

ESTIMASI PARAMETER TURBULENSI UNTUK JASA PENERBANGAN BERBASIS HASIL ANALISIS BEBERAPA DATA RADIOSONDE DI KAWASAN BARAT INDONESIA

Eddy Hermawan¹ dan Zainal Abidin²

•) Peneliti Pus-it Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN

"> Peneliti Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG)

E-mail: eddy@bdg.lapan.go.id

ABSTRACT

The one of an important thing related to the aviation is the correct information of aviation meteorology, especially about bad weather condition such as turbulence that often disturb the plane during their flight. There are many parameters to estimate the turbulence parameter. One of them is called the Richardson Number (Ri) such as already investigated by Waco (1970). We continued his study by applying the radiosonde data distributed at five stations in the Western part of Indonesia region, especially during the *Coupling Processes Equatorial Atmosphere I* (CPEA I) Campaign started from April 10 to May 10, 2004. We defined the turbulence when $Ri < 0.25$ as described by Keller (1981). We found initial turbulence occurrence indication, even though we have found significant indication yet, related with less of locations and data observations which is only one month observation. Turbulence in the plane is described as the changes of vertical gravitation in the plane and observed by vertical accelerometer which is installed in the plane. After making some validations with the vertical accelerometer data, we found only a few good correlation between Ri and turbulence. We suspect it caused by the less of data observation. But initial indication based on data analysis shows that light turbulence occurrence a long Eastern Coast of Malacca Peninsula on 19th April 2004.

ABSTRAK

Salah satu hal penting yang diperlukan dalam dunia penerbangan adalah informasi meteorologi penerbangan yang tepat, akurat, dan handal, terutama tentang kondisi cuaca buruk [*bad weather condition*] seperti turbulensi yang kerap kali mengganggu dunia penerbangan. Banyak parameter untuk mengestimasi turbulensi, salah satu diantaranya adalah Bilangan Richardson (Ri) yang telah diteliti oleh Waco (1970). Hal serupa penulis lakukan dengan menggunakan data radiosonde yang tersebar di lima stasiun pada wilayah barat Indonesia, saat kegiatan *Coupling Processes Equatorial Atmosphere I* (CPEA I) yang berlangsung pada 10 April 2004

sampai dengan 9 Mei 2004. Dengan membcri batasan turbulensi aktif terjadi di saat $Ri < 0.25$ (Kelly, 1981). Penulis menemukan indikasi awal adanya turbulensi, walaupun belum diperoleh hasil yang cukup signifikan. Hal ini dikarenakan minimnya lokasi dan data pengamatan yang hanya satu bulan. Turbulensi yang diinterpretasikan sebagai perubahan gravitasi vertikal yang terjadi di dalam pesawat terbang dan diukur dengan menggunakan alat *vertical accelerometer* yang dipasang di dalam pesawat terbang. Setelah divalidasi dengan data *vertical accelerometer*, ternyata parameter Ri tidak memiliki pengaruh nyata dengan turbulensi. Hal ini, diduga karena kurangnya titik pengamatan. Namun indikasi awal terlihat jelas di sepanjang wilayah kajian Pantai Timur Semenanjung Malaka pada tanggal 19 April 2004.

Kata kunci: *CPBA campaign, Turbulence and accelerometer*

1 PENDAHULUAN

Pesawat udara merupakan alat transportasi yang tercepat saat ini, walaupun begitu efisiensi waktu yang tinggi ini harus dibayar dengan biaya dan resiko kecelakaan yang tinggi. Kecelakaan pesawat udara dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti: cuaca, keadaan mesin pesawat, dan *human error* baik dari bagian manajemen Bandar Udara (Lalu Lintas Udara) hingga kesalahan oleh pilot. Dari beberapa faktor tersebut, cuaca memegang urutan pertama (75 % kejadian dari jumlah kecelakaan pesawat) sebagai penyebab kecelakaan pesawat udara. Fenomena cuaca yang mengganggu pesawat udara adalah jarak pandang yang dekat akibat kabut, hujan, dan awan, akresi es (penimbunan es pada badan pesawat), dan turbulensi.

