

SIMULASI NUMERIK MEKANISME TURBULENSI DEKAT AWAN KONVEKTIF

A Numerical Simulation of Turbulence Mechanism Near Convective Cloud

Ni Putu Tiana Verayanti¹⁾, I Kadek Nova Arta Kusuma²⁾

¹⁾ Stasiun Meteorologi Sam Ratulangi. Jl. A.A Maramis, Bandara Sam Ratulangi Manado Sulawesi Utara 95374.

²⁾ Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jl. Angkasa 1 No.2, Kec. Kemayoran, Kota Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10610.

*E-mail: putu.tiana@bmet.go.id

Intisari

Turbulensi yang dialami oleh pesawat komersial rute Jakarta-Medan telah dilaporkan mengalami Clear Air Turbulence (CAT) di atas Sumatera Utara pada tanggal 24 Oktober 2017. Namun berdasarkan data citra satelit Himawari dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Indonesia menyebutkan bahwa di sekitar lokasi turbulensi terdapat awan kumulonimbus. Penelitian ini memanfaatkan model WRF-ARW dengan resolusi spasial dan temporal tinggi untuk mengetahui secara detail proses yang terjadi pada awan konvektif penyebab Near Cloud Turbulence (NCT). Turbulensi tersebut disebabkan oleh bilangan Richardson rendah yang terbentuk di wilayah udara jernih (clear air) yang berjarak 300-700 m di atas puncak awan dan diperkuat dengan adanya Turbulensi Energi Kinetik (TKE) mencapai $4,4 \text{ m}^2 / \text{s}^2$ dan geser angin vertikal (VWS) oleh arus keluar awan konvektif.

Kata Kunci: Turbulensi, NCT, TKE, VWS, Richardson Number

Abstract

Turbulence encountered by commercial aircraft Jakarta-Medan routes has been reported that experienced Clear Air Turbulence (CAT) over North Sumatra on October 24th, 2017. However, based on Himawari satellite imagery data produced by Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics (BMKG), Indonesia stated that there was a cumulonimbus cloud around the turbulence location. This study utilizes WRF-ARW models with a high spatial and temporal resolution to find out in detail the processes that occur in convective clouds causing Near Cloud Turbulence (NCT). The turbulence was caused by a low Richardson number formed in the clear-air area, which has a distance of 300 - 700 m above the cloud top and reinforced by the existence of Turbulence Kinetic Energy (TKE) reaching $4,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and vertical wind shear (VWS) by deep convection's outflow.

Keywords: Turbulence, NCT, TKE, VWS, Richardson Number

1. PENDAHULUAN

Turbulensi merupakan salah satu fenomena cuaca yang menjadi ancaman bagi dunia penerbangan. Berdasarkan penyebabnya, turbulensi yang dialami pesawat dapat muncul dari tiga sumber utama yaitu ketidakstabilan *wind shear* vertikal, gelombang gunung, dan aktivitas konvektif (Storer *et al.*, 2019). Awan konvektif dalam (*deep convection*) cenderung aktif di atas benua tropis dan area di antara pasifik barat dan samudra hindia (COMET, 2011). Oleh karena itu, wilayah Indonesia berpotensi tinggi mengalami turbulensi diakibatkan oleh aktivitas awan konvektif.

Salah satu kasus turbulensi yang terjadi di wilayah udara Indonesia dialami oleh pesawat komersial rute Jakarta-Medan pada tanggal 24 Oktober 2017 sekitar pukul 09.59 *Universal Time*

Coordinated (UTC sama dengan UTC+7 untuk waktu lokal). Pada kasus ini disebutkan bahwa pesawat tersebut mengalami CAT (*Clear Air Turbulence*) pada saat terbang dari Jakarta menuju Kualanamu, Medan (Kompas, 2017). Berdasarkan laporan KNKT (2017) menggunakan data citra satelit dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika terlihat bahwa di lokasi turbulensi tidak terdapat awan kumulonimbus tetapi di sekitar lokasi kejadian terdapat awan konvektif yang relatif besar (Gambar 1a). *National Committee for Clear Air Turbulence* mendefinisikan CAT sebagai seluruh turbulensi di atmosfer bebas dalam lingkup operasi penerbangan yang tidak berdekatan dengan aktivitas konvektif. Ini termasuk turbulensi yang terjadi di awan cirrus dan tidak dalam atau berdekatan dengan aktivitas konvektif yang

terlihat (U.S Department of Commerce, 1966; Sharman, 2016).

