

# ANALISIS STABILITAS ATMOSFER PADA LAPISAN TROPOSFER ATAS DAN STRATOSFER BAWAH DI ATAS KOTOTABANG MENGGUNAKAN DATA *EQUATORIAL ATMOSPHERE RADAR (EAR)*, *BOUNDARY LAYER RADAR (BLR)* DAN RADIOSONDE

Eddy Hermawan<sup>1</sup>, Sri Haruti Soeparmo<sup>2</sup>, dan FMa Aulifin Kemlrah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pone lit! l'usai Pen- a n Uja n Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN

<sup>2</sup> Per.eliti Departement GeoBslka dan Mc.coro'ogi ITB, Bandung  
[eddy@bdg.lapan.go.id](mailto:eddy@bdg.lapan.go.id)

## ABSTRACT

This paper is mainly concerned to the analysis of atmospheric stability especially near the tropopause layer as well as the variation on wet and dry seasons over Kototabang area, West Sumatera (0.2°S;100.32°E) using *Equatorial Atmosphere Radar (EAR)*, *Boundary Layer Radar (BLR)* and radiosonde data. The Observation of atmosphere stability nearby the tropopause layer is very important, considering its function as a buffer of an air masses exchanges from troposphere to stratosphere layer and so the contrary, which is usually called as *Stratosphere - Troposphere Exchange (STE)*. Data analysis divide in two stages, firstly is the short periode data analysis from April, 10th until May, 9th of 2004 with the main purpose of validation between vertical echo power (VEP) from EAR and *Brunt-V&isala Frequency Squared (N<sup>2</sup>)* from radiosondes. The result shows that the average of correlation coefficient from 9 observations is 0.81. This point shows EAR's ability to replace radiosondes data to inform atmosphere stability. The second stages, contain the long periode data analysis from June and November in the years of 2001 until 2004. Both month representing dry and wet seasons based on monthly *Global Precipitation Climatology Project (GPCP)* data over 25 years (1979-2004) observations in Sumatera Island area, specifically for Kototabang. Final result shows that the tropopause height variation in dry season (November) is easier to identify. In the other side, zonal wind dominant on November compare to vertical wind on July. This situation probably because the strong monsoonal effect in wet seasons. The tropopause height is also estimate have no significant effect to rain intensity.

## ABSTRAK

Makalah ini perhatian utamanya ditujukan kepada analisis terhadap stabilitas atmosfer, khususnya disekitar lapisan tropopause, serta bagaimana variasi perubahannya pada bulan basah dan bulan kering di atas

Kototabang, Sumatera Barat (0.2° LS; 100.32° BT) dengan menggunakan data *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR), *Boundary Layer Radar* (BLR) dan radiosonde. Pengamatan terhadap stabilitas lapisan tropopause penting dilakukan, mengingat lapisan ini merupakan lapisan penyangga dari terjadinya pertukaran massa udara secara vertikal termasuk gas-gas polutan dari lapisan troposfer ke lapisan stratosfer dan juga sebaliknya yang dikenal dengan istilah *Stratosphere-Troposphere Exchange* (STE). Analisis data dibagi menjadi dua tahap, yaitu analisis data jangka pendek dengan periode waktu mulai 10 April - 9 Mei 2004, yakni pada saat berlangsungnya kegiatan *Coupling Process Equatorial Atmosphere* (CPEA) yang dilakukan untuk memvalidasi parameter *vertical echo power* (VEP) dari data EAR dan nilai *Brunt-Vaisala Frequency Squared* ( $N^2$ ) dari data radiosonde. Hasil menunjukkan koefisien korelasi rata-rata dari 9 kali pengamatan sebesar 0,81. Ini ditujukan untuk mengetahui sejauh mana EAR mampu menggantikan radiosonde dalam menginformasikan stabilitas atmosfer. Setelah itu analisis dilanjutkan ke tahap jangka panjang, yaitu bulan Juli dan November periode tahun 2001-2004 yang dianggap mewakili bulan kering dan bulan basah berdasarkan data *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) bulanan selama 25 tahun pengamatan (1979-2004) untuk kawasan Pulau Sumatera dan sekitarnya, khususnya untuk daerah Kototabang. Hasilnya menunjukkan bahwa variasi tinggi rendahnya lapisan tropopause pada bulan basah (November) relatif lebih mudah diidentifikasi dibandingkan bulan kering, sedangkan angin zonal (November) relatif lebih dominan dibandingkan angin vertikal pada bulan Juli. Hal ini diduga akibat pengaruh monsun yang kuat pada musim basah. Selain itu ditemukan juga bahwa tinggi rendahnya lapisan tropopause tidak mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap intensitas curah hujan.

Katakunci: *Stabilitas atmosfer, Tropopause, EAR, Stratospher-Troposphere Exchange*

## 1 PENDAHULUAN

Indonesia diyakini memiliki peranan yang besar terhadap perubahan iklim global, jadi tidaklah mengherankan jika kini menjadi pusat perhatian para peneliti atmosfer dunia. Salah satunya adalah dengan dibangunnya *Equatorial Atmosphere Radar* (EAR) di Kototabang, Sumatera Barat (0.20LS; 100.320BT dengan ketinggian sekitar 865 m dpi), yang merupakan hasil kerjasama riset antara Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) dengan *Research Institute for Sustainable Humanosphere* (RISH), Universitas Kyoto, Jepang.

Hasil kajian peneliti sebelumnya Hermawan dkk (1998) menyatakan bahwa stabilitas (statis) atmosfer dapat diturunkan dengan besaran *Brunt Vaisala Frequency Squared* ( $N^2$ ) yang sebanding dengan *Vertical Echo Power* (VEP) terutama di sekitar lapisan tropopause. Oleh karena itu, dilakukanlah

analisis stabilitas atmosfer pada lapisan troposfer atas dan stratosfer bawah, terutama di sekitar lapisan tropopause yang perhatian utama akan ditujukan pada: (1) validasi data EAR, khususnya parameter *vertikal echo power* dengan besaran *Brunt Vaisala Frequency Squared* ( $N^2$ ) hasil penurunan dari data radiosonde periode 10 April - 9 Mei 2004 saat kegiatan *Coupling Processes Equatorial Atmosphere* (CPEA) berlangsung dan (2) analisis stabilitas atmosfer di sekitar lapisan tropopause hasil observasi data *vertikal echo power* tadi untuk pengamatan jangka panjang, pada musim basah dan musim kering periode tahun 2001 sampai 2004, yang akan ditentukan berdasarkan data *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) selama 25 tahun pengamatan (1979-2004).

Studi stabilitas atmosfer di lapisan sekitar tropopause penting karena berkaitan dengan adanya pergerakan massa udara secara vertikal yang bisa menyebabkan terjadinya pertukaran massa udara (termasuk gas-gas polutan) antara lapisan troposfer dan stratosfer yang dikenal dengan istilah *Stratosphere-Troposphere Exchange* (Holton, 1997).

## 2 DATA

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data EAR yang berupa data *Vertical Echo Power* (VEP) dan data angin, periode 10 April - 9 Mei 2004 untuk analisis data jangka pendek dan periode Juli 2001-2004 dan November 2001-2004 yang mewakili bulan kering maksimum dan bulan basah maksimum sepanjang tahun (berdasarkan data GPCP), untuk analisis data jangka panjang, dengan lokasi pengamatan di Stasiun Pengamat Dirgantara (SPD) Kototabang. Karakteristik data yang dipakai berbentuk binary dan ASCII. Data EAR selengkapnya diperoleh dari LAPAN-Bandung.

Data radiosonde, meliputi data temperatur, tekanan dan kelembaban yang diambil dari hasil pengamatan pada kegiatan *Coupling Process Equatorial Atmosphere* (CPEA) yang dilakukan oleh tim CPEA Jepang di bawah koordinasi *Research Institute for Sustainable Humanosphere* (RISH), Universitas Kyoto, Jepang pada periode 10 April - 9 Mei 2004. Data dalam bentuk ASCII, diperoleh dari <http://rslab.riko.shimane-u.ac.jp/CPEA/campaign/sonde/data.html>.