Turbulensi memang tidak membuat pesawat sampai jatuh, tetapi dapat sebagai pemicu serangkaian kejadian yang dapat menyebabkan kecelakaan. Dampak minimal akibat turbulensi seperti ketidaknyamanan penumpang dan penggunaan bahan bakar yang meningkat. Makalah ini dibuat dengan tujuan utama adalah menduga wilayah dan ketinggian terjadinya turbulensi secara kuantitatif pada saat pengamatan menggunakan radiosonde.

Di dalam dunia penerbangan penentuan daerah yang sedang mengalami turbulensi sangat penting demi kenyamanan penumpang. Selain itu banyak juga laporan tentang kecelakaan yang disebabkan oleh turbulensi hebat yang dialami pesawat tersebut. Efek yang timbulkan turbulensi pada pesawat bergantung pada beberapa hal, yaitu

- Kecepatan pesawat, efek turbulensi berbanding lurus dengan kecepatan pesawat, jika pesawat semakin cepat maka efek turbulensi semakin jelas dirasakan.

- Massa pesawat, efek turbulensi berbanding terbalik dengan massa pesawat, jika massa pesawat semakin besar maka efek turbulensi yang dirasakan tidak sebesar pada pesawat ringan.
- Ukuran sayap pesawat, efek turbulensi yang dirasakan pada pesawat bersayap lebar sama dengan pesawat yang bersayap kecil.

Penilaian kualitatif dan kuantitatif jenis turbulensi terhadap pengaruhnya dapat dilihat pada Tabel 1-1, sedang hubungan jenis awan dengan turbulensi yang terjadi dapat dilihat pada Tabel 1-2.

Tabel 1-1: PERBANDINGAN KUALITATIF DAN KUANTITATIF TURBULENSI

	Keadaan Pesawat	Fluktuasi kecepatan Pesawat	Kecepatan Gust
Lemah	Penumpang diberi peringatan untuk menggunakan sabuk pengaman	9.3 - 27.8 km/jam	7.2-21.6 km/jam
Sedang	Guncangan mulai terasa	27.8 - 46.3 km/jam	21.6-39.6 km/jam
Kuat	Pesawat sukar dikendalikan	> 46.3 km/jam	39.6-54 km/jam
(Soejitno, 1975)			

Tabel 1-2: HUBUNGAN JENIS AWAN DENGAN TURBULENSI YANG TERJADI DI DALAMNYA

Jenis Awan	Jenis Turbulensi
Stratus (St)	Hampir tidak ada, kecuali bersama Cumulonimbus
Cirrus (Ci)	
Cirrostratus (Cs)	
Cirrocumulus (Cc)	
Altostratus (As)	
Nimbostratus (Ns)	
Stratocumulus (Sc)	sedang
Cumulus (Cu)	kuat
Cumulonimbus Cb)	Sangat kuat

(Met. Office, 1980)

Pada saat pesawat mengalami turbulensi, maka akan membuat ketidaknyamanan pada penumpang. Disamping itu membuat pilot bekerja lebih keras untuk mengendalikan pesawat. Pada sisi efisiensi bahan bakar, turbulensi menyebabkan peningkatan kerja mesin sehingga perlu lebih banyak bahan bakar saat terjadi turbulensi. Jika turbulensi berlangsung lama dan dengan intensitas tinggi serta pilot tersebut tidak dapat mengendalikan pesawatnya dengan baik maka memungkinkan pesawat tersebut sulit dikendalikan dan berakhir dengan kecelakaan.