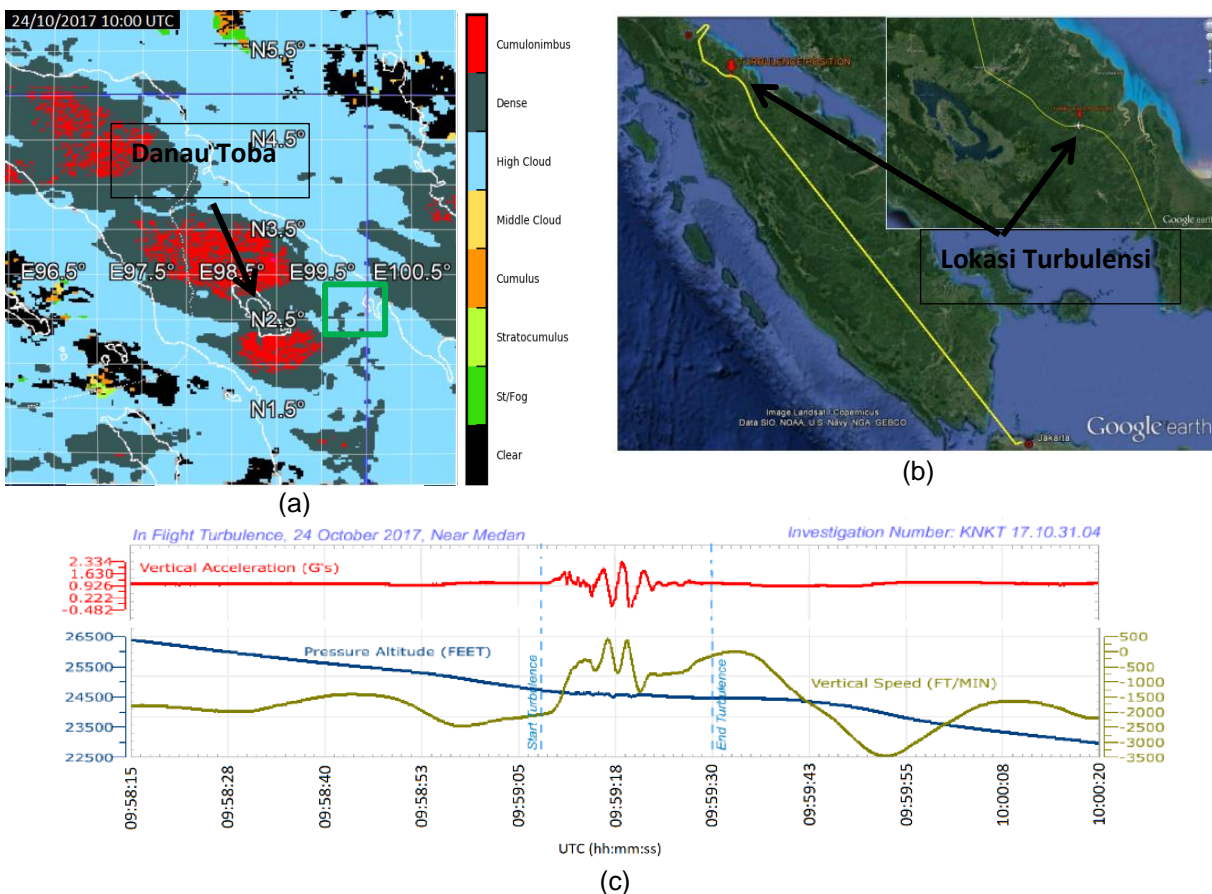
Kasus yang mirip kejadian ini juga sering dialami oleh pesawat komersial di negara lain dan disebut dengan istilah *Near Cloud Turbulence* (NCT) (Lane et al., 2012). NCT merupakan fenomena turbulensi yang terjadi di daerah *clear air* di luar awan dalam jarak horizontal dan vertikal dari batas permukaan awan. Oleh karena itu, pilot yang mengalami NCT umumnya akan melaporkan CAT karena tidak ada awan di area yang dilalui pesawat tersebut. NCT memiliki potensi bahaya yang tinggi karena tidak dapat dideteksi oleh peralatan seperti radar dan citra satelit serta dapat terjadi dalam jarak yang cukup jauh di atas dan di sekitar awan. Proses dinamik yang terjadi dalam kejadian turbulensi di atmosfer dapat diketahui dari indikator seperti *Kelvin Helmholtz Instability* (KHI), *breaking gravity waves*, dan Bilangan Richardson (Ri) $< 0,25$ (Sharman et al., 2012). Parameter *Turbulence Kinetic Energy* (TKE) juga dapat digunakan untuk mengetahui nilai besaran turbulensi (Stull, 1988). Kemudian untuk mengetahui adanya *breaking gravity waves* dan KHI dapat memanfaatkan kontur dari parameter suhu potensial (Trier et al., 2012).

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penulis tertarik untuk mengetahui lebih lanjut tentang fenomena turbulensi yang dialami dalam penerbangan tersebut. Rumusan masalah

yang akan dibahas adalah bagaimana kondisi atmosfer yang dialami penerbangan tersebut saat mengalami turbulensi dan bagaimana mekanisme penyebab turbulensi pada kasus yang dikaji dalam paper ini dilihat dari parameter-parameter turbulensi. Mekanisme penyebab turbulensi ini akan dibandingkan dengan penelitian Trier dan Sharman (2009), Trier et al. (2012), dan Kim dan Chun (2012) yang membahas tentang NCT.

1.1 Ringkasan kasus turbulensi

Pada 24 Oktober 2017, (Gambar 1b) pesawat komersial Boeing 737-800 dengan nomor penerbangan ID6890 berangkat dari Bandara Internasional Soekarno-Hatta (Kode *International Civil Aviation Organization*-ICAO : WIII), Tangerang pada pukul 08.25 UTC dengan tujuan menuju Bandara Internasional Kualanamu (Kode ICAO : WIMM), Deli Serdang. Berdasarkan laporan awal (KNKT, 2017), pesawat lepas landas dari WIII dengan kondisi cuaca cerah dan terbang di ketinggian 36000 kaki (FL360). Pukul 09.42 UTC pesawat berbelok untuk menghindari cuaca buruk. Pada 09.49 UTC pilot mulai turun menuju FL220, dan pada 09.58 UTC pilot menyalakan tanda sabuk pengaman karena mereka melihat potensi turbulensi. Pada 09.59 UTC pesawat mengalami turbulensi kuat yang terjadi selama kurang lebih 20 detik selama fase *descent*.



Gambar 1. a) Citra Satelit *Cloud Type* 10.00 UTC), b) Jalur pesawat ID6890 24 Oktober 2017, c) *Flight Data Recorder* pesawat ID6890 24 Oktober 2017 (Sumber: KNKT, 2017)

Dari grafik *Flight Data Recorder* pada Gambar 1c, terlihat adanya fluktuasi nilai percepatan vertikal (g) antara +2,334 dan -0,482 pada ketinggian FL245. Berdasarkan kategori ICAO dalam Molarin (2013), nilai fluktuasi ini mengindikasikan turbulensi yang kuat karena memenuhi kriteria $g \geq 1$. Berdasarkan data citra satelit Himawari menggunakan produk *Cloud Type*, pada 10.00 UTC (Gambar 1a), terhadap utara dan selatan Danau Toba terdapat awan cumulonimbus tetapi pada lokasi turbulensi (kotak hijau) hanya ditunjukkan keberadaan awan jenis *dense* dan awan tinggi.

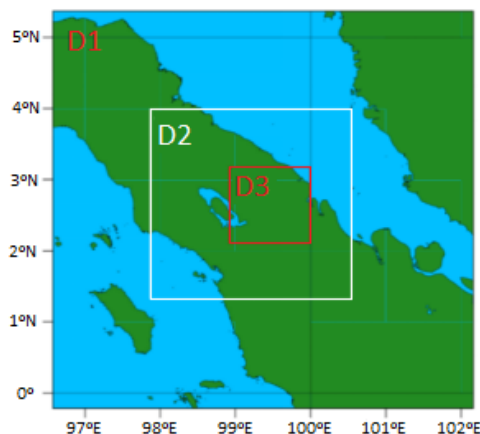
2. DATA DAN METODE

2.1 Data

Penelitian ini menggunakan simulasi model *Advanced Research Weather Research and Forecasting* (ARW-WRF) versi 3.9 (Skamarock, 2009). Sebagai *initial condition* digunakan data dari NCEP GDAS/FNL (*National Center for Environmental Prediction Global Data Assimilation System/Final Analysis*) yang memiliki resolusi grid horizontal $0,25^\circ$ dan resolusi temporal 6 jam. Kemudian, sebagai data banding digunakan data observasi Satelit Himawari kanal IR1 untuk memperoleh suhu puncak awan. Selain itu dimanfaatkan juga data radiosonde Stasiun Meteorologi Kualanamau 24 Oktober 2017 pukul 12.00 UTC untuk mengetahui ketinggian lokasi turbulensi.

