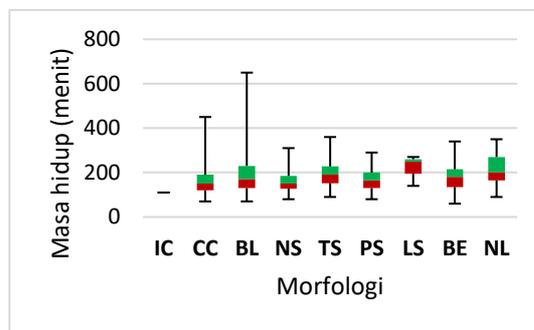
Distribusi spasial dijelaskan dalam Gambar 5. Fase inisiasi (Gambar 5 kiri) mendapati 27% (51 kasus) di *High Terrain* (area I dan II), 10% (19 kasus) di *Coastal Plain* (area III), dan 62% (116 kasus) di *Coastal Ocean*. Fase matang (Gambar 5 kanan) mendapati 19% (36 kasus) di *High Terrain*, 25% (46 kasus) di *Coastal Plain*, dan 56% (104 kasus) di *Coastal Ocean*. Sistem konvektif dominan matang di *Coastal Ocean*, terutama di dekat pantai barat perairan Sulawesi Selatan. Dominan di wilayah perairan selain karena wilayah lautan memiliki massa udara basah yang mendukung pertumbuhan awan konvektif juga karena wilayah jangkauan radar lebih luas wilayah lautannya. Dilihat dari persebarannya, morfologi IC, BL, NS, TS, PS, LS, dan NL paling aktif menjadi matang di wilayah perairan. Sedangkan sistem yang paling aktif di daratan (di dataran tinggi maupun rendah) adalah CC dan BE. Tidak ada sistem konvektif *cumulonimbus* skala meso- β yang diinisiasi dan matang di perairan timur Sulawesi Selatan antara Laut Flores dan Teluk Bone, hal ini karena wilayah tersebut berada dibalik pegunungan yang ketika massa udara dari barat wilayah tersebut menjadi sisi yang bersifat lebih kering dan lebih sulit membentuk sistem konvektif dengan skala meso- β . Meskipun terdapat *blocking beam* dari radar pada pengamatan sisi timur, namun ada tidaknya awan konvektif masih dapat terdeteksi karena radar masih mampu melihat awan bagian atas hingga puncak.

Sistem konvektif *trailing stratiform* (TS) yang paling banyak ditemukan di wilayah penelitian dominan berada di lautan, ketika mencapai darat terkonfirmasi menyebabkan hujan lebat dan dapat membentuk awan tsunami (Grid.id, 2019; Kumparan NEWS, 2017) serta membuat penerbangan *go-around* dan *divert* dari catatan laporan pilot dari AirNav MATSC (*WON1351 WAFD-WAAA Making go-around due to tailwind - 15/02/2018; CTV311 WAMG-WAAA divert to WALL due to bad weather - 22/12/2018*). Sementara sistem konvektif *bow echo* (BE) yang dikenal mudah menimbulkan pusaran angin atau puting beliung ditemukan paling sering aktif dan matang di darat daripada di laut dan paling dominan di sisi selatan Sulawesi Selatan (warna kuning pada Gambar 5 fase matang). Sistem BE terkonfirmasi menimbulkan angin kencang (IDN Times Sulsel, 2019), serta membuat penerbangan *go-around* dan *divert* dari catatan pilot (*LNI640/PKLF/B739/WAHI-WAAA Making Go Around RWY 21 due to Bad weather, and Divert to WALL*).