Data BLR yang berupa data *Vertical Echo Power* (VEP) dan data angin dengan periode yang sama dengan EAR. Karakteristik data yang dipakai berbentuk binary. Data BLR selengkapnya diperoleh dari LAPAN-Bandung.

Data *Global Precipitation Climate Project* (GPCP) yang merupakan data intensitas curah hujan secara global periode Januari 1979 - November 2004. Bentuk datanya berupa kontur intensitas curah hujan rata-rata bulanan yang diperoleh dari <http://cics.umd.edu/--vin/GPCP/main.html>.

Data MAWS [*Mini Automatic Weather Station*) dan ORG [*Optical Rain Gauge*) dengan periode yang sama dengan data EAR. Bentuk datanya ASCII, diperoleh dari Universitas Shimane, Jepang.

### 3 TEORI

Hasil kajian mengenai stabilitas atmosfer oleh Hermawan,dkk (1998) menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara *Brunt Väisälä Frequency Squared* ( $N^2$ ) dengan  $\log P_v$  (*Vertical Echo Power*) dan juga  $P_v/P_0$  (vertikal relatif terhadap *oblique echo power*) yang dikenal dengan istilah *aspect sensitivity*. Nilai  $N^2$  diperoleh dari penurunan data radiosonde sementara  $P_v$  dari data EAR. Ada 2 teori dasar yang dapat digunakan menjelaskan hubungan antara  $N^2$  dengan vertikal *echo power*.

#### 3.1 *Isotropic Turbulent Scattering (ITS)*

Persamaan radar untuk *Isotropic Turbulent Scattering* adalah :

$$P_s = \frac{\pi}{64} \frac{P_t A_t \Delta r}{r^2} \eta_{turb} \quad (3-1)$$

Menghasilkan suatu persamaan sebagai berikut :

$$\eta_{turb} = 0.38 \lambda^{-1/3} C_n^2 \quad (3-2)$$

$$C_n^2 = 2.8 L_0^{4/3} M^2 \quad (3-3)$$

$$L_0^{4/3} = 0.25 \varepsilon^{2/3} N^2 \quad (3-4)$$

dengan

$\eta_{turb}$  adalah *The radar reflectivity* untuk *backscattering*

$\lambda$  adalah Panjang gelombang Radar

$C_n^2$  adalah Konstanta Struktur refraktivitas turbulen

$L_0$  adalah Skala *Outer*

$M$  adalah *Vertical gradient* dari pada *potential refractive index*

$\varepsilon$  adalah konstanta  $\sim 2.78$

$N$  adalah *Brunt Väisälä Frequency*

Dengan membandingkan persamaan-persamaan di atas, maka diperoleh :

$$\begin{aligned} \eta_{turb} &\propto 1,064 \lambda^{-\frac{1}{3}} \left[ \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \cdot N^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{4}{3}} \cdot M^2 \\ &\propto 1,064 \lambda^{-\frac{1}{3}} \varepsilon^{-\frac{1}{3}} \cdot N^{-2} \cdot M^2 \\ &\propto 1,064 N^{-2} \cdot M^2 \end{aligned} \quad (3-5)$$

untuk “didekat lapisan tropopause”  $\eta_{turb}$  sebanding dengan *Oblique Echo Power*,  $P_0$  (dB) :

$$\begin{aligned}
 P_0 &\propto \eta_{turb} \approx N^{-2} M^2 \\
 &\propto N^{-2} M^2 \\
 &\propto N^{-2}
 \end{aligned}
 \tag{3-6}$$

### 3.2 Specular Reflection (SR)

Persamaan radar untuk *specular reflection* :

$$P_r = \frac{P_t A_e^2}{4\lambda^2 r^2} \eta_{ref}
 \tag{3-7}$$

Dalam hal ini didefinisikan sebagai :

$$\eta_{ref} = CM^2 E(2k)
 \tag{3-8}$$

$$M = -77,6 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \left[ \frac{N}{g} + 15500 + \frac{q}{T} \left( \frac{N}{g} - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \theta}{\partial z} \right) \right]
 \tag{3-9}$$

$$\frac{P}{T} \propto \rho
 \tag{3-10}$$

$$\frac{\partial \ln \theta}{\partial z} = \frac{N^2}{g}$$

$$M \propto N^2 \rightarrow \text{konstan atau } M^2 \propto N^4
 \tag{3-11}$$

dengan

$\eta_{ref}$  adalah *Radar reflectivity* untuk *specular reflection* (*reflection coefficient*)

C adalah Konstanta

E(2k) adalah Fluktuasi intensitas dengan skala vertikal setengah dari panjang gelombang radio

P adalah Tekanan (mb)

T adalah Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

g adalah Percepatan gravitasi  $\sim 9,8 \text{ m/s}^2$

q adalah Kelembaban spesifik

$\theta$  adalah Temperatur potensial

Dengan membandingkan persamaan-persamaan di atas diperoleh

$$\eta_{ref} \propto M^2 \propto N^4
 \tag{3-12}$$

untuk "didekat lapisan tropopause"  $\eta_{ref} = P_v = \text{Vertical Echo Power (dB)}$

$$P_v \propto \eta_{ref} \propto M^2 \propto N^4 \quad (3-13)$$

$$P_v \propto N^4 \text{ dan } P_0 \propto N^2$$

Dan *Echo Power Ratio (EPR)* didefinisikan sebagai :  $P_v/P_0$

$$\frac{P_v}{P_0} \propto \frac{N^4}{N^2} \propto N^2 \quad \text{atau} \quad N^2 \propto \frac{P_v}{P_0} \quad (3-14)$$

dengan

$N^2$  adalah didapat dari data Radiosonde

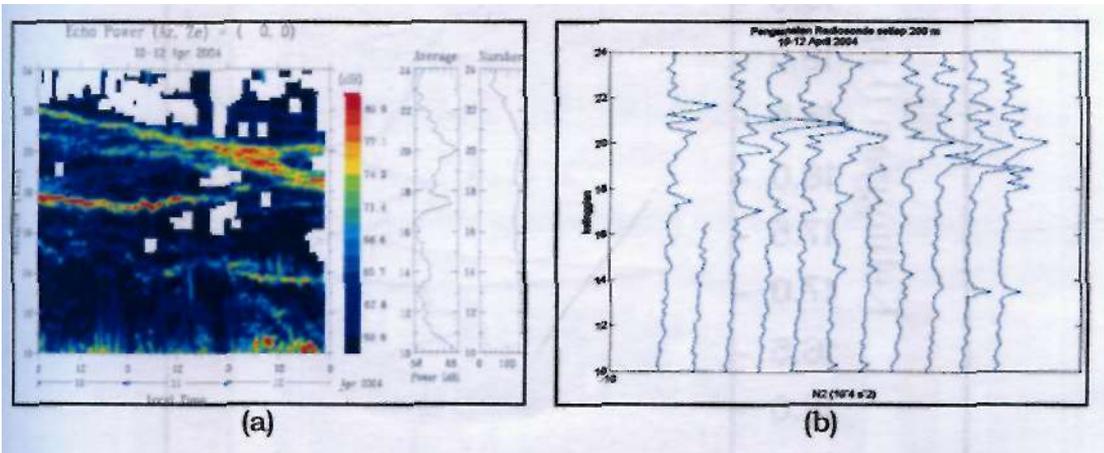
$P_v/P_0$  adalah didapat dari data Radar

Hasil akhir menunjukkan bahwa  $P_v \ll N^2$  terutama di sekitar lapisan tropopause, yang mana akan dijadikan dasar analisis data EAR dan data radiosonde.