Tidak semua kasus turbulensi berakhir dengan jatuhnya pesawat, hanya sekitar 1-3 % kasus kecelakaan pesawat akibat turbulensi. Tetapi turbulensi merupakan pemicu kecelakaan jika tidak ditanggulangi dengan baik. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan utama menentukan besaran turbulensi menggunakan pendekatan bilangan *Richardson* (R_i) selain mengidentifikasi lokasi terjadinya turbulensi selama kegiatan *Coupling Processes Equatorial Atmosphere* (CPEA) 2004 berlangsung dari tanggal 10 April hingga 9 Mei 2004.

2 METODOLOGI

2.1 Definisi

Turbulensi merupakan gerakan udara yang kompleks, tidak teratur, dan sulit diprediksi (Blackadar, 2000). Turbulensi dapat didefinisikan sebagai gerakan cepat serta tidak beraturan akibat olakan udara (*eddy*) yang terjadi di udara. Definisi turbulensi menurut *International Civilian Aviation Organization* (ICAO) adalah perubahan percepatan gravitasi (g) secara cepat dalam kurun waktu tertentu:

- Sangat rendah ($< \pm 0.05 g$) - getaran ringan.
- Rendah ($\pm 0.05 g - \pm 0.20 g$) - terasa hentakan ringan.
- Sedang ($\pm 0.20 g - \pm 0.50 g$) - terasa hentakan keras.
- Tinggi ($\pm 0.50 g - \pm 1.50 g$) - pesawat sulit dikendalikan.
- Sangat Tinggi ($> \pm 1.5 g$) - pesawat semakin sulit dikendalikan, berpeluang terjadi kerusakan fisik pesawat.

2.2 Jenis Turbulensi

Pada ilmu meteorologi, jenis-jenis turbulensi dapat dibedakan berdasarkan penyebab turbulensi (Anonim, 2000) tersebut yaitu:

- *Turbulensi Termal*

Turbulensi ini terjadi akibat pemanasan permukaan oleh radiasi matahari, disebabkan oleh faktor penutupan permukaan. Pemanasan permukaan menyebabkan naiknya udara ke atas, jika dua penutupan permukaan yang berbeda (misal: rumput dan aspal) berada berdekatan, akan memiliki turbulensi termal yang tinggi. Cenderung terjadi keadaan saat angin

yang sedikit di siang hari, serta berpeluang membuat kondisi atmosfer tidak stabil (*unstable lapse-rate*) dan keadaan jika kawasan yang mengalami pemanasan yang tinggi serta memiliki RH yang rendah.

- *Turbulensi Konvektif*

Turbulensi ini terjadi akibat awan konvektif, yang sebelumnya mengalami turbulensi termal. Di dalam awan ini terjadi turbulensi yang besar terutama saat terjadi hujan dan badai guntur.

- *Turbulensi Mekanik*

Sebab utama terjadinya turbulensi mekanik adalah adanya gesekan antara angin dengan permukaan bumi. Turbulensi jenis ini sering terjadi di daerah pegunungan karena permukaan bumi yang tidak rata menyebabkan olakan saat angin melalui pegunungan tersebut. Turbulensi ini terjadi hingga ketinggian 40.000 kaki (13.3 km), sebuah pegunungan rendah dapat menyebabkan turbulensi di atasnya hingga 25 kali tinggi pegunungan tersebut.

- *Clear Air Turbulence (CAT)*

Turbulensi jenis ini sulit diprediksi karena terjadi saat udara cerah, berbeda dengan turbulensi akibat awan-awan konvektif yang memang terjadi turbulensi di dalamnya. Oleh sebab itu kajian tentang CAT paling mendapat perhatian khusus dari peneliti di bidang penerbangan. CAT ini disebabkan oleh angin potong (*wind shear*). *Jet Stream* dan atau Gelombang Lee [*Lee Wave*]. Gelombang Lee adalah gelombang udara yang terbentuk akibat angin melewati gunung sehingga terjadi perputaran udara.