2.2 Metode

Simulasi dilakukan pada 3 (tiga) domain: D1, D2, dan D3 yang merepresentasikan resolusi spasial berturut-turut 9 km, 3 km dan 1 km, seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 1. Karena batas atas model memiliki kondisi *rigid*, maka diterapkan *absorption layer* dengan tebal 5 km untuk mencegah pantulan gelombang gravitasi yang merambat vertikal ke bagian atas model. Hal ini juga dilakukan pada Trier *et al.* (2012) dan Kim dan Chun (2012).



Gambar 2. Area domain penelitian

Simulasi diintegrasikan dengan data sepanjang 36 jam dari 00.00 UTC 23 Oktober hingga 12.00 UTC 24 Oktober 2017. Penelitian ini menggunakan *output* D2 untuk dibandingkan dengan pengamatan serta untuk mengetahui kondisi lingkungan *mesoscale* di mana turbulensi terjadi. Kemudian mekanisme turbulensi dan karakteristik awan dibahas menggunakan *output* D3.

Pemilihan skema mikrofisis WSM-6 berdasarkan Hong *et al.* (2006) yang menyatakan bahwa skema ini baik untuk model resolusi tinggi. Pemilihan skema MYJ ditujukan agar mendapatkan parameter TKE pada *output* WRF. Selain itu pemilihan skema berdasarkan kondisi *default*. Untuk D2 dan D3 skema *cumulus* tidak diaktifkan karena pada resolusi ini model dapat menyelesaikan perhitungan aktivitas konvektif (Meizhao *et al.*, 2020) dan ini juga karena skema *cumulus* tidak dapat bekerja dengan baik pada model resolusi tinggi (Arakawa dan Jung, 2011).

Tabel 1. Konfigurasi WRF-ARW

Konfigurasi Model	Domain		
	D1	D2	D3
Resolusi spasial	9 km	3 km	1 km
Grid barat-timur	70	100	181
Grid utara-selatan	70	100	151
Grid vertikal	82		
Resolusi temporal	180 menit	30 menit	10 menit
mikrofisis	WSM6		
<i>longwave radiative</i>	RRTM		
<i>shortwave radiative</i>	Goddard		
PBL	MYJ		
<i>cumulus</i>	Kain-Fritsch	-	-

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perbandingan Simulasi Dengan Observasi

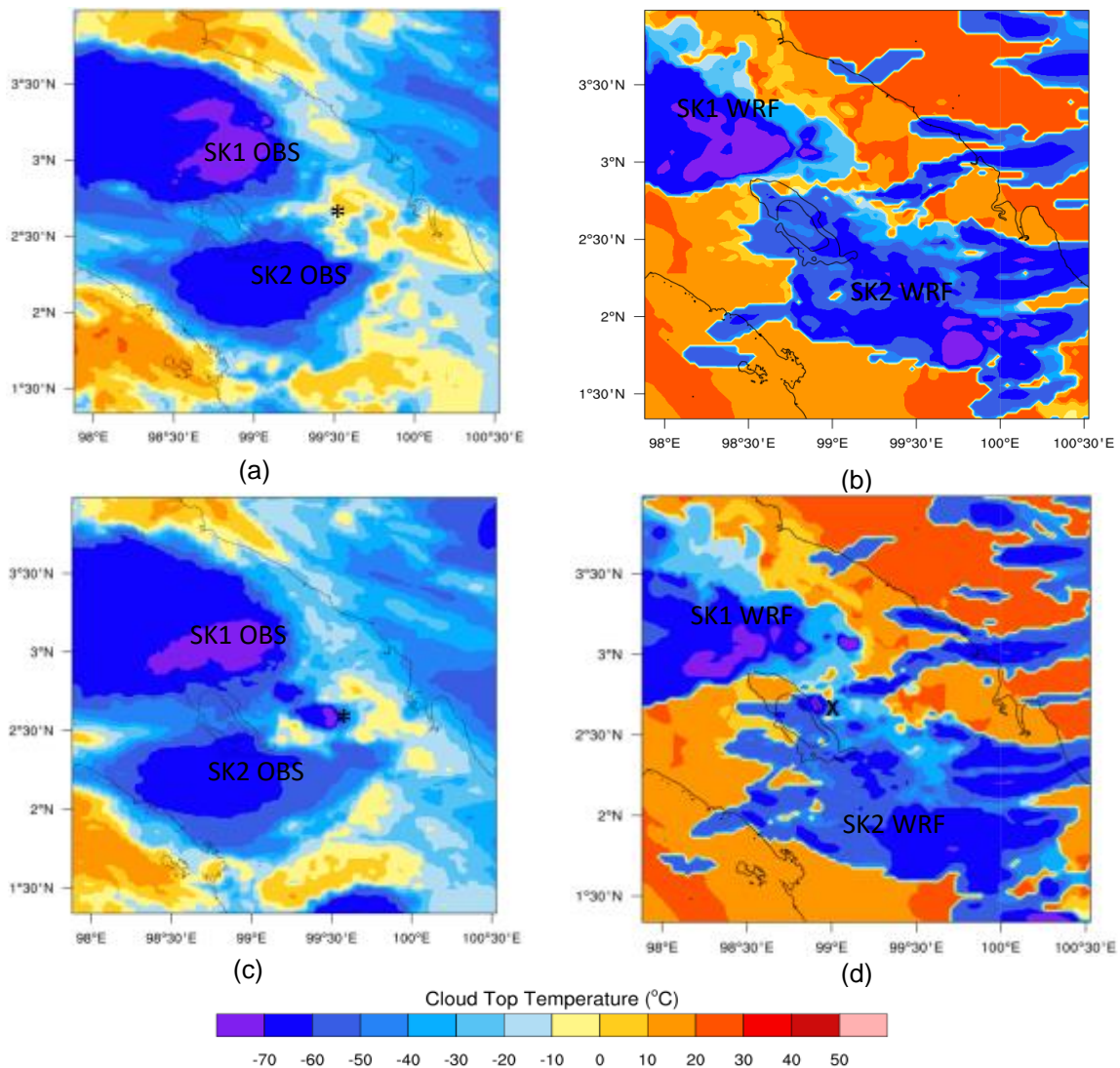
Untuk menguji kemampuan WRF-ARW dalam menyimulasikan kasus turbulensi, perlu dilakukan verifikasi dengan data observasi yang merepresentasikan kondisi aktual. Semakin mirip hasil model dengan observasi, maka dapat dianggap kemampuan model akan semakin mendekati kondisi sebenarnya (Trier *et al.*, 2012). Perbandingan dilakukan dengan membandingkan parameter suhu puncak awan (SPA) dari WRF-ARW dan citra IR1 Himawari sebagai data observasi. Pada Gambar 3, SPA ditampilkan pada 10.00 UTC (saat kejadian) dan 10.30 UTC (setelah kejadian). Diantara waktu tersebut terjadi perubahan kondisi awan yang signifikan di lokasi turbulensi (tanda bintang pada