## 4 HASIL

### 4.1 Validasi Antara *Vertical Echo Power* dan *Brunt Vaisala Frequency Squared (HP)*

Pengolahan data untuk validasi diawali dengan membuat profil kedua parameter, yang dibuat per 3 harian. Salah satunya, yaitu pada Gambar 4-1 yang merupakan profil kedua data pada tanggal 10-12 April 2004.



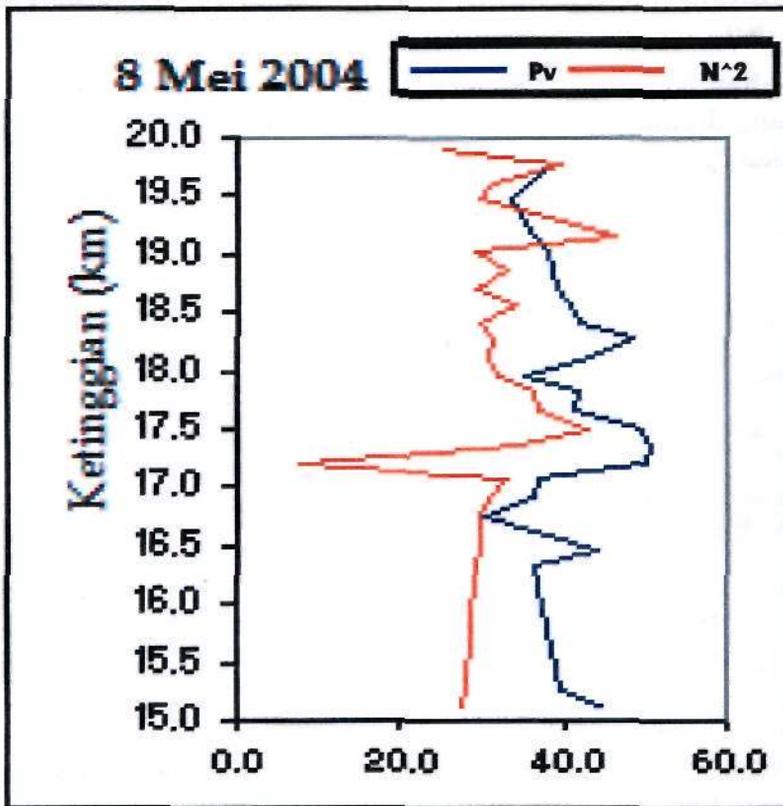
Gambar 4-1: (a) Profil VEP dari data EAR dan (b) Profil N2 dari data radiosonde

Seperti terlihat pada Gambar 4-1 secara kasat mata terlihat bahwa pola profil *Vertical Echo Power (VEP)* yang dihasilkan EAR sebanding dengan nilai  $N^2$  (*Brunt Vaisala Frequency Squared*) yang diturunkan dari data radiosonde dengan koefisien korelasi seperti pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1: NILAI KORELASI ANTARA VEP DAN  $N^2$  PE RIODE 10 APRIL - 9 MEI 2004

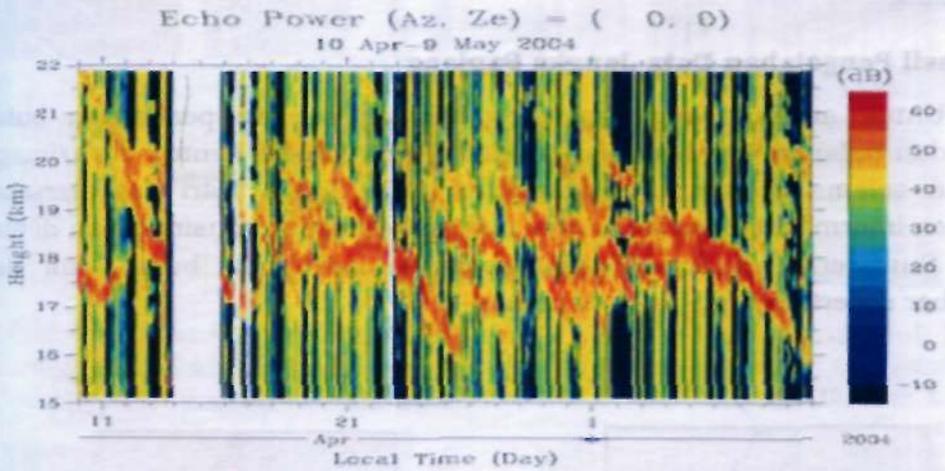
Rata-Rata Nilai Korelasi Antara $N^*$ dan VEP Pengamatan pada jam 00:00		
Tanggal	Ketinggian (km)	Nilai Korelasi
10-Apr-04	17.5-18.1	0.83
12-Apr-04	17.5-18.1	0.62
27-Apr-04	17.1-18.0	0.82
30-Apr-04	17.1-17.8	0.70
2-Mei -04	16.0-17.2	0.91
3-Mei -04	17.5-18.3	0.97
4-Mei-04	17.1-18.3	0.62
8-Mei-04	17.5-18.0	0.99
9-Mei-04	17.2-18.3	0.80
Nilai Korelasi Rata-Rata		0.81

Khusus untuk peluncuran tanggal 8 Mei 2004, kedua profil yang nilai korelasinya 0.99 seperti pada Gambar 4-2

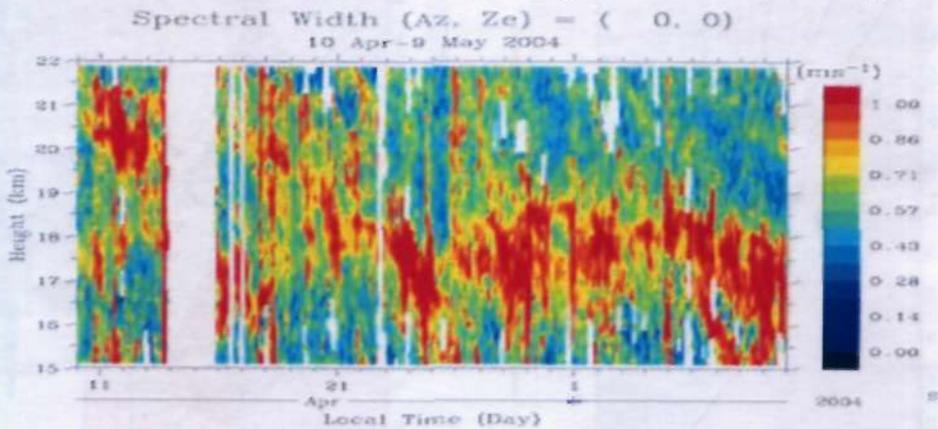


Gambar 4-2: Perbandingan antara VEP dan  $N^2$  8 Mei 2004 dengan nilai korelasi 0,99

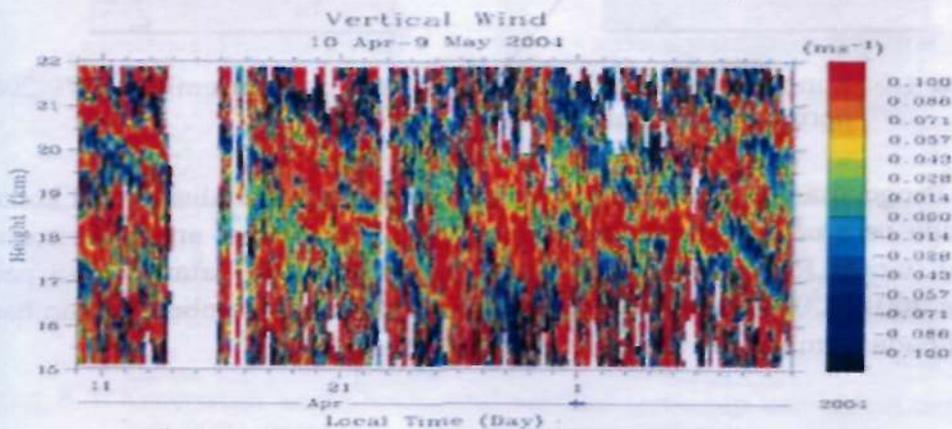
Untuk melihat kekonsistenan dari data EAR, maka dibuatlah profil kontur dari data *spectral width* dan data *vertical wind* selama periode 10 April-9 Mei 2004, seperti Gambar 4-3, Gambar 4-4, dan Gambar 4-5.