Gambar 5 Distribusi Spasial Sistem Konvektif Total (kiri) fase inisiasi dan (kanan) fase matang

3.1.2 Distribusi Temporal



Gambar 6 Boxplot Masa Hidup Sistem Konvektif dari Fase Inisiasi hingga Disipasi

Periode peralihan SON sistem konvektif dominan muncul dari dataran tinggi (*High Terrain*), dengan inisiasi dan matang pada siang hari. Hal itu saat matahari memberikan panas maksimal sehingga mendukung proses konveksi yang menyebabkan awan konvektif. Periode DJF sistem konvektif dominan muncul dari lautan pesisir (*Coastal Ocean*), dengan inisiasi dominan malam hingga pagi dan matang siang hingga pagi. Masa hidup sistem konvektif dari inisiasi hingga punah antara 60 menit (pada sistem *bow echo*) hingga 650 menit (pada sistem *broken line*) ditampilkan dalam Gambar 6. Proses inisiasi pertumbuhan sistem konvektif dominan 110 - 250 menit. Sedangkan pada durasi fase matang antara 30 - 600 menit dengan median 50 - 170 menit.

3.2 Analisis Karakteristik Dinamis

Pergerakan sistem konvektif dilihat dari arah dan kecepatan perambatannya. Dari total 186 kasus, 82 kasus (44%) masuk kategori *slow-moving*, 72 kasus (38%) masuk kategori *intermediate-moving*, dan 32 kasus (17%) masuk kategori *fast-moving*. Secara keseluruhan, sistem CC, BL, LS, BE, dan NL didominasi pada kecepatan *slow-moving*, sedangkan IC, NS, PS, dan TS didominasi *intermediate-moving*. Dalam kasus awan-awan konvektif skala meso- β di sekitar Makassar yang termasuk dalam kategori *slow-moving* memiliki potensi lebih besar dalam menghasilkan banjir ditandai dengan kenaikan permukaan air secara tiba-tiba (Wallace dan Hobbs, 2006). Angin horizontal diidentifikasi di lapisan bawah, yaitu 500 m dekat permukaan. Meskipun seluruh lapisan penting lapisan ketinggian 500 m kebawah merupakan lapisan terendah yang sangat penting bagi pesawat terbang mendarat dan lepas landas kecepatan udara dan ketinggian pesawat adalah mendekati nilai kritis (ICAO, 2005). Dari hasil identifikasi setiap kasus, angin horizontal didominasi dengan kecepatan berkisar antara 20 - 29 knot, dengan arah angin dari barat. Dari identifikasi 186 kasus, 167 kasus angin horizontal maksimum terjadi di dekat awan konvektif aktif, terutama antara dua sel konvektif aktif yang sangat berdekatan dan pada *v-notch* sistem konvektif. Sementara itu, 19 kasus angin maksimum lainnya berada di awan stratiform yang menyertainya, jauh dari sistem konvektif aktif. Hasil perhitungan *windshear* vertikal dengan mengekstraksi data *Volume Velocity Product* (VVP) rata-rata memiliki nilai kuat ($>0,005$ m/s/km) pada ketinggian 0,3 - 2 km. Pada ketinggian 2 - 7 km, *windshear* vertikal menunjukkan kekuatan rata-rata sedang (0,003 - 0,005 m/s/km). Sebaran *scatter plot* menunjukkan bahwa geseran dengan kategori kuat masih berpotensi terjadi pada semua lapisan. Rata-rata kecepatan geser vertikal

pada morfologi CC, BE, dan NL memiliki nilai geser yang relatif kuat dibandingkan dengan rata-rata semua morfologi.

IV. KESIMPULAN

Sistem konvektif skala meso- β di sekitar Bandara Internasional Sultan Hasanuddin Makassar dominan membentuk sistem linier. Morfologi yang paling banyak terbentuk adalah sistem linier *Trailing Stratiform*. Secara fisis, sistem konvektif memiliki nilai reflektivitas inti sebesar 50,- 60,5 dBZ. Panjang maksimum sistem konvektif berkisar antara 20 - 220 km. Inisiasi sistem konvektif pada bulan SON dominan di dataran tinggi (*High Terrain*), sedangkan DJF dominan di lautan pesisir (*Coastal Ocean*). Sistem konvektif CC dan BE dominan aktif di darat, dan sistem lain dominan aktif di lautan pesisir. Sistem konvektif dominan inisiasi dan matang pada siang hari (12.00 – 17.59 WITA). Secara dinamis propagasi awan didominasi oleh pergerakan lambat (*slow-moving*), dan angin horizontal pada lapisan 500 m didominasi oleh kecepatan 20 – 29 knot, dengan arah angin dalam awan dominan dari barat. *Windshear* vertikal rata-rata memiliki nilai dengan kategori kuat pada ketinggian 0,3 - 2 km dan tipe sedang pada ketinggian 2-7 km. Nilai *windshear* relatif kuat pada morfologi CC dan BE.

