
IDENTIFIKASI GELOMBANG KELVIN ATMOSFER EKUATORIAL DI INDONESIA BERBASIS DATA NCEP/NCAR REANALYSIS I

Sandro Wellyanto Lubis dan Sonni Setiawan

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680
E-mail: Sandro.lubis@live.com

ABSTRAK

Gelombang Kelvin diidentifikasi pada lapisan tropopause dan stratosfer bawah Indonesia dengan menggunakan teknik transformasi Fourier dari fungsi runtun waktu autokovarian $f(\omega)$ angin zonal dan angin meridional. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh belum lengkapnya kajian terkait bukti keberadaan dan perilaku gelombang Kelvin, yang meliputi propagasi, struktur, periodisitas dan interaksinya dengan tipe-tipe osilasi atmosfer khatulistiwa di Indonesia. Hasil analisis spektral dan analisis distribusi energi kinetik (EK) angin horizontal pada lapisan tropopause, menunjukkan bahwa gelombang Kelvin di Indonesia Bagian Barat (IBB) muncul pada periode 15 harian ($2\pi\omega^{-1}$, *ground-base*) dalam periode pengamatan I (observasi pada periode 1 Januari- 30 Maret yang berasosiasi dengan musim basah monsun) dan 18 harian pada periode pengamatan III (observasi pada periode 29 Juni-26 September berasosiasi dengan musim kering monsun). Di Indonesia Bagian Tengah (IBTA), gelombang Kelvin hanya ditemukan pada periode 12,9-18 harian dalam pengamatan I. Sementara di kawasan Indonesia Bagian Timur (IBT), gelombang ini muncul pada periode 10-12,9 harian pada periode pengamatan I dan 15-18 harian pada periode pengamatan III. Kehadiran gelombang Kelvin pada periode II dan IV tidak jelas teramati di Indonesia. Respon EK pada osilasi gelombang Kelvin 10-18 harian akan muncul ketika fenomena monsun menguat di troposfer Asia Tenggara. Pada lapisan stratosfer bawah Indonesia, gelombang Kelvin kuat teramati hanya pada periode pengamatan I dengan kisaran periode rata-rata 15-18 harian.

Kata kunci: Gelombang Kelvin, periodisitas, propagasi.

ABSTRACT

Kelvin waves were identified in the tropopause and lower stratosphere of Indonesia by using Fourier transformation techniques in the time series - autocovariances function $f(\omega)$ of zonal wind and meridional wind data. This research is motivated by complete unsolved problems relating to evidence of existence and their behaviors including structure, periodicity and interconnection to other equatorial atmospheric oscillations in Indonesia. The results of spectral analysis and distribution of kinetic energy analysis (EK) on the horizontal wind at the tropopause showed that Kelvin wave in Western Indonesia (IBB) appears within 15 day period ($2\pi\omega^{-1}$, the ground-base) in the first observation (observation in the period of January 1 to March 30 associated with wet monsoon season) and 18 day period in the third observation (observation in the period of June 29 to September 26 associated to dry monsoon season). In the Middle of Indonesia (IBTA), Kelvin wave is only found in a period of about 12.9-18 days in the first observation period. While in Eastern Indonesia (IBT), this wave appears in period of 10-12.9 days (the first observation period) and 15-18 days (the third observation period). The presence of Kelvin waves in the period II and IV are not clearly observed in

Indonesia. Kinetic energy response on a 10-18 days Kelvin wave oscillations will arise when the phenomenon of tropospheric monsoon being strengthened in Southeast Asia. In the lower stratosphere of Indonesia, Kelvin wave was strongly observed only in the first observation period and varies between 15-18 days.