Gambar 4-3: Profil kontur *vertical echo power* terhadap ketinggian



Gambar 4-4: Profil kontur *spectral width* terhadap ketinggian



Gambar 4-5: Profil kontur *vertical wind* terhadap ketinggian

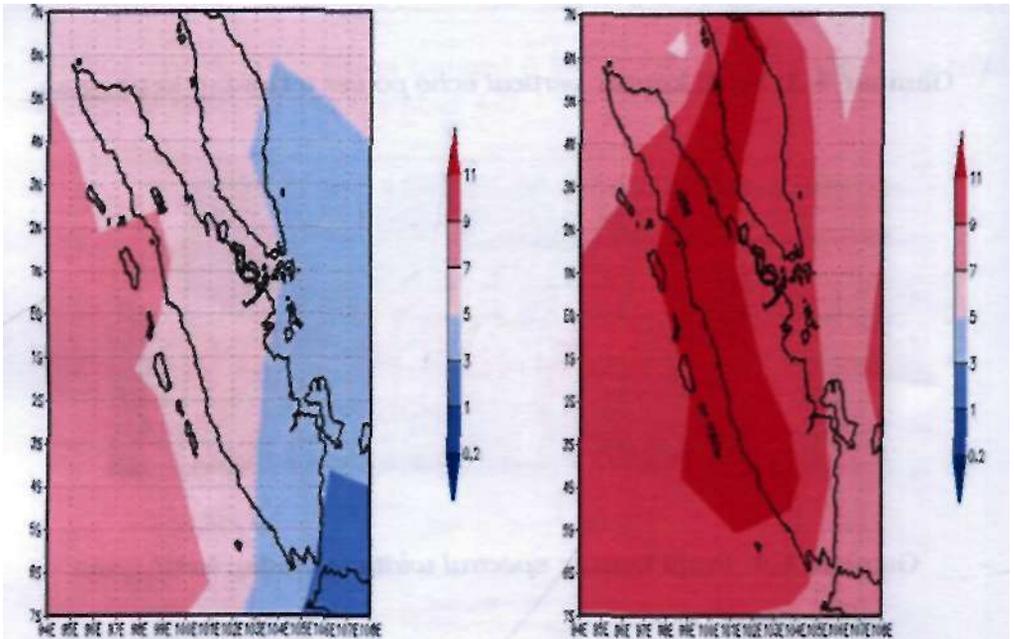
Dari ketiga gambar tersebut di atas terlihat bahwa baik data *vertical echo power*, *spectral width* dan juga vertikal angin menunjukkan pola yang sama dalam mengidentifikasi terjadinya perubahan struktur lapisan tropopause

## 4.2 Hasil Pengolahan Data Jangka Panjang

Untuk analisis jangka panjang, diawali dengan penentuan bulan basah dan bulan kering berdasarkan data GPCP (dalam bentuk citra/image) bulanan selama 25 tahun pengamatan (1979-2004). Dari data tersebut diperoleh informasi bahwa terjadinya musim kering dan musim hujan di atas Pulau Sumatera, khususnya Kototabang terjadi pada bulan Juli dan November seperti terlihat pada Gambar 4-6.

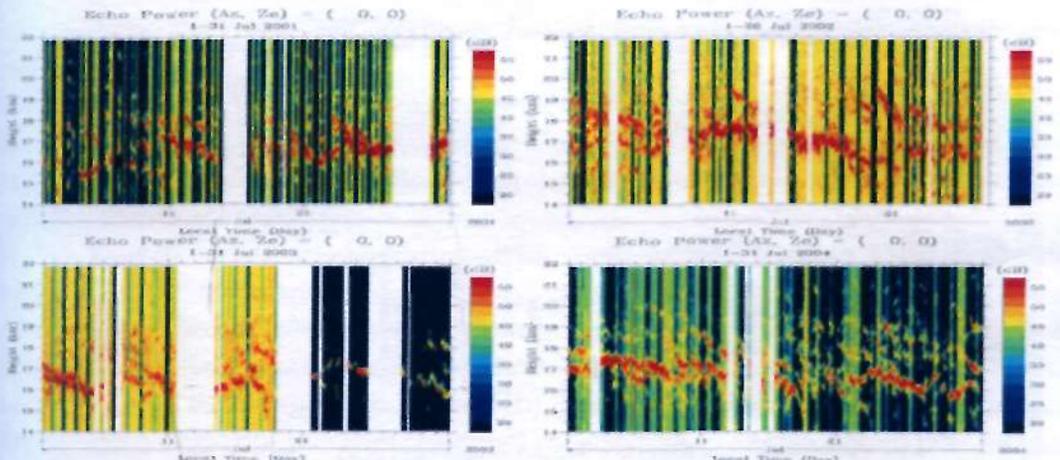
GPCP Monthly Mean Precipitation Rate (mm/day)  
Calendar month JUL Average of 1979—2004

GPCP Monthly Mean Precipitation Rate (mm/day)  
Calendar month NOV Average of 1979—2004

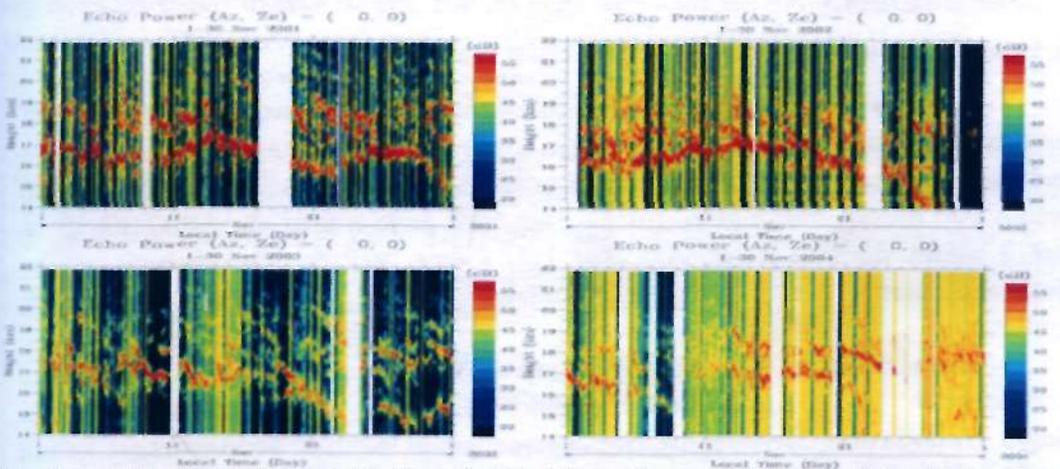


Gambar 4-6: Kontur intensitas curah hujan Juli dan November 1979-2004 berdasarkan data GPCP