2.3 *Richardson Number (RI)*

Seluruh lapisan yang diteliti mulai dari ketinggian 2 km s.d 13 km dengan resolusi pengukuran setiap 100 m. Selanjutnya, dalam setiap keadaan waktu ditampilkan nilai Ri secara spasial pada enam titik pengamatan. Kemudian, dipilih waktu dan ketinggian yang sama.

Menurut Waco (1970) parameter stabilitas atmosfer Richardson Number memiliki pengaruh paling nyata (menggunakan Tes Chi-Square dan Kolmogorov Smirnov) di antara parameter-parameter udara atas lainnya [*Vertical Wind Shear, Horizontal Wind Shear, gradient suhu potensial terhadap ketinggian*]. Jika dilihat dari parameter-parameter yang berperan di dalam Ri, terdiri dari frekuensi *Brunt-Vaisala* kuadrat atau *Brunt-Vaisala Frequency Squared* (N^2) dan *Vertical Wind Shear* (VWS). Arti dari nilai Ri adalah bahwa semakin kecil maka semakin VWS yang terjadi pada lapisan tersebut dan atau semakin jauh dari keadaan atmosfer stabil dan cenderung mendekati keadaan netral.

$$Ri = \frac{N^2}{\beta^2} \quad (2-1)$$

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta \ln \theta}{\Delta z}}{\left(\frac{\Delta u}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z}\right)^2} \quad (2-2)$$

dengan

N^2 adalah frekuensi *Brunt-Vais&la Kuadrat* (s^{-1})

β adalah vertical wind shear (s^{-1})

g adalah percepatan gravitasi (9.8 ms^{-2})

θ adalah suhu potensial (K)

z adalah ketinggian (m)

u adalah kecepatan angin meridional (ms^{-1})

v adalah kecepatan angin zonal (ms^{-1})

Batas kritis terjadi turbulensi sedang pada $0.25 < Ri < 1$ dan untuk turbulensi tinggi pada nilai $Ri < 0.25$ (Keller, 1981).

2.4 Frekuensi *Brunt-Vais&la Kuadrat* (N^2)

N^2 adalah suatu parameter stabilitas atmosfer, serta memiliki orde nilai 10^{-4} sec^{-2} , dalam kondisi ekstrim stabil seperti di dekat permukaan salju arctic pada musim dingin, N^2 dapat bernilai $ix10^{+3} \text{ sec}^{-2}$, tetapi pada keadaan ekstrim tidak stabil seperti dekat permukaan yang panas, N^2 dapat bernilai $-ix10^{-3} \text{ sec}^{-2}$ (Saucier, 1955).

$$N^2 = g \frac{\Delta \ln \theta}{\Delta z}; \theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.286} \quad (2-3)$$

N^2 bernilai positif menunjukkan keadaan atmosfer yang stabil, maka suatu parcel udara akan mengalami osilasi teredam dalam gerakan vertikal. Pada N^2 yang bernilai negatif menunjukkan keadaan atmosfer yang tidak stabil dan mengakibatkan suatu parcel udara akan bergerak vertikal ke atas.

Sifat stabilitas yang dimiliki suatu massa udara sangat penting dalam meteorologi karena dapat diketahui kecenderungan yang dimiliki oleh gerakan-gerakan vertikal dari suatu massa udara. Perbedaan kecil dalam gerakan vertikal penting untuk menerangkan atau meramal terjadinya awan konvektif, hujan, perluasan daerah tekanan rendah, atau turbulensi.

2.5 Angin Potong Vertikal (*Vertical Wind Shear- VWS*)

VWS merupakan gradien kecepatan angin setiap ketinggian, semakin tinggi nilai VWS maka menunjukkan perbedaan kecepatan angin pada suatu lapisan udara. VWS yang tinggi merupakan pemicu atau bahkan indikator terjadinya turbulensi. Jika sedikit saja terjadi gradien kecepatan angin pada udara yang tidak stabil akan memicu pembentukan *eddy* sehingga terjadi olakan udara di lapisan tersebut.