Gambar 3a dan 3c.). Pada Gambar 3c terdapat dua ukuran besar sistem konvektif dalam (sekitar $1^{\circ} \times 1^{\circ}$) yang terletak di utara Danau Toba (selanjutnya disebut SK1) dan di selatan Danau Toba (selanjutnya disebut SK2) dengan SPA terendah mencapai kurang dari -70°C yang menunjukkan awan kumulonimbus berdasarkan Gambar 1a. Tampak kemunculan awan konvektif baru yang mulai muncul pada pukul 10.30 UTC dengan SPA $\leq 70^{\circ} \text{C}$ di lokasi turbulensi (tanda bintang pada Gambar 3a dan 3c). Berdasarkan hal tersebut maka perhatian akan difokuskan pada lokasi kejadian.

Berbagai proses yang terjadi pada observasi awan di citra IR1 akan dijadikan acuan untuk memverifikasi hasil simulasi model WRF-ARW. Dapat dilihat dari hasil simulasi WRF-ARW pada Gambar 3b dan 3d. Pada 10.00 UTC (Gambar 3b) menunjukkan sistem konvektif di sebelah utara Danau Toba (SK1) yang memiliki tampilan hampir mirip seperti observasi IR1. Kemiripan SK1 antara citra satelit dan WRF-ARW terletak pada adanya area

SPA $\leq 70^{\circ} \text{C}$ di bagian depan (sisi bagian timur) SK1. Meskipun mirip, posisi SK1 WRF-ARW cenderung bergeser sedikit ke barat dibandingkan pengamatan citra satelit (Gambar 3a). WRF-ARW juga berhasil menyimulasikan sistem konveksi di selatan Danau Toba (SK2) seperti yang ditemukan pada citra satelit. Namun kondisi tersebut cukup berbeda dengan pengamatan dimana area SPA $\leq -60^{\circ} \text{C}$ hasil WRF memiliki cakupan yang lebih luas dibandingkan dengan observasi. Kemudian SPA $\leq -70^{\circ} \text{C}$ untuk SK2 cenderung bergeser sedikit ke arah timur dibandingkan dengan data citra satelit.

Berdasarkan hasil perbandingan hasil simulasi model dan data observasi, terdapat bias spasial yang dihasilkan model. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi lokal yang cukup kuat (Bugichi *et al.*, 2019). Oleh karena itu, lokasi turbulensi juga tidak akan berada dititik atau lokasi yang sama dengan observasi. Tetapi secara umum pembentukan SK1 dan SK2 di model cukup menunjukkan performa yang



Gambar 3. Suhu Puncak Awan, perbandingan antara observasi dan simulasi WRF-ARW. a) observasi 10.00 UTC, b. WRF-ARW 10.00 UTC, c. observasi 10.30 UTC, d. WRF-ARW 10.30 UTC. Tanda bintang mengindikasikan lokasi nyata kejadian turbulensi, dan tanda silang dipilih sebagai lokasi turbulensi dalam simulasi WRF-ARW.

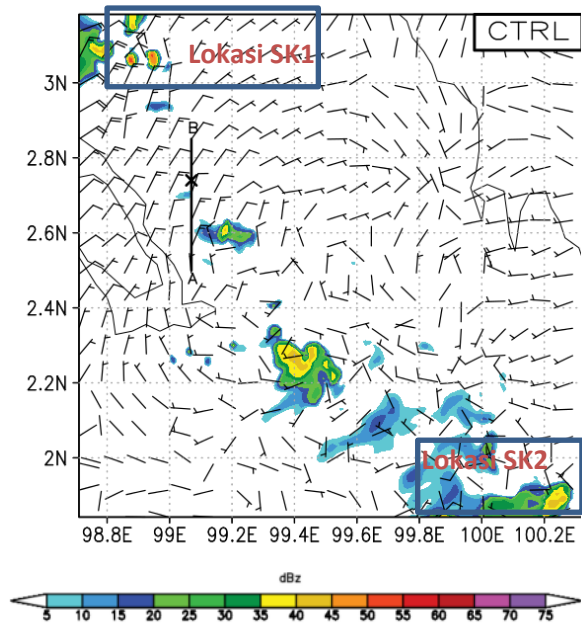
baik jika dibandingkan dengan citra satelit. Kemiripan proses antara observasi dan model akan digunakan sebagai dasar untuk menentukan lokasi turbulensi di simulasi model. Dari pengamatan seperti dijelaskan sebelumnya, pada 10.00 UTC tidak menunjukkan sistem konvektif (tanda bintang pada Gambar 3a). Tetapi 30 menit kemudian pada 10.30 UTC, ada sistem konvektif kecil (tanda bintang pada Gambar 3c). Karena terdapat perbedaan lokasi antara observasi dan simulasi WRF-ARW, maka dalam simulasi WRF-ARW harus dicari lokasi yang memiliki proses yang sama untuk merepresentasikan lokasi turbulensi. Lokasi pada hasil simulasi yang prosesnya mirip dengan lokasi turbulensi berdasarkan citra satelit terdapat pada tanda silang pada Gambar 3d. Walaupun lokasi turbulensi sedikit bergeser ke arah barat dibandingkan hasil observasi, namun proses konvektif pada hasil simulasi dianggap dapat mewakili dengan kondisi lokasi turbulensi yang sebenarnya (tanda bintang Gambar 3a dan 3c). Berdasarkan hal tersebut, pada analisis turbulensi selanjutnya, tanda silang pada Gambar 3d akan digunakan sebagai lokasi referensi untuk analisis turbulensi menggunakan WRF-ARW.