Keywords: *Kelvin waves, periodicity, propagation.*

PENDAHULUAN

Gelombang Kelvin adalah gelombang planeter atmosfer yang dibangkitkan oleh osilasi pada pola pemanasan konvektif skala luas di lapisan troposfer ekuatorial [1, 2]. Gelombang ini ditemukan oleh Wallace dan Gutzwiller [3] pada pengamatan angin zonal di atas samudera Pasifik Barat pada koordinat 9° LU dan 80° BT, 11° LU dan 61° BT, dan 9° LU dan 168° BT. Gelombang ini bergerak ke arah timur (*westerly*), dengan periode 12-15 harian dan tertangkap pada ketinggian stratosfer bawah 80-20 mb [2, 3, 4, 5]. Pengamatan lainnya dilakukan oleh Dhaka dkk. [6] di atas Samudera Hindia pada tiga titik pengamatan yaitu Trivandium ($8,5^{\circ}$ LU, 77° LU), Minicoy ($8,3^{\circ}$ LU, 73° BT), dan Port Blair ($11,7^{\circ}$ LU, $92,7^{\circ}$ BT). Dhaka *et al* [6] mendeteksi bahwa gelombang Kelvin dapat ditemukan pada ketinggian 16-24 km dengan periode 12-16 harian, merambat ke arah timur dan berpropagasi ke bawah dan ke atas.

Gelombang Kelvin memiliki peran yang sangat penting dalam dinamika atmosfer tropis. Gelombang ini diduga sebagai pemicu terjadinya fenomena Madden Julian Oscillation (MJO) dan ikut berperan dalam proses pembangkitan fenomena Quasi Biennial Oscillation (QBO). Holton [2] menjelaskan lebih lanjut bahwa bangkitnya fenomena QBO disebabkan oleh adanya sumbangan momentum yang dihasilkan oleh gelombang Kelvin dan gelombang Yanai yang berimplikasi terhadap variasi angin zonal quasi dua tahunan pada lapisan stratosfer. Penelitian terbaru oleh Noersomadi [7] mengungkapkan bahwa peningkatan energi potensial dan energi kinetik propagasi ke bawah gelombang Kelvin akan bertindak sebagai pemicu proses konveksi di wilayah tropis.

Berdasarkan informasi di atas, kajian gelombang Kelvin ekuatorial sangat penting untuk dipelajari, khususnya di Indonesia yang berada di sepanjang pita ekuator dimana peristiwa konvektif sangat intensif terjadi. Selain itu, pemahaman terkait gelombang Kelvin di Indonesia akan membantu analisis pola variabilitas iklim yang terjadi di Indonesia atau dengan kata lain meningkatkan *skill analysis* dinamika atmosfer tropis Indonesia. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Nababan [8] dan Ningrum [9] telah menjelaskan bagaimana struktur horizontal dan vertikal gelombang Kelvin di Indonesia Bagian Barat (10° LU- 10° LS dan 100° BT- 105° BT) namun belum menjelaskan karakter gelombang tersebut secara menyeluruh di atas lapisan tropopause dan stratosfer bawah Indonesia (Indonesia Bagian Tengah dan Timur). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis karakter gelombang Kelvin secara menyeluruh pada lapisan tropopause dan stratosfer bawah Indonesia. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendorong penelitian-penelitian gelombang

atmosfer ekuatorial lainnya karena penelitian di lintang tengah mengindikasikan bahwa ekuator adalah generator atau dinamo atmosfer global.

DATA DAN METODE

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data NCEP/NCAR Reanalysis I dalam interval enam jam yang diperoleh dari pengamatan NOAA Januari hingga Desember 2008, pada level ketinggian 30 mb dan 100 mb. Data dikelompokkan menjadi empat periode pengamatan yaitu periode I (1 Januari-30 Maret berasosiasi dengan musim basah monsun), periode II (31 Maret-28 Juni), periode III (29 Juni-26 September berasosiasi dengan musim kering monsun), dan periode IV (27 September-25 Desember). Pembagian data dengan panjang periode 90 harian ini bertujuan untuk melihat variasi gelombang dalam empat musim (basah, kering dan transisi I, II), menghilangkan trend *high-frequency oscillation* atau osilasi atmosfer dengan frekuensi yang lebih besar dan menghindari data yang hilang pada saat dilakukan analisis spektrum. Objek kajian meliputi seluruh wilayah tropopause dan stratosfer bawah Indonesia dengan pembagian grid sebagai berikut:

- Indonesia Bagian Barat pada posisi pita ekuatorial 10°LU-10°LS dan 100°BT.
- Indonesia Bagian Tengah pada posisi pita ekuatorial 10°LU-10°LS dan 115°BT.
- Indonesia Bagian Timur pada posisi pita ekuatorial 10°LU-10°LS dan 130°BT.