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\Delta u}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{\Delta z}\right)^2} \quad (2-4)$$

2.6 Validasi

Penelitian ini merupakan sebuah model spasial sederhana perlu dilakukan validasi. Validasi menggunakan data gravitasi vertikal yang diukur saat pesawat melakukan penerbangan menggunakan alat *vertical accelerometer*.

3 DATA YANG DIGUNAKAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data udara atas hasil pengukuran radiosonde selama kegiatan *Coupling Processes Equatorial Atmosphere* (CPEA) campaign 2004 (10 April - 9 Mei 2004) dengan resolusi temporal 4 - 8 pengamatan per hari dan resolusi ketinggian pengamatan setiap 100 m. Lokasi titik pengamatan radiosonde, yaitu

- Padang, Sumatera Barat.
- Kototabang, Sumatera Barat.
- Jambi dan
- Kuching, Malaysia.

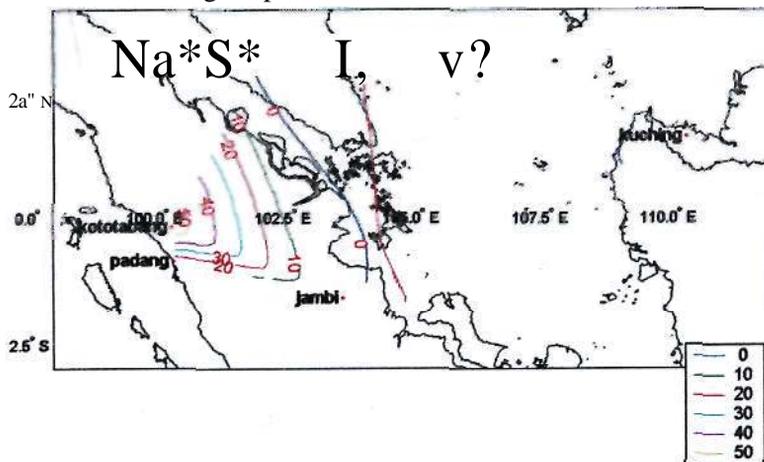
Karena analisis data dalam bentuk spasial, sehingga perlu disamakan waktu pengamatan pada setiap kota. Setelah disamakan waktu pengamatan pada seluruh kota ternyata hanya sedikit waktu pengamatan radiosonde yang sama, hanya 1-2 pengamatan setiap hari bahkan ada beberapa hari yang tidak ada pengamatan yang bersamaan. Sementara untuk validasi digunakan data *vertical accelerometer* yang merupakan alat yang mencatat gravitasi yang terjadi dan dipasang di dalam pesawat terbang.

4 HASIL

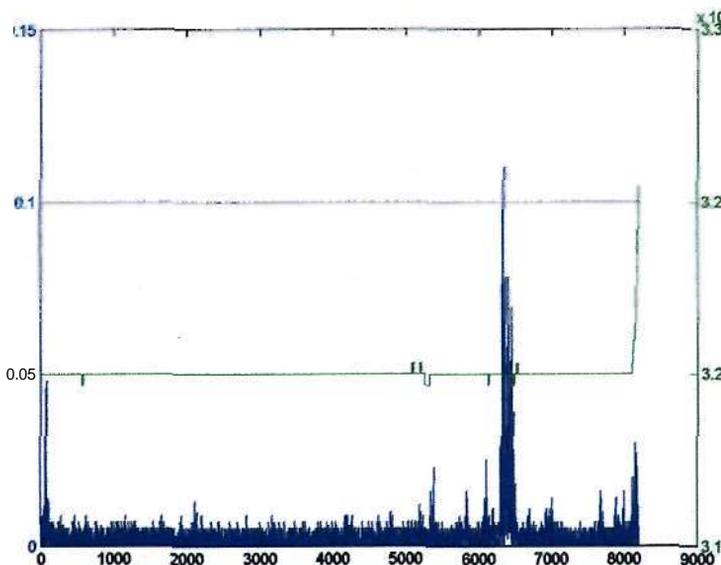
Telah banyak upaya yang dilakukan untuk mengidentifikasi turbulensi dari intensitas, ketinggian, dan penyebaran secara spasial. Di antaranya model-model identifikasi turbulensi yang telah dibuat seperti Brown-1, ITFA, CCAT, DTF3, DTF5 dll.. Penilaian model kuantitatif turbulensi dapat dikatakan baik jika di-*cross-check* dengan penilaian kualitatif. Semua model tersebut