DAFTAR PUSTAKA

- El Afandi, G. and Morsy, M. (2020), “Developing an early warning system for flash flood in Egypt: Case study Sinai Peninsula”, *Flash Floods in Egypt*, Springer, pp. 45–60.
- Barnes, G.M. and Sieckman, K. (1984), “The environment of fast- and slow-moving tropical mesoscale convective cloud lines.”, *Monthly Weather Review*, doi: 10.1175/1520-0493(1984)112<1782:TEOFAS>2.0.CO;2.
- BNPB. (2021), “Infografis”.
- Chaudhari, H.S., Sawaisarje, G.K., Ranalkar, M.R. and Sen, P.N. (2010), “Thunderstorms over a tropical Indian station, Minicoy: Role of vertical wind shear”, *Journal of Earth System Science*, Vol. 119 No. 5, pp. 603–615, doi: 10.1007/s12040-010-0044-3.
- Gallus, W.A., Snook, N.A. and Johnson, E. V. (2008), “Spring and summer severe weather reports over the midwest as a function of convective mode: A preliminary study”, *Weather and Forecasting*, Vol. 23 No. 1, pp. 101–113, doi: 10.1175/2007WAF2006120.1.
- Grid.id. (2019), “Awan Tsunami Kembali Muncul di Langit Makassar, Cuaca Seketika Gelap dan Hujan Berangin!”, 23 Jan 2019.
- Houze Jr, R.A. (2004), “Mesoscale convective systems”, *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, Vol. 42 No. 4.
- ICAO. (2005), “9817”, *Manual on Low-Level Wind Shear, GAIN Operator’s Flight Safety Handbook (Cabin Safety Compendium Chapter 2.9 Turbulence)*.
- IDN Times Sulsel. (2019), “Sejumlah Pohon Tumbang Akibat Angin Kencang di Makassar dan Gowa”, 17 Jan 2019.
- Kumparan NEWS. (2017), “Menembus Awan Gelap”, 07 Feb 2017.
- Lombardo, K.A. and Colle, B.A. (2010), “The spatial and temporal distribution of organized convective structures over the Northeast and their ambient conditions”, *Monthly Weather Review*, Vol. 138 No. 12, pp. 4456–4474.
- Lombardo, K.A. and Colle, B.A. (2012), “Ambient conditions associated with the maintenance and decay of quasi-linear convective systems crossing the northeastern U.S. coast”, *Monthly Weather Review*, Vol. 140 No. 12, pp. 3805–3819, doi: 10.1175/MWR-D-12-00050.1.
- Mauri, E.L. and Gallus Jr, W.A. (2021), “Differences between severe and nonsevere warm-season, nocturnal bow echo environments”, *Weather and Forecasting*, Vol. 36 No. 1, pp. 53–74.
- Pettet, C.R. and Johnson, R.H. (2003), “Airflow and precipitation structure of two leading stratiform mesoscale convective systems determined from operational datasets”, *Weather and Forecasting*, Vol. 18 No. 5, pp. 685–699.
- Siregar, S.N., Sari, L.P., Purba, N.P., Pranowo, W.S. and Syamsuddin, M.L. (2017), “The water mass exchange in Java Sea due to periodicity of Monsoon and ITF in 2015”, *J. Depik*, Vol. 6 No. 1, pp. 44–59.

SKYbrary. (2016), "Weather Radar: Storm Avoidance".

Trapp, R.J., Tessendorf, S.A., Godfrey, E.S. and Brooks, H.E. (2005), "Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: Climatological distribution", *Weather and Forecasting*, Vol. 20 No. 1, pp. 23–34, doi: 10.1175/WAF-835.1.

Wallace, J.M. and Hobbs, P. V. (2006), *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, Vol. 92, Elsevier.

Wardoyo, E. (2015), *Radar Meteorologi - Pengantar Aplikasi Radar Cuaca*, Jakarta.