3.2 Analisis Pengaruh Awan Konvektif Terhadap Lingkungan

Pesawat mengalami turbulensi di ketinggian jelajah FL245 (ketinggian tekanan 24500 kaki). *Pressure altitude* yang terdeteksi oleh pesawat diperoleh dari konversi berdasarkan Standar Atmosfer Internasional (ISA) (Lane *et al.*, 2003; Kim dan Chun, 2012). Kemudian jika diubah kembali menjadi *pressure level*, maka ketinggian tekanan 24500 berada pada lapisan 384 hPa berdasarkan ISA. Pengamatan Radiosonde di Stasiun Meteorologi Kualanamu pada tanggal 24 Oktober 2017 pukul 12.00 UTC (tidak ditampilkan) menunjukkan lapisan 384 hPa berada pada ketinggian sekitar 7,9 km di atas permukaan tanah. Karena model ketinggian dihitung dari permukaan laut, maka lokasi kejadian memiliki ketinggian sekitar 9,5 km MSL setelah dijumlahkan dengan elevasi tanah di lokasi turbulensi.

Pada simulasi D3 Gambar 4, awan konvektif SK1 dan SK2 hanya sedikit terlihat karena sebagian besar berada di luar area D3. Tetapi angin pada ketinggian 9,5 km disekitar area tanda silang merupakan *outflow* yang timbul dari SK1 (Gambar 3) yang kemungkinan mempengaruhi lokasi pesawat mengalami turbulensi. Simulasi WRF-ARW menunjukkan bahwa pada ketinggian 9,5 km pada tanda silang kondisinya cenderung cerah (tidak berawan). Namun pengaruh SK1 di sebelah utara lokasi turbulensi memiliki pengaruh yang dominan terhadap kondisi angin pada tanda silang sehingga hal ini membuktikan bahwa SK1 kemungkinan memiliki pengaruh terhadap pembentukan turbulensi pada ketinggian 9,5 km berdasarkan kondisi angin yang terjadi di $z = 9,5$ km yang menghasilkan kecepatan rata-rata 10-20 knot di sekitar lokasi kejadian. Meskipun angin yang ditimbulkan tidak terlalu signifikan, tetapi angin ini memberi peran

dalam pembentukan Bilangan Richardson rendah di lokasi kejadian yang akan dibahas pada sub bagian 3.4. Pengaruh awan konvektif di lokasi kejadian akan dianalisis pada sub bagian 3.3 berdasarkan garis A-B di Gambar 4.



Gambar 4. Angin horizontal (knot) dan nilai reflektivitas (dBz) pada $z = 9,5$ km. Tanda silang menunjukkan lokasi turbulensi, garis A-B untuk penampang vertikal Gambar 5 yang menunjukkan lokasi sel konvektif baru.

3.3 Analisis Penampang Vertikal

Pada citra satelit Gambar 3a dan 3c disebutkan bahwa awan konvektif telah terbentuk sejak sebelum 10.00 UTC dan terus bertambah kuat hingga 10.30 UTC. Dalam analisis ini akan ditampilkan evolusi sistem konvektif setiap 10 menit (Gambar 5) berdasarkan garis A-B pada Gambar 4 sehingga diperoleh gambaran yang lebih detail tentang bagaimana mekanisme turbulensi di luar awan terbentuk akibat pengaruh aktivitas konvektif tersebut.

Gambar 5a menunjukkan pada 09.30 UTC ketinggian awan pada penampang masih rendah (7 km) dan tidak ada pola yang signifikan pada kontur isentropik. Terdapat *downdraft* sebesar 2 knot di bawah lokasi kejadian pada $y = 28$ km $z = 7$ km. Pada lokasi turbulensi (tanda bintang) tidak terdapat indikasi potensi turbulensi. Pada Gambar 5b (10 menit kemudian) terjadi pertumbuhan awan yang intensif dengan ketinggian puncak awan konvektif mencapai $z = 10$ km dan batas puncak awan melewati tanda bintang dan sudah terlihat kontur isentropik bergelombang pada $z = 9,5$ km. Nilai *updraft* pada awan pada $z = 8$ km sampai 9 km menunjukkan nilai 2 knot dengan nilai maksimum 3,5 knot pada $z = 8,75$ km.

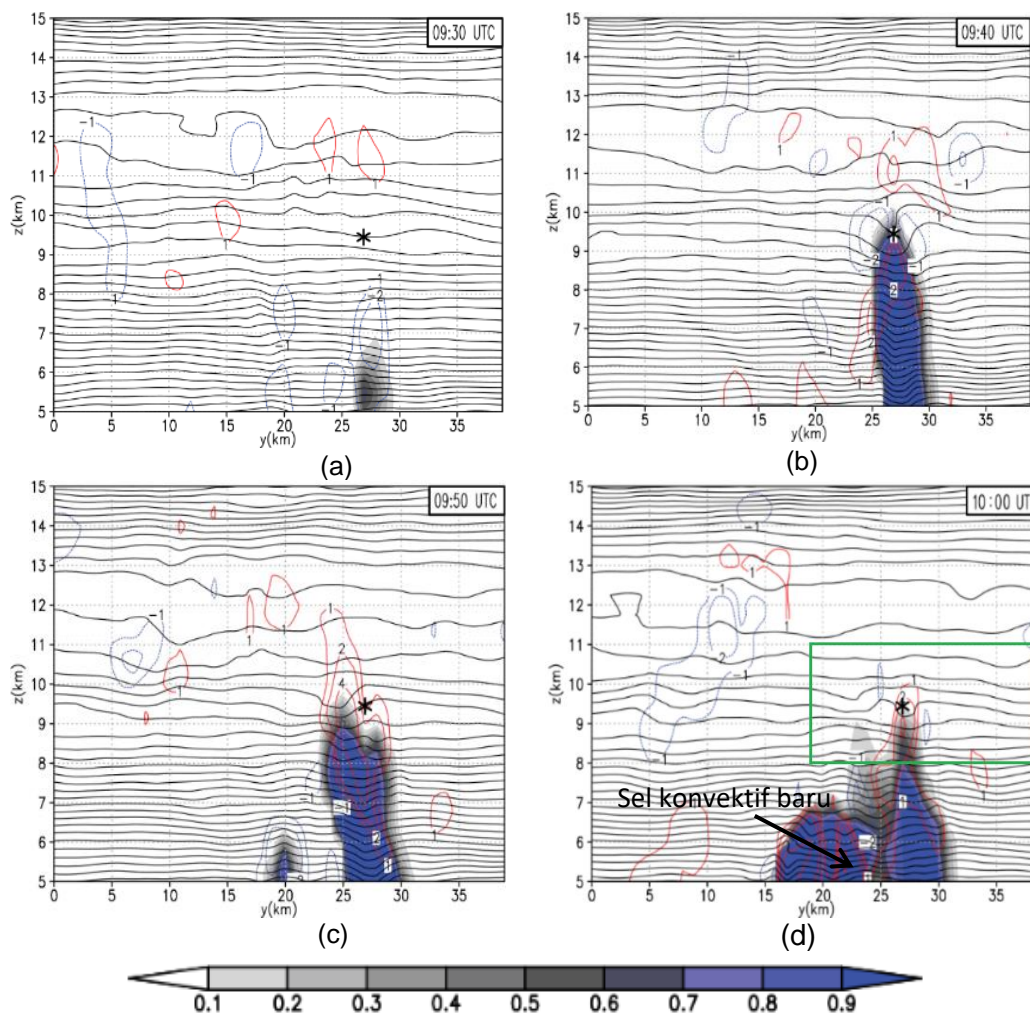
Kondisi ketinggian puncak awan terlihat menurun pada pukul 09.50 UTC (Gambar 5c) namun dengan kondisi *updraft* yang semakin kuat pada $z = 7$ km hingga 10 km sebesar 4 knot dengan nilai maksimal 5 knot pada $z = 9,5$ km. Pada saat itu kontur