Identifikasi gelombang Kelvin dilakukan dengan syarat sebagai berikut:

- terjadi saat aliran dasar adalah angin timuran (u)
- nilai spektra daya osilasi angin zonal (u) bernilai maksimum dalam periode 10-20 harian.
- tidak ada osilasi pertubasi angin meridional (v) dalam periode yang sama.
- Peluruhan amplitudo angin zonal (u) dalam spektral terhadap meridional mendekati peluruhan Gaussian atau sebaran normal (analisis distribusi energi kinetik).

Analisis spektral digunakan untuk melihat periode setiap gelombang yang tersembunyi atau mengestimasi fungsi densitas spektrum dari sebuah data runtun waktu stokastik. Deret Fourier dapat dirumuskan sebagai berikut [10]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_{mr} \cos rt + b_r \sin rt) \quad (1)$$

Secara definisi, jika X_t adalah proses stokastik dengan fungsi autokovarians $\gamma(k)$ dengan $k = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, maka spektrum $f(\omega)$ adalah transformasi Fourier dari fungsi autokovarians, yang dalam ekspresi matematisnya adalah sebagai berikut [8, 9, 10]:

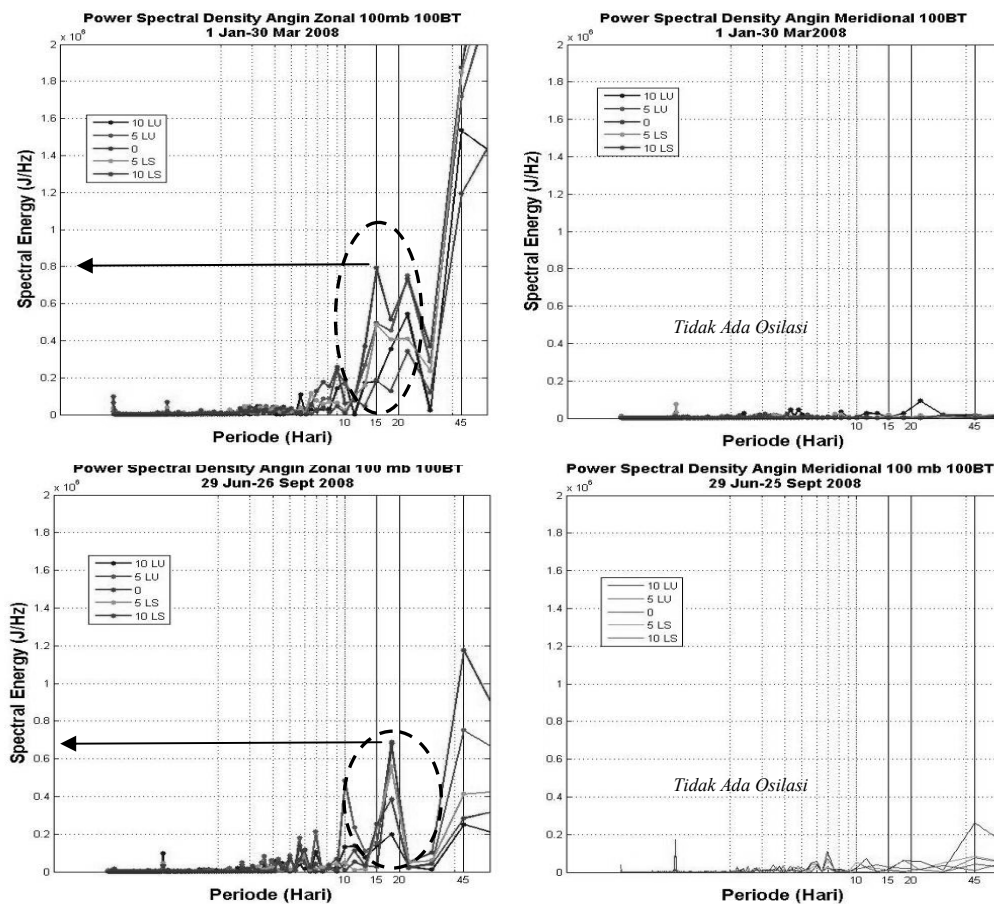
$$f(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma(k) \exp(-i\omega k) \quad (2)$$