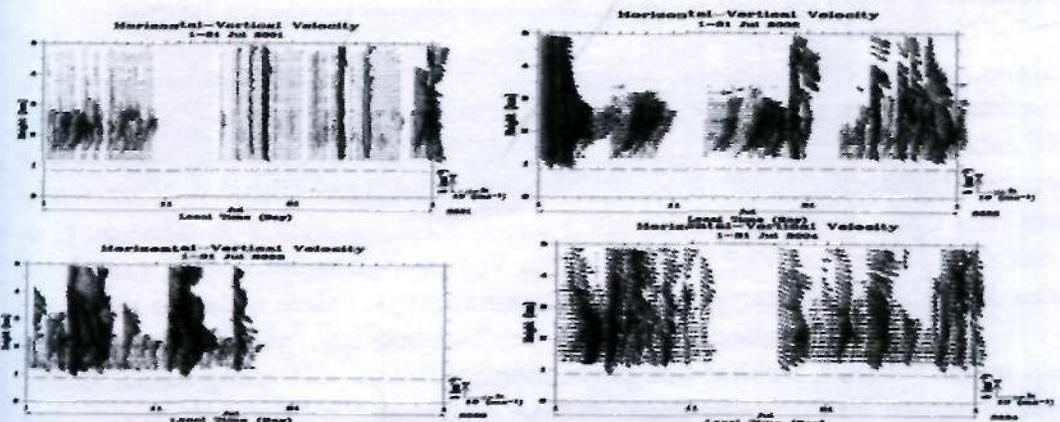
Pengolahan kemudian dilanjutkan dengan menganalisis profil kontur dari pada *vertical echo power*, *zonal wind* dari EAR, vektor angin horizontal-vertikal dari BLR dan intensitas curah hujan dari ORG atau MAWS pada periode 2001-2004, khususnya pada bulan Juli dan November dengan hasil seperti pada Gambar 4-7 sampai dengan Gambar 4-10.



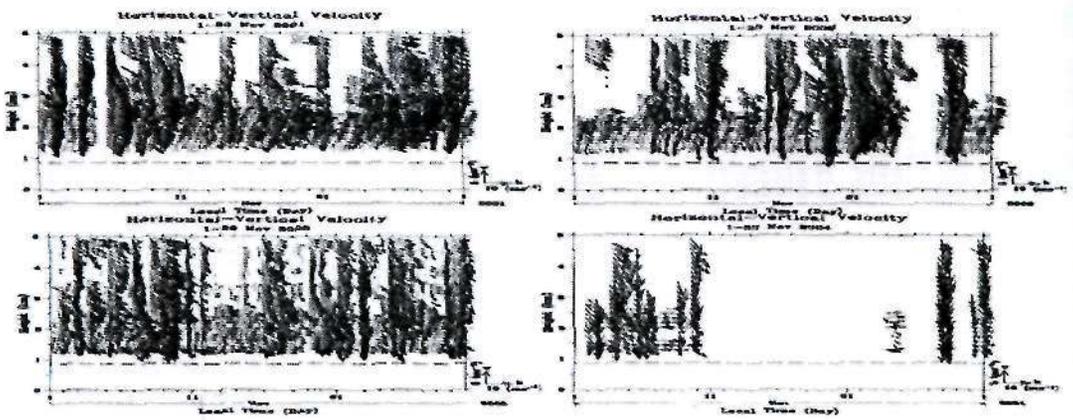
Gambar 4-7: Time Height Section Vertical Echo Power-EAR periode Juli 2001-2004



Gambar 4-8: Time Height Section Vertical Echo Power-EAR periode November 2001-2004



Gambar 4-9: Kecepatan angin horizontal-vertikal terhadap ketinggian periode Juli 2001-2004



Gambar4-10: Kecepatan angin horizontal-vertikal terhadap ketinggian periode November 2001-2004

## 5 PEMBAHASAN

### 5.1 Analisis Jangka Pendek (10 April-9 Mei 2004)

Analisis data jangka pendek ditekankan pada masalah validasi data *vertical echo power* dari EAR dengan data  $N^2$  dari data radiosonde. Data radiosonde yang dipakai mempunyai orde waktu 6 jam-an dengan ketinggian setiap 100 meter. Sedangkan untuk data EAR orde waktu yang diambil, yaitu per 3 menit dengan ketinggian per 150 meter, untuk disesuaikan dengan data radiosonde maka kedua parameter diset dengan ketinggian tiap 200 meter.

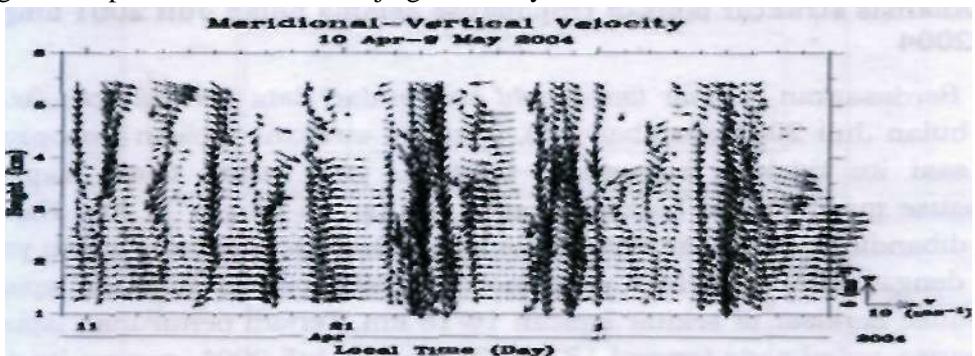
Pada Gambar 4-1 diperlihatkan kedua profil  $N^2$  dan VEP periode pengamatan 10-12 April 2004 memiliki pola yang sama dalam penentuan tinggi tropopause. Ketinggian tropopause yang terlihat berdasarkan kedua profil yaitu pada ketinggian mulai 17-18,5 km. Pada ketinggian 22 km juga terjadi perubahan drastis dari pada kedua profil, namun belum bisa dikatakan sebagai lapisan tropopause.

Data *vertical echo power*, dinyatakan dalam besaran dB (decibel). Oleh karena itu nilai  $N^2$  dikonversi menjadi besaran  $10\log_{10}(N^2)$ . Analisis tersebut, diperkuat dengan membuat analisis statistiknya, diperoleh koefisien korelasi ( $R^2$ ) rata-rata sebesar 0.72. Sedangkan, nilai koefisien korelasi selama 10 kali pengamatan secara acak periode 10 April- 9 Mei 2004 (Tabel 4-1) mencapai rata-rata 0.81, dengan nilai berkisar dari 0,62-0,99. Jadi bila dibandingkan hasil dari parameter VEP dan  $N^2$ , maka VEP menghasilkan profil yang lebih jelas dan lebih rapat karena waktu pengamatannya dalam orde per menit.

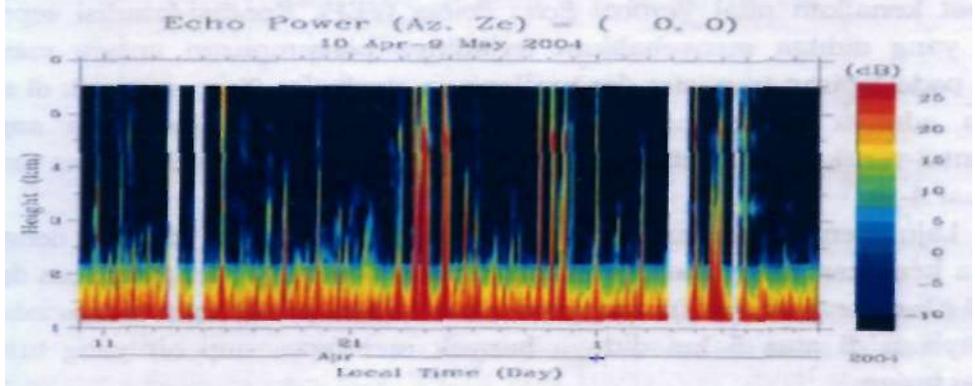
Selain itu, disajikan pula data pembanding lain, yakni *spectral width* dan angin vertikal, terlihat ketiganya menunjukkan pola yang sama. Hal ini berarti bahwa *Vertical Echo Power* (VEP) EAR dapat dijadikan referensi (bahan acuan) dalam penentuan tinggi tropopause seperti pada Gambar 4-3 sampai Gambar 4-5.