isentropik bergelombang masih terbentuk di atas puncak awan pada ketinggian yang sama dan tidak mengalami perubahan yang signifikan dengan kondisi sebelumnya. Pada 10.00 UTC (Gambar 5d) yang merupakan waktu turbulensi yang dialami oleh pesawat, ketinggian puncak awan kembali turun sedikit menjadi 9,2 km dan juga diikuti dengan penurunan *updraft* menjadi 4 knot pada $z = 9$ km.

Kontur isentropik pada saat itu masih menunjukkan pola bergelombang tepat di tanda bintang sehingga berpotensi berkontribusi pada turbulensi. Selain itu perlu diperhatikan juga bahwa pada $y = 15-25$ km (Gambar 5d) terdapat sel konvektif baru dengan ketinggian puncak awan mencapai 7 km namun memiliki *updraft* yang cenderung kuat hingga 10 knot. Dimana sebelumnya pada Gambar 5a dan b sel konvektif baru ini belum terlihat jelas. Berdasarkan analisis tersebut dapat diketahui bahwa pada lokasi turbulensi, awan telah berkembang sebelum pukul 09.30 UTC dan semakin kuat hingga pukul 09.40 UTC dan membentuk kontur isentropik bergelombang pada ketinggian 9,5 km tepat di lokasi tersebut. Kondisi awan terlihat melemah pada pukul 09.50 dan 10.00 UTC namun kondisi isentropik yang

bergelombang masih terjadi pada saat itu. Kemudian pada 10.00 UTC sel konvektif baru tumbuh di bawah lokasi turbulensi dengan kondisi yang semakin kuat di waktu berikutnya. Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa turbulensi yang dialami oleh pesawat lebih disebabkan oleh sistem konvektif di bawah lokasi turbulensi yang sedang melemah ditandai oleh tinggi puncak awan yang menurun tetapi masih menyisakan pola isentropik bergelombang dilokasi kejadian. Sedangkan awan yang semakin kuat yang terdeteksi pada pukul 10.30 UTC merupakan konvektif baru yang tumbuh di sebelah lokasi kejadian tetapi tidak memiliki pengaruh langsung terhadap kondisi turbulensi di lokasi kejadian.

Gambar 6 menunjukkan nilai Bilangan Richardson (Ri) dan TKE di sekitar tanda bintang pada $z = 9,5$ km. Ri dihitung berdasarkan Persamaan 1. TKE dihitung melalui penjumlahan antara TKE skala sub grid yang dihasilkan skema MYJ PBL (Trier et al., 2012; Kim dan Chun, 2012) dengan TKE dari Persamaan 2 dan disebut dengan total TKE (Kim dan Chun, 2012). TKE Persamaan 2 di sini menggunakan *moving average* setiap komponen kecepatan pada 10×10 titik grid.



Gambar 5. Penampang vertikal (garis A-B Gambar 4). Kontur warna menunjukkan *total condensate cloud* (g/kg), kontur hitam menunjukkan isentropik interval 0.5 K, kontur biru/merah menunjukkan *downdraft/updraft*, dan tanda bintang menunjukkan lokasi turbulensi. a. 09.30 UTC, b. 09.40 UTC, c. 09.50 UTC, and d. 10.00 UTC (kotak hijau sebagai referensi Gambar 6).

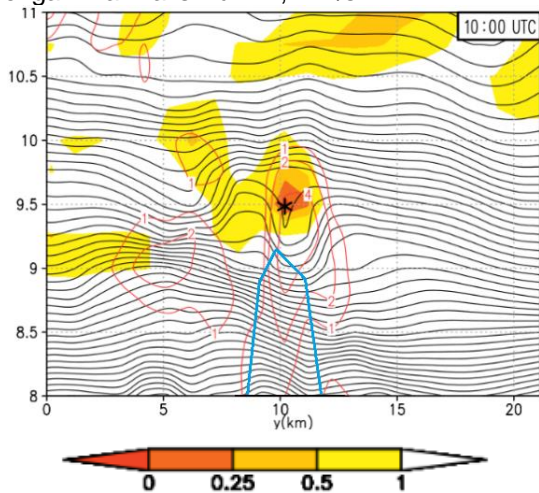
$$Ri = \frac{g \Delta\theta}{\theta \Delta z} \left[\left(\frac{\Delta u}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z}\right)^2 \right] \dots\dots\dots(\text{Pers. 1})$$

dengan *Ri* menunjukkan bilangan Richardson, *g* menotasikan percepatan gravitasi (m/s²), *θ* merupakan suhu potensial (K), *z* menotasikan ketinggian geopotensial (m) dan *u, v* menotasikan angin zonal dan meridional (m/s).

$$e = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \dots\dots\dots(\text{Pers. 2})$$

dengan *e* adalah TKE per satuan massa (m²/s²), *u'* adalah deviasi angin zonal terhadap rata-ratanya (m/s), *v'* adalah deviasi angin meridional terhadap rata-ratanya (m/s), dan *w'* adalah deviasi angin vertikal terhadap rata-ratanya (m/s).

Pada 10.00 UTC potensi turbulensi terlihat di lokasi turbulensi yang ditandai dengan adanya nilai *Ri* kritis (*Ri* ≤ 0,25) di tanda bintang. Hal ini juga terbukti bahwa terdapat pola bergelombang dari kontur isentropik yang berada tepat di lokasi turbulensi, serta menunjukkan sebaran nilai *TKE* di lokasi turbulensi dengan nilai maksimum 4,4 m²/s².



Gambar 6. Bilangan Richardson (berwarna), TKE (kontur merah) isentropic interval 0,2 K (kontur hitam), dan batas awan (garis biru = 0,1 g/kg total cloud condensate) jam 10.00 UTC. Tanda bintang menunjukkan lokasi turbulensi.