merupakan modifikasi model stabilitas atmosfer *Richardson Number* (Ri). Menurut Mahoney dan Brown (2000) dari beberapa model turbulensi tersebut, ITFA memiliki tingkat akurasi paling tinggi dalam kuantifikasi turbulensi yang dibandingkan dengan penilaian kualitatif.

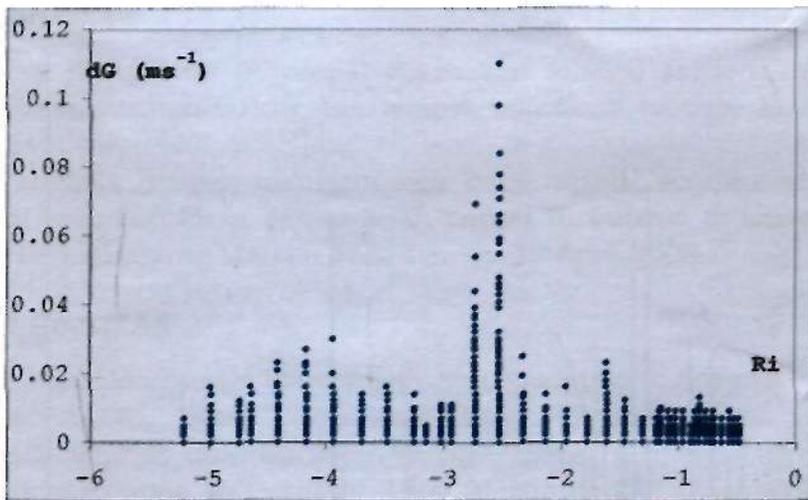
Pada 19 April 2004 pukul 07:39 - 08:15 UTC, pesawat terbang Garuda Indonesia tipe Boeing 737-300, melakukan penerbangan dengan ketinggian 9.8 km dpi. Keadaan Ri di atmosfer pada ketinggian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4-1. Menurut Keller (1981), keadaan atmosfer dengan $Ri < 0.25$ berpeluang besar terjadi turbulensi tetapi berbeda jika dibandingkan hasil yang ada. Pada Gambar 4-3, keadaan Ri yang negatif ($Ri < 0.25$) cenderung mengalami turbulensi ringan pada Ri bernilai -2 s.d -3.