Pada Gambar 4-3 terlihat bahwa ketinggian lapisan tropopause berubah terhadap waktu. Penurunan ketinggian lapisan tropopause mencapai ketinggian 16 km pada sekitar tanggal 21-25 April dan 7-9 Mei 2004. Hal ini juga ditunjukkan oleh profil angin vertikal, yang mana pada tanggal-tanggal tersebut nilai kecepatan angin vertikal maksimum yang direpresentasikan dengan warna merah.

Seperti telah dijelaskan bahwa pengamatan utama dilakukan di sekitar lapisan tropopause, sehingga pengamatan difokuskan pada ketinggian 15-24 km, namun tentunya apa yang teramati pada ketinggian tersebut mempunyai keterkaitan dengan keadaan atmosfer di lapisan troposfer bawah, atau tepatnya dibawah 6 km. Untuk itu diolah juga data VEP dan data angin berdasarkan pemantauan BLR, hasilnya menunjukkan ketika terjadi penurunan ketinggian lapisan tropopause tanggal 21-25 april 2004 dan 7-9 Mei 2004, berdasarkan vektor angin dari BLR menyatakan bahwa pada saat tersebut terjadi penurunan massa udara, hal ini juga bersesuaian dengan nilai VEP-nya, yang mana pada saat tersebut juga nilainya maksimum.



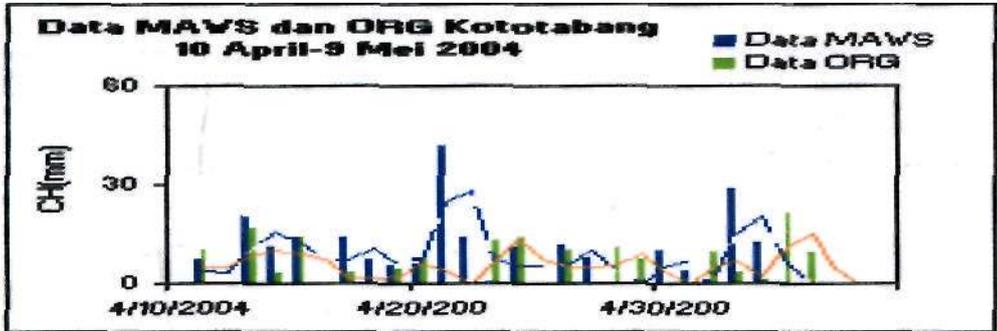
Gambar 5-1: Kecepatan angin terhadap ketinggian



Gambar 5-2: Time height section vertical echo power

Berdasarkan data ORG dan MAWS, intensitas curah hujan yang tercatat khususnya pada tanggal 21-25 April 2004 dan 7-9 Mei 2004 juga meningkat, seiring dengan terjadinya penurunan lapisan tropopause yang

ditemukan pada data EAR dan BLR. Kedua data MAWS dan ORG mungkin tidak memberikan nilai yang sama, tetapi rata-rata dari keduanya menunjukkan fluktuasi yang sama, hal ini dapat dilihat pada Gambar 5-3.



Gambar 5-3: Intensitas curah hujan 10 April-9 Mei 2004

## 5.2 Analisis Jangka Panjang (2001-2004)

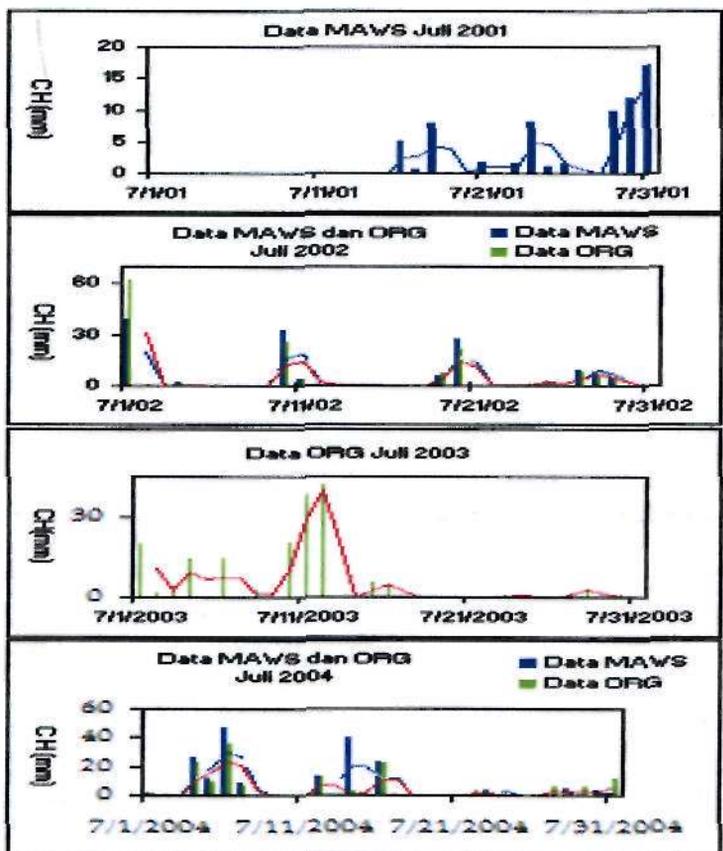
### 5.2.1 Analisis struktur lapisan tropopause selama bulan Juli 2001 hingga 2004

Berdasarkan gambar *time-height section* dari data *Vertical Echo Power* (VEP) bulan Juli 2001 (Gambar 4-2), ternyata struktur lapisan tropopause pada saat itu tidaklah mengalami fluktuasi yang relatif tajam. Lapisan tropopause masih dalam batasan normal sekitar 15 hingga 17 km. Hal ini dapat dibandingkan dengan data angin zonal (Gambar 5-4) pada waktu yang sama dengan data VEP tadi yang menunjukkan bahwa struktur lapisan tropopause berkisar di sekitar lapisan 16-18 km. Terjadi penurunan lapisan tropopause, yakni pada tanggal 18, 25, 27 dan 31 Juli 2001, namun itu pun tidaklah terlalu signifikan perubahannya. Pada tanggal 3 Juli 2001 tidak terdapat kenaikan nilai *Vertical Echo Power* (VEP). Kondisi-kondisi seperti inilah yang diduga menyebabkan terjadinya percampuran antara massa udara pada lapisan troposfer dengan lapisan stratosfer. Yang menarik di sini adalah adanya konsistensi data antara VEP EAR dengan data angin horizontal-vertikal BLR untuk lapisan 1 hingga 5 km pada waktu yang sama (Gambar 4-9).

Laju penurunan massa udara tersebut, ternyata diikuti dengan adanya kenaikan intensitas curah hujan hasil observasi menggunakan data MAWS (Gambar 5-4). Hal ini mencerminkan bahwa penurunan massa udara dari lapisan di atas 5 km diduga banyak membawa uap air yang turun sebagai hujan.

Pada bulan Juli 2002, kondisinya hampir sama dengan Juli 2001 yakni dengan laju perubahan tinggi tropopause yang relatif stabil. Tidak ada perubahan yang drastis sifatnya, kecuali menjelang tanggal 21 Juli 2002, tepatnya sekitar tanggal 19 Juli 2002. Dari hasil yang diperoleh bahwa memang terjadi penurunan massa udara yang cukup signifikan (Gambar 4-2)

yang mana hal ini juga diikuti pada tanggal 26 Juli 2002. Hal yang berbeda dengan tahun sebelumnya (walaupun sama-sama pada bulan Juli) adalah penurunan massa udara tadi tidak diikuti dengan kenaikan intensitas curah hujan, walaupun ada nilainya relatif kecil, yakni sekitar 10 mm (Gambar 5-4). Pada tanggal 2 Juli 2002, tidak terdapat kenaikan nilai VEP, namun pada hari berikutnya, lapisan tropopause sangat rapat mulai dari ketinggian 17-18,5 km sehingga diduga tidak adanya lapisan tropopause pada tanggal 2 Juli tidak menyebabkan pencampuran massa udara antara lapisan troposfer dengan stratosfer.