3.4 Analisis Mekanisme Turbulensi

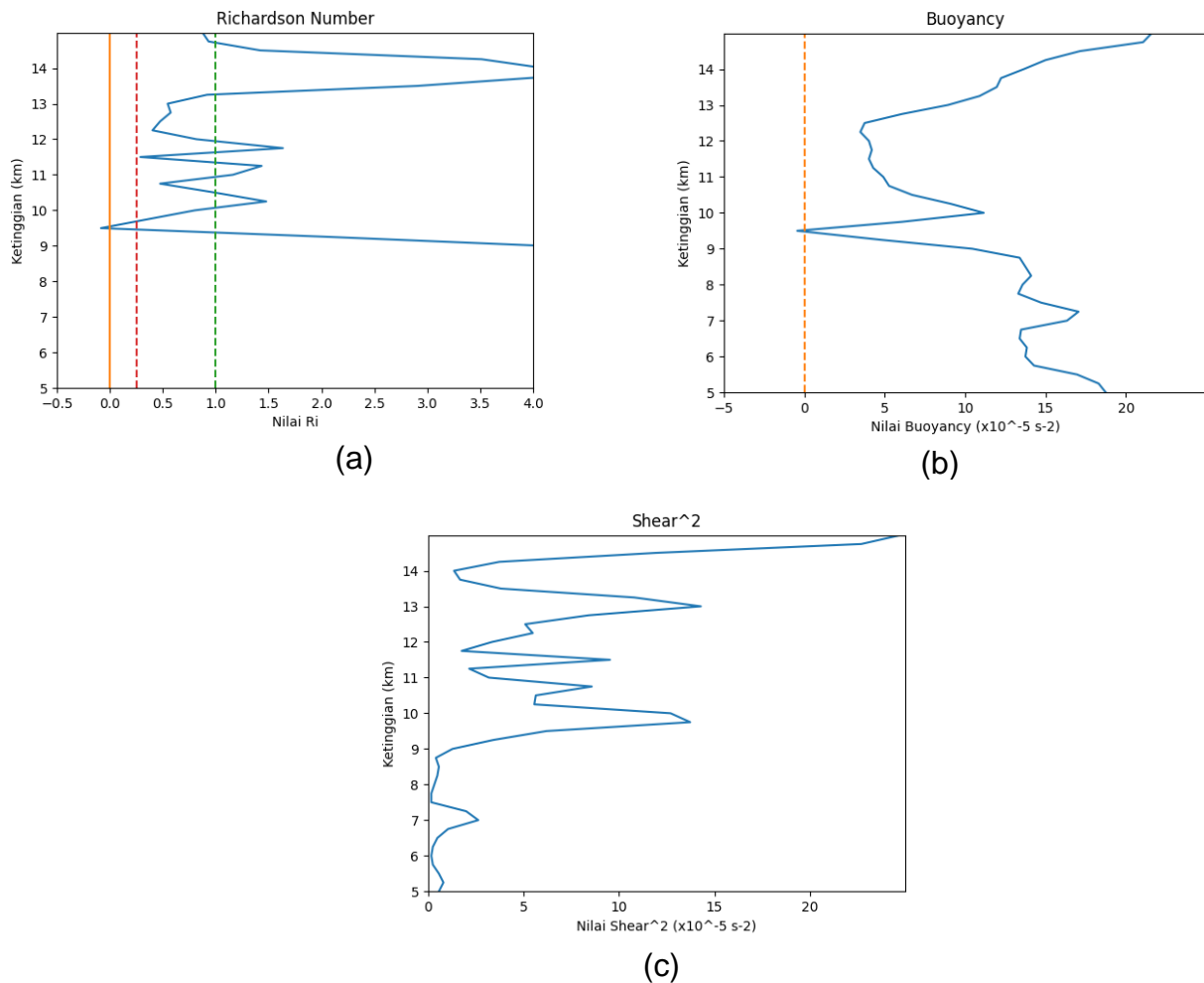
Dari hasil analisis model WRF-ARW, di utara dan selatan lokasi turbulensi telah terjadi sistem konvektif yang tumbuh dalam skala yang relatif besar (melebihi 1° x 1°). Kedua sistem konvektif ini berperan dalam mempengaruhi kondisi atmosfer dari ketinggian permukaan hingga ketinggian 9,5 km.

Tetapi sistem konvektif yang mempengaruhi lokasi turbulensi hanya sistem konvektif di utara (SK1). Pada ketinggian 9,5 km, arus keluar dari SK1 cenderung bertiup ke selatan dengan kecepatan berkisar 10-20 knot. Beranjak dari pengaruh SK1 di lokasi kejadian, tepat di lokasi tersebut juga terdapat sistem konvektif yang lebih kecil yang juga menjadi faktor utama terbentuknya turbulensi di lokasi turbulensi.

Kondisi awan di lokasi turbulensi mencapai ketinggian maksimum pada 09.40 UTC dan berhasil mengubah kontur isentropik pada ketinggian 9,5 km. Pola isentropik yang patah/bergelombang (*overturning isentropic*) ini tetap ada di sekitar ketinggian 9,5 - 9,9 km pada 09.50 dan 10.00 UTC meskipun batas ketinggian puncak awan telah berkurang menjadi 9,2 km. Pada Gambar 6, *overturning isentropic* jika dilihat lebih detail, telah membentuk gelombang gravitasi pecah (*breaking gravity wave*) yang memberikan potensi turbulensi yang kuat pada ketinggian sekitar 300 - 700 m di atas awan.

Terbentuknya *overturning isentropic* di ketinggian 9,25-9,75 km berkontribusi terhadap nilai *Ri* kritis yang mengindikasikan dukungan terjadinya turbulensi di atmosfer pada ketinggian 9,5 km (Gambar 7a). Kondisi ini disebabkan karena gradien temperatur potensial terhadap ketinggian mengalami penurunan terhadap ketinggian sehingga menyebabkan nilai *buoyancy* yang rendah bahkan negatif pada level 9,5 km (Gambar 7b). Berdasarkan kontur isentropik (Gambar 6), pola kontur temperatur yang hampir memiliki pola sejajar sumbu vertikal dapat menjadi indikasi pecahnya gelombang gravitasi (*breaking gravity wave*) pada ketinggian 9.25-9.75 km. Isentropik bergelombang yang menjadi *breaking gravity wave* ini disebabkan oleh pendinginan karena arus atas yang dihasilkan oleh awan (Kim dan Chun, 2012). Kondisi ini tampaknya berlangsung lebih lama dibandingkan dengan keberadaan puncak awan di lokasi turbulensi yang sudah turun. Ini mengakibatkan di lokasi turbulensi tidak terdapat awan namun *breaking gravity wave* dan *Ri* kritis masih tetap ada.