Gambar 4-1: Kontur Ri dan jalur penerbangan, ketinggian 9.8 km (32000 ft) dpi



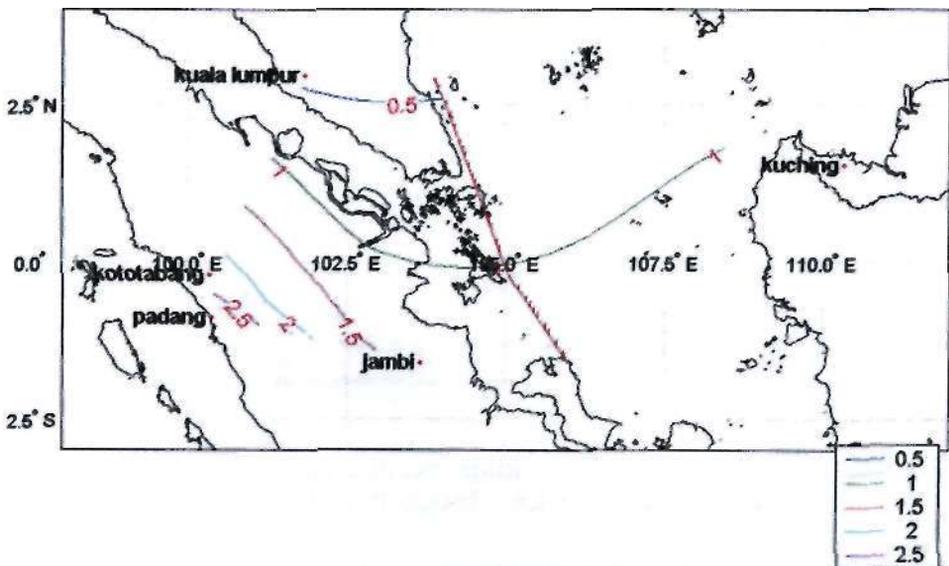
Gambar 4-2: Deret waktu ketinggian (hijau) dan perubahan gravitasi (biru) selama pesawat melakukan penerbangan



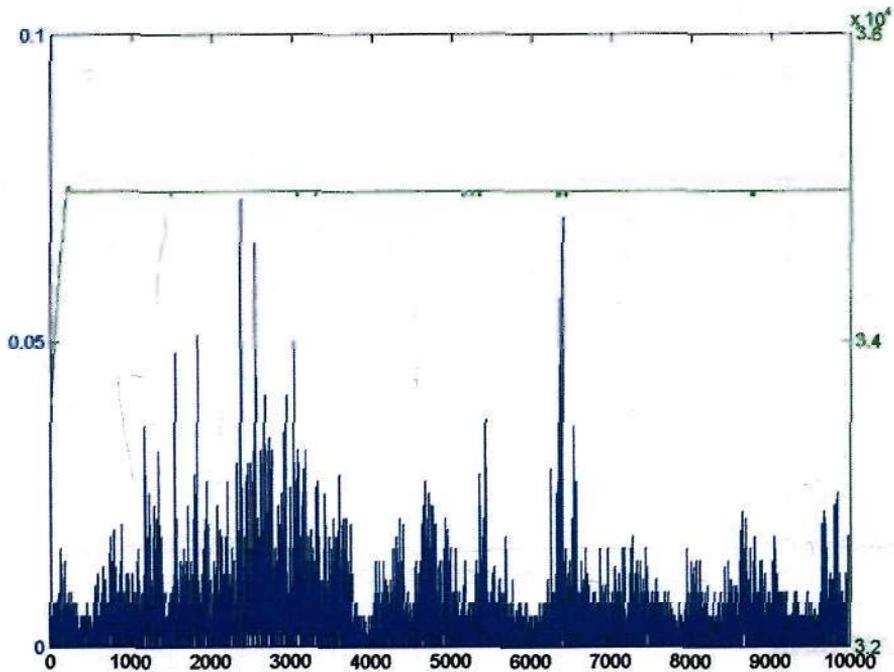
Gambar 4-3: Sebaran Ri terhadap perubahan gravitasi (dG), ketinggian 9.8 km (32000 ft) dpi