Bentuk diatas adalah bentuk transformasi umum yang dapat diaplikasikan dan dipakai untuk bilangan kompleks dalam satu runtun waktu. Untuk runtun waktu yang real, $f(\omega)$ adalah fungsi yang tetap dan $\omega > 0$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Struktur Horizontal Gelombang Kelvin di Lapisan Tropopause Indonesia

Analisis gelombang Kelvin di lapisan tropopause Indonesia dilakukan pada level 100 mb. Nilai periode dominan osilasi gelombang atmosfer 10-20 harian diperoleh dengan meninjau nilai spektra daya pada masing-masing grid pengamatan (Gambar 1).



Gambar 1. Power Spectral Density angin zonal dan meridional pada periode I (asosiasi dengan musim basah) dan periode III (asosiasi dengan musim kering) di Wilayah Indonesia Bagian Barat.

Berdasarkan Tabel 1-4, terdapat indikasi bahwa adanya osilasi 10-20 harian relatif terhadap aliran dasar angin timuran yang menyerupai osilasi gelombang Kelvin di lapisan tropopause Indonesia. Namun ini belum dapat digolongkan sebagai periodisitas gelombang Kelvin, sehingga

masih perlu dilakukan analisis peluruhan amplitudo angin zonal (u) dalam spektral terhadap lintang dengan syarat spektra daya harus meluruh secara Gaussian ketika menjauh dari ekuator (Gambar 2).

Tabel 1 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan tropopause pada periode I (1 Januari- 30 Maret).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	15/-10	18/-10	11.25/-10
5° LU	15/-15	18/-15	11.25/-17
EQ	15/-15	18/-20	11.25/-20
5° LS	15/-17	12.9/-25	10/-25
10° LS	15/-20	12.9/-20	12.9/-18

Tabel 2 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan tropopause pada periode II (31 Maret- 28 Juni).

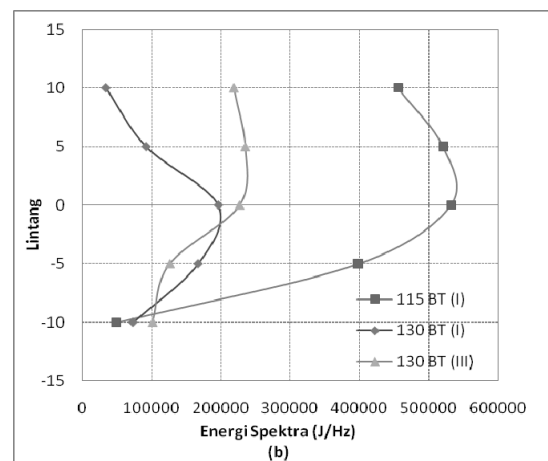
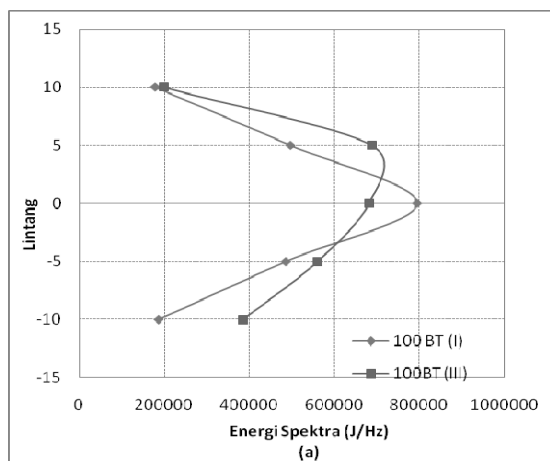
Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	11.3/-15	11.3/-10	12.9/-7
5° LU	11.3/-14	10/-10	12.9/-5
EQ	11.3/-10	12.9/-6	15/-5
5° LS	18/-8	15/-5	15/-5
10° LS	15/-5	18/-2	15/-2