Dua parameter yang berkontribusi pada pembentukan nilai *Ri* rendah adalah stabilitas statis rendah dan *shear* yang besar (Duran dan Molinari, 2016). Parameter ini dapat memperkuat dan melemahkan satu sama lain yang mempengaruhi nilai *Ri*. Pada kasus turbulensi ini (Gambar 7b) nilai stabilitas statik pada ketinggian 9,5 km sangat rendah (-0,496 x 10⁻⁵ s⁻², nilai negatif menunjukkan telah mencapai kategori instabilitas statik), disertai dengan nilai *shear* kuadrat yang relatif besar (6.253 x 10⁻⁵ s⁻²) pada ketinggian 9,5 km (Gambar 7c). Oleh karena itu, dapat dilihat bahwa kedua parameter ini memberikan efek yang saling menguatkan pada pembentukan *Ri* kritis di ketinggian 9,5 km. Jika dibandingkan dengan nilai *Ri* saat tidak ada aktivitas konvektif, pada ketinggian 9,5 km menunjukkan nilai apung yang tinggi dengan geser yang relatif lemah sehingga menghasilkan nilai *Ri* yang besar.



Gambar 7. Profil vertikal (a) Richardson Number - garis jingga $Ri=0$, garis putus-putus merah $Ri=0,25$ (batas Ri kritis) dan garis putus-putus hijau $Ri=1,0$, (b) Buoyancy (stabilitas statis) - garis jingga Buoyancy = 0, dan (c) $Shear^2$ di lokasi turbulensi

Penyebab kestabilan statik yang rendah disebabkan oleh *breaking gravity wave* dan terjadi shear yang relatif besar akibat dari angin sistem konvektif di arah utara lokasi turbulensi. Kedua fenomena tersebut berkontribusi pada nilai Ri kritis di lokasi turbulensi. Hal ini mirip dengan penelitian Trier dan Sharman (2009) dimana adanya peran angin yang dihasilkan oleh sistem konvektif sehingga membentuk *wind shear* vertikal sehingga berkontribusi menurunkan nilai Ri .

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan secara keseluruhan, turbulensi di dekat awan konvektif yang dialami oleh penerbangan komersial ID6890 pada tanggal 24 Oktober 2017 berdasarkan simulasi model WRF-ARW terjadi di sekitar 300-700 meter di atas puncak awan. Ada dua faktor yang berkontribusi terhadap turbulensi ini, yang pertama adalah pendinginan atmosfer akibat *updraft* dari sistem konvektif yang melemah yang masih bertahan di lokasi turbulensi sehingga membentuk *breaking gravity wave* dan yang kedua adalah sistem konvektif di utara lokasi turbulensi berkontribusi kepada pembentukan

shear vertikal pada ketinggian 9,5 km. Keduanya memberikan efek yang saling menguatkan saat turbulensi terjadi di ketinggian 9,5 km yang diindikasikan dari nilai bilangan richardson rendah yang terbentuk dilokasi kejadian. Selain itu nilai TKE sebesar $4,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ juga membantu meningkatkan daya turbulensi di lokasi tersebut.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Arakawa, dan Jung, J.-H., (2011). Multiscale modeling of the moist convective atmosphere. *A review. Atmos. Res.* 102. 263–285. doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-15-0014.1
- Duran, P. dan Molinari, J. (2016). Upper-tropospheric low richardson number in tropical cyclones: sensitivity to cyclone Intensity and the diurnal cycle. *J. Atmos. Sci.* 73, 545-54. doi: 10.1175/JAS-D-15-0118.1
- Hong, S.-Y., Kim, J.-H., Lim, J., dan Dudhia, J., (2006). The WRF single moment microphysics scheme (WSM). *Journal of*

- the Korean Meteorological Society*. 42. 129-151.
- Kim, J. H., dan Chun, H. Y., (2012). A numerical simulation of convectively induced turbulence above deep convection. *J. Appl. Meteor. Climatol*, 51, 1180-1200. doi: 10.1175/JAMC-D-11-0140.1
- KNKT. (2017) Aircraft accident investigation report PT. Batik Air Boeing 737-800; PK-LBY inflight from Jakarta to Medan Republic of Indonesia 24 October 2017 Preliminary: NTSC.17.10.31.04. Indonesia: National Transportation Safety Committee Republic of Indonesia
- Kompas, (2017). Batik Air Alami Turbulensi, Satu Penumpang dan Awak Alami Patah Tulang Tanggal 25 Oktober 2017 Pukul 15.29 WIB. (<https://regional.kompas.com/read/2017/10/25/15293911/batik-air-alami-turbulensi-satu-penumpang-dan-awak-alami-patah-tulang>.)
- Lane, T. P., Sharman, R. D., Clark, T. L. dan Hsu, H. M., (2003). An Investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *J. Atmos. Sci.*, 60, 1297–1321. doi: 10.1175/1520-0469(2003)60<1297:AIOTGM>2.0.CO;2
- Lane, T. P., Sharman, R. D., Trier, S. B., Fovell, R. G. dan William, J. K., (2012). Recent advances in the understanding of near-cloud turbulence, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 499-515. doi:10.1175/BAMS-D-11-00062.1
- Molarin, K., (2013). Case study of CAT over the North Atlantic Ocean. Stockholm: University Stockholm
- Sharman, R. D., dan Lane, T. P. (2016). Aviation turbulence: process, detection, prediction. Colorado: Springer Inc.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. P., Dudhia, J., Gill, D. O., Barke, D. M, Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., dan Powers, J. G., (2008). A description of the advanced research WRF version 3. Colorado: National Center for Atmospheric Research (NCAR)
- Trier, S. B., Sharman, R. D., dan Lane, T. P., (2012). Influence of moist convection on a cold-season outbreak of clear-air turbulence (CAT). *Mon. Wea. Rev.*, 140, 2477-96. doi: 10.1175/MWR-D-11-00353.1
- Trier, S. B. dan Sharman, R. D., (2009). Convective-Permitting Simulations of The Environment Supporting Widespread Turbulence Within The Upper-Level Outflow of A Mesoscale System, *Mon. Wea. Rev.*, 137, 1972-1990. doi: 10.1175/2008MWR2770.1
- Storer, L.N., Williams, P.D. dan Gill, P.G., (2012) Aviation Turbulence: Dynamics, Forecasting, and Response to Climate Change. *Pure Appl. Geophys.* 176, 2081–2095. doi: 10.1007/s00024-018-1822-0