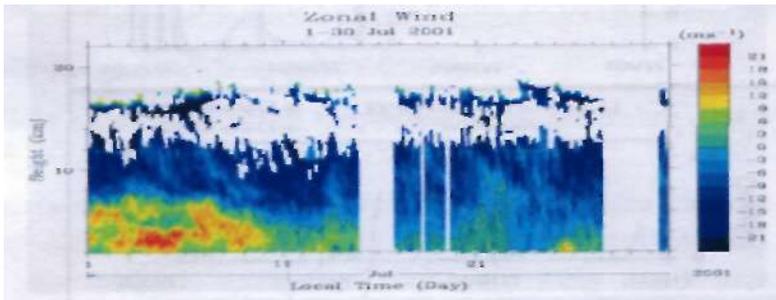


Gambar 5-4: Intensitas curah hujan Juli 2001-2004

Pada bulan Juli 2003, kondisi ini agak sulit ditentukan perubahan struktur dan tinggi tropopausenya. Terdapat banyak data yang tidak terukur (*missing data*) pada tanggal 5-7, 12-14 dan 19-21 Juli 2003. Walaupun ada masih sukar untuk dijelaskan dengan adanya perubahan warna yang sangat mendadak dari kuning ke biru. Walaupun kelihatannya masih dalam batasan normal, namun diduga terjadi perubahan tinggi tropopause, terutama mulai tanggal 5-7 Juli 2003 yang dilanjutkan mulai tanggal 12-14 Juli 2003 karena pada saat itu berdasarkan pengamatan BLR, kecepatan angin vertikal

menunjukkan penurunan. Keadaan ini juga disertai dengan kenaikan intensitas curah hujan yang dihasilkan data ORG juga mencapai nilai maksimum sekitar 45 mm. Hal ini dapat memberi gambaran bahwa walaupun pada bulan Juli, curah hujan tetap saja ada bahkan bisa mencapai nilai di atas 40 mm/hari.

Pada bulan Juli 2004, terlihat dengan jelas bagaimana lapisan tropopause berfluktuasi terhadap waktu selama periode 1-31 Juli 2004 (Gambar 4-2), yang mana hal ini tidak terlihat jelas justru dari kecepatan angin zonal yang sementara ini digunakan sebagai pembandingnya. Ada satu kesamaan dengan data sebelumnya seperti yang terjadi pada bulan Juli 2002, yakni walaupun terjadi penurunan tinggi lapisan tropopause hingga 14 km pada tanggal 19 Juli 2004, namun justru intensitas curah hujan yang dihasilkannya 0 mm.



Gambar 5-5: Kecepatan angin zonal periode Juli 2004

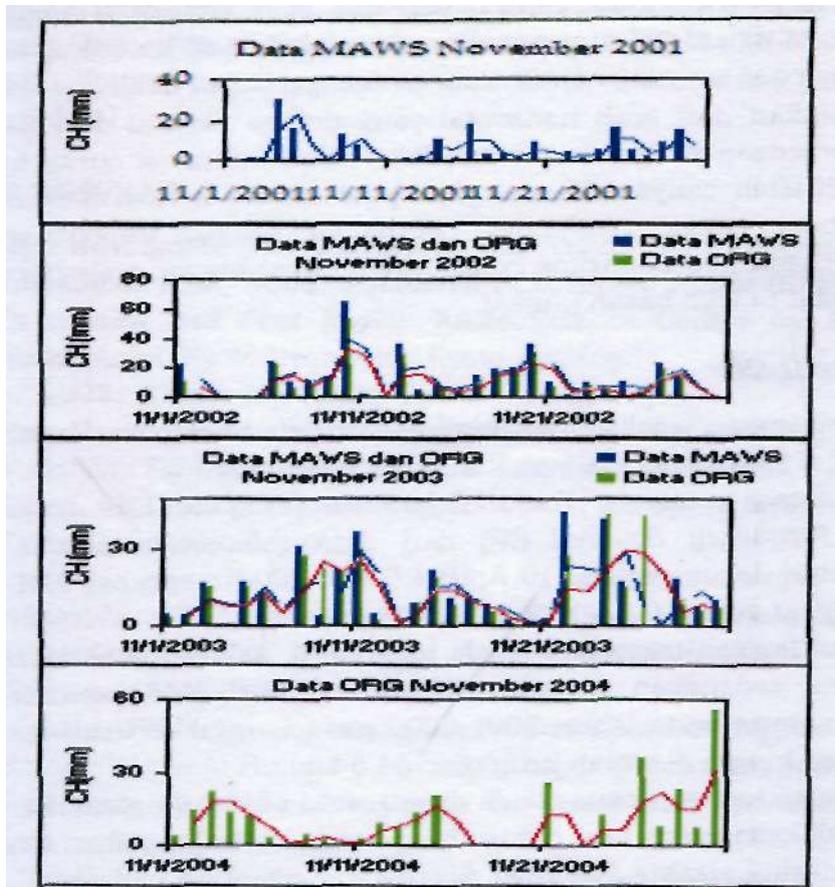
### 5.2.2 Analisis struktur lapisan tropopause selama bulan November 2001-2004

Pada bulan November 2001, ketinggian lapisan tropopause cukup stabil berkisar antara 16,5-18 km dan pada hari-hari tertentu terdapat dua lapisan tropopause (tropopause ganda) yang terjadi pada ketinggian 18-19 km, namun menjelang akhir november, sekitar tanggal 29 November 2001 terjadi penurunan lapisan tropopause hingga mencapai 14,5 km. Pada tanggal 4 dan 5 tidak ada kenaikan nilai VEP.

Pada bulan November 2002, ketinggian lapisan tropopause juga relatif stabil dan rapat pada ketinggian berkisar antara 16-18 km, seperti juga pada bulan November 2001, menjelang akhir November 2002 tepatnya tanggal 28 November terjadi perubahan tinggi lapisan tropopause yang drastis hingga di bawah 14 km, hal ini juga dapat dilihat berdasarkan profil kecepatan angin zonalnya. Belum dapat dijelaskan secara pasti bagaimana hal ini dapat terjadi, faktor dominan apa yang menyebabkannya, namun yang pasti adalah perubahan ini tidak menyebabkan adanya kenaikan intensitas curah hujan di bawahnya. Yang terjadi justru sebaliknya, di saat tinggi tropopause relatif tenang (tidak terjadi lonjakan yang berarti) seperti tanggal 11 November 2002, justru intensitas curah hujan mencapai puncaknya sekitar 65 mm (Gambar 5-1).

Pada bulan November 2003, walaupun tidak sama persis dengan kejadian sebelumnya, namun terlihat adanya penurunan tinggi lapisan tropopause hingga mencapai 14 km, yakni pada tanggal 23 November 2003. Hal yang berbeda adalah penurunan ini justru diikuti dengan adanya kenaikan intensitas curah hujan di bawahnya yakni pada tanggal 22 dan 24 November 2003, walau hanya mencapai 40 mm. Selain itu juga diketemukan adanya lapisan tropopause ganda yang perlu pengkajian lebih mendalam untuk menganalisisnya.

Pada bulan November 2004, kondisi yang mungkin paling sulit untuk dianalisis. Selain banyak data yang tidak terukur (*missing data*) baik pada data EAR maupun BLR, juga masalah penajaman warna. Sebenarnya sudah dicoba untuk konsisten dalam menyeleksi gradasi warna, namun tetap saja hasilnya tidak sempurna.



Gambar 5-6: Intensitas curah hujan November 2001-2004

### 5.2.3 Perbandingan lapisan tropopause secara keseluruhan antara bulan Juli dan November 2001-2004

Kondisi saat bulan November baik itu tahun 2001 hingga 2004, mestinya tidaklah sama dengan bulan Juli pada waktu dan tempat yang

sama. Selain disebabkan perubahan posisi matahari, faktor massa udara yang di bawanya juga berbeda.