5 PEMBAHASAN

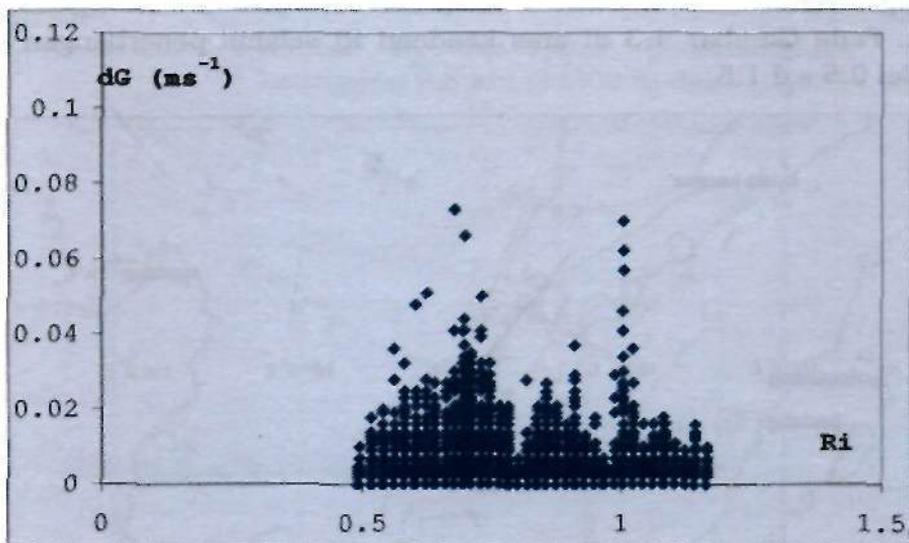
Pada 19 April 2004 pukul 11:43 - 12:25 UTC, pesawat terbang Garuda Indonesia tipe Boeing 737-300, melakukan penerbangan dengan ketinggian 10.7 km dpi. Keadaan Ri di atmosfer pada ketinggian tersebut dapat dilihat pada Gambar 5-1. Menurut Keller (1981), keadaan atmosfer dengan $Ri < 0.25$ berpeluang besar terjadi turbulensi tetapi berbeda jika dibandingkan hasil yang ada. Pada Gambar 4-3 di atas keadaan Ri selama penerbangan pada selang nilai 0.5 s.d 1.5.



Gambar 5-1: Kontur Ri dan jalur penerbangan, ketinggian 10.7 km (35000 ft) dpi



Gambar 5-2: Deret waktu ketinggian (hijau) dan perubahan gravitasi (biru) selama pesawat melakukan penerbangan



Gambar 5-3: Sebaran Ri terhadap perubahan gravitasi (dG), ketinggian 10.7 km (35000 ft) dpi

Hasil model cenderung menyimpang dari data validasi. Penyebab utama dari penyimpangan ini adalah titik pengamatan yang kurang mewakili luas daerah kajian.

- Bilangan Richardson (Ri) dapat digunakan sebagai salah satu parameter untuk menentukan waktu dan tempat terjadinya turbulensi, yakni pada saat $Ri < 1$.
- Hasil analisis dengan menggunakan data *vertical accelerometer* sebagai validasi, menunjukkan bahwa telah terjadi turbulensi di kawasan Pantai Timur Semenanjung Malaka pada tanggal 19 April 2004.

DAFTAR RUJUKAN

- Anonim, 2000. *Microscale Meteorology and atmospheric Hazards*.
- Blackadar A. K., 2000. *Turbulence and Diffusion in the Atmosphere*. Philadelphia, USA: Springer-Verlag.
- Handbook of Aviation Meteorology, 1980. Meteorological Office - Her Majesty's Stationery Office: London.
- Keller J. L., 1981. *Prediction and Monitoring of Clear-Air Turbulence: An Evaluation of the Applicability of the Rawinsonde System*. *J. appl. meteor*, 20, 686 - 692.
- Kronebach G. W., 1964. *An Automated Procedure for Forecasting Clear-Air Turbulence*. *J. appl. meteor*, 3, 119 - 125.
- Mahoney L., dan Brown Barbara, 2000. *Forecaster Assessment of Turbulence Algorithm: A Summary of Results for the winter 2000 Study*. FAA Aviation Weather Research Program Turbulence Product Development Team: Federal Aviation Administration.
- Saucier W. J., 1955. *Principles Of Meteorological Society*. University of Chicago Press: Chicago.
- Soejitno Ah.M.G., dan Soeharsono Ah.M.G., 1975. *Meteorologi Penerbangan*. Unit Pendidikan dan Latihan Akademi Meteorologi dan Geofisika: Jakarta.