Pada bulan Juli, lapisan tropopause berkisar antara ketinggian 16-18 km, namun fluktuasi perubahan (penurunan dan kenaikan) sangat draslis dari hari ke hari. Schinggajika dibandingkan dengan bulan November 2001-2004 perubahan tropopause lebih jelas terlihat dengan fluktuasi ketinggian 16,5-17,5 km, menunjukkan bahwa lapisan tropopause bulan November lebih stabil dan lebih rapat. Hal ini terlihat baik dari data VEP maupun angin zonal. Namun pada hampir setiap akhir bulan November, selalu terjadi penurunan lapisan tropopause hingga mencapai 14 km, hal ini diduga karena pada bulan November umumnya aktifitas konveksi sudah mulai melemah.

Yang menarik adalah arah kecepatan angin umumnya horizontal (Gambar 4-10) berdasarkan pengamatan BLR pada lapisan 1 hingga 5 km. Hal ini diduga terjadi akibat pengaruh monsun pada saat itu cukup dominan, sebab massa uap air yang nantinya turun sebagai hujan tidak lagi murni dari atas, melainkan dari arah horizontal yang diduga berasal dari Samudera Hindia. Perbedaan yang cukup mencolok adalah frekuensi curah hujannya yang relatif lebih banyak dibandingkan saat musim kering. Memang tidak bisa dikatakan ungggi rendahnya perubahan lapisan tropopause selalu indentik dengan laju intensitas curah hujan di bawahnya, walaupun hal ini terjadi di saat musim basah (hujan).

## 6 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pengolahan data secara keseluruhan ada beberapa hal yang dapat disimpulkan sebagai berikut.

- Korelasi antara parameter *Vertical Echo Power* (VEP) dari EAR dengan *Brunt V&is&la Frequency Squared* ( $N^2$ ) dari data radiosonde selama 9 kali pengamatan dalam periode 10 April — 9 Mei 2004 mencapai 0,81 dengan nilai berkisar antara 0,62-0,99.
- Ketinggian lapisan tropopause pada bulan Juli 2001-2004 berkisar antara 15-18 km, sedangkan sepanjang November 2001-2004 berkisar antara 17,5-18 namun pada tahun 2001-2003 pada tanggal tertentu mengalami penurunan hingga di bawah ketinggian 14,5 km.
- Pecahnya lapisan tropopause tidak dipengaruhi waktu pengamatan.
- Dari 8 kali kasus yang ada, diduga hanya terjadi 2 kali patahan tropopause terjadi, masing-masing Juli 2001 dan 2003. Sementara pada musim basah hanya 1 kali terjadi, yakni November 2003.
- Penentuan tinggi lapisan tropopause relatif lebih mudah dianalisis pada musim basah dibandingkan dengan musim kering (kecuali November 2004) baik menggunakan data VEP maupun angin zonal dari EAR. Pada saat musim kering, bukan berarti tidak ada curah hujan, tetap ada hujan, hanya saja frekuensi dan nilai intensitasnya berbeda, ini mencerminkan

- bahwa tinggi rendahnya lapisan tropopause ternyata tidak selalu diikuti dengan tinggi rendahnya intensitas curah hujan yang terukur di bawahnya.
- Pada musim kering kecepatan angin vertikal (yang turun) relatif lebih dominan dari pada angin horizontal. Sebaliknya, pada saat musim basah, kecepatan angin horizontal relatif lebih dominan dibandingkan angin vertikal yang mungkin terkait erat dengan fenomena monsun pada saat itu.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis menghaturkan terima kasih kepada pihak teknis yang bekerja di Stasiun Pengamat Dirgantara (SPD) LAPAN- Koto tab ang, khususnya mereka yang bekerja menyediakan data EAR. Juga kepada pihak *Research Institute for Sustainable Humanosphere* (RISH), Universitas Kyoto, Jepang, khususnya Dr. Mamoru Yamamoto dan Dr. Hiroyuki Hashiguchi. Selain itu juga kepada pihak Shimane University, khususnya Dr. Toshiaki Kozu dan Dr. Toyoshi Shimomay atas data-data radiosonde. EAR dan fasilitas lain yang ada di SPD Kototabang dioperasikan oleh RISH, Universitas Kyoto, Jepang sejak Juni 2001

## DAFTAR RUJUKAN

- Fukao S., Hashiguchi H., Yamamoto M., Tsuda T., Nakamura N and Yamamoto K.M., 2003. *Equatorial Atmosphere Radar (EAR) : System Description and First Result* Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Kyoto, Jepang.
- Handoko, 1993. *Klimatologi Dasar*. Pustaka Jaya, Bogor.
- Hermawan E., T. Tsuda dan T. Adachi, 1998. *MU Radar Observation Variations By Using Clear Air Echo Characteristic*. Jurnal Earth Planet Space, 50, 361-370. Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Jepang.
- Hermawan E., dan Husni M., 2002. *Perbandingan Antara Equatorial Atmosphere Radar dengan Middle and Upper Atmosphere Radar dalam Pemantauan Angin Zonal dan Angin Meridional* Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca 1 (III) : 45-51.
- H. Hashiguchi, 1995. *Development of an L-Band Clear-Air Doppler Radar and Its Application to Planetary Boundary Layer Observation over Equatorial Indonesia*. Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Jepang.
- Holton James R., 1997. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press, INC. San Diego, California.
- Hopkins Edward J., 1996. *Radiosondes-An Upper Air Probe*. Artikel. [www.meteor.wisc.edu](http://www.meteor.wisc.edu).
- Karmini M., dan Renggono F., 1994. *Penggunaan Boundary Layer Radar (BLR) Untuk Mengamati Dinamika Atmosfer Pada Lapisan Atmosfer Paling Rendah (Boundary Layer)*. Majalah BPPT, Jakarta.

- Nurmayani Henny, 2003. *Pemanfaatan Data Boundary Layer Radar (BLR) Pada Troposfer Bawah Untuk Analisis Awan Hujan Penyebab Banjir*. Skripsi Jurusan Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematik dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Prawirowarcioyo Susilo, 1996. *Meteorologi* Penerbit ITB. Bandung
- S. Fukao, H. Hashiguchi., M. Yamamoto, T. Tsuda, Nakamura, and M. Yamamoto. 2003. *Equatorial Atmosphere Radar (EAR): System Description and First Result* Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Jepang.
- Seonarmo, Sri H-, 1998. *MetorologiTropis*. Diktat Kuliah. Penerbit ITB. Bandung
- Susumu Kato, Tri Wahyu Hadi, dan Joko Wiratmo, 1998. *Dinamika Atmosfer*. Penerbit ITB. Bandung.
- Tjasyono, Bayong. 2004. *Klimatologi Umum*. Penerbit ITB. Bandung.
- Widyastuti, Erni. 1995, *Analisis Dinamika Atmosfer Tropis di Sekitar Zona Tropopause Berdasarkan Data Radiosonde*. Tugas Akhir. Jurusan Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Whiteman, C. David, 2000. *Mountain Meteorology Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, Newyork.
- [http //rslab.riko.shimane-u.ac.jp/CPEA/campaign/sonde/data.html](http://rslab.riko.shimane-u.ac.jp/CPEA/campaign/sonde/data.html)
- [http //cics.umd.edu/~yin/GPCP/main.html](http://cics.umd.edu/~yin/GPCP/main.html)
- [http //www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/ear/index-e.html](http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/ear/index-e.html)
- [http //www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/ atmprofile.htm](http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream/atmos/atmprofile.htm)
- [http //www.atmosphere.mpg.de/enid](http://www.atmosphere.mpg.de/enid)
- [http //cics.umd.edu/~jim/gpcp/main.html](http://cics.umd.edu/~jim/gpcp/main.html)