Tabel 3 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan tropopause pada periode III (29 Juni- 26 September).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	18/-25	11.3/-15	15/-15
5° LU	18/-15	11.3/-10	18/-7.5
EQ	18/-5	11.3/-5	18/-4
5° LS	18/-5	12.9/-2.5	18/-3
10° LS	18/-3	12.9/-2	15/-2

Tabel 4. Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan tropopause pada periode IV (27 September- 25 Desember).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	15/-12	15/-10	15/-8
5° LU	18/-10	15/-10	18/-7.5
EQ	15/-7	12.9/-8	18/-6
5° LS	15/-5	12.9/-8	12.9/-7.5
10° LS	18/-3	12.9/-5	11.3/-5



Gambar 2. Peluruhan amplitudo angin zonal (u) dalam spektral terhadap meridional yang berasosiasi dengan keberadaan gelombang Kelvin.

Dari hasil analisis ini (Gambar 2), maka osilasi 10-20 harian yang dapat digolongkan sebagai gelombang Kelvin adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Periodisitas gelombang Kelvin di lapisan tropopause Indonesia.

Wilayah Kajian	Periode Gelombang (Hari)			
	I	II	III	IV
IBB	15	-	18	-
IBTA	12.9-18*	-	-	-
IBT	10-12.9*	-	15-18*	-

* Bervariasi dalam lintang 10° LU- 10° LS.

Gelombang Kelvin pada periode I hadir pada saat aliran dasar angin timuran bertambah ke arah selatan sedangkan kehadiran gelombang Kelvin pada periode III bersamaan dengan bertambahnya angin timuran ke arah utara. Secara teoritis laju fasa gelombang (c) merupakan fungsi dari rata-rata kecepatan angin zonal, dalam perspektif teoritis seharusnya jika rata-rata kecepatan angin zonal bertambah besar maka nilai dari pangkat eksponensial komponen amplitudo angin zonal juga akan bertambah besar ketika berada tepat di ekuator dan berkurang dalam satu lintang ketika bergerak menjauhi ekuator, namun berbeda halnya dengan pengamatan ini. Variasi \bar{u} dalam arah meridional tidak mengubah distribusi amplitudo gelombang Kelvin secara meridional di periode I, begitu pula pada periode lainnya. Hal ini terkait dengan karakter gelombang Kelvin yang diamati di Indonesia yang bersifat tidak bebas atau dipengaruhi oleh sumber pemicunya (*forced waves*) sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui faktor penyebabnya.

Secara umum untuk kajian tropopause Indonesia Bagian Barat (IBB), pada musim basah (Periode I), gelombang Kelvin memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan pada saat musim kering (Periode III) (gambar 1). Rata-rata nilai energi spektra gelombang Kelvin pada periode I adalah $2348 \cdot 10^5$ Joule dan periode III adalah $1953 \cdot 10^5$ Joule. Hal ini terjadi karena pada saat musim basah, *forcing* dari awan-awan konvektif (konveksi awan cumulus skala besar) menghasilkan energi panas laten yang optimum untuk membangkitkan gelombang Kelvin. Energi terbesar terpusat di ekuator dan meluruh ketika menjauhi ekuator. Periode gelombang Kelvin yang teramati pada musim basah adalah 15 harian, sedangkan pada musim kering kehadiran dominan dengan periode 18 harian. Gelombang Kelvin di Indonesia Bagian Tengah (IBTA) hadir dengan periode yang beragam yaitu 12,9-18 harian sedangkan di Indonesia bagian Timur (IBT) gelombang ini hadir pada periode yang lebih pendek yaitu 10-12,9 harian. Pada periode III, kehadiran gelombang Kelvin di Indonesia bagian Tengah tidak teramati dengan jelas dan hanya muncul di Indonesia bagian Timur dengan periode 11,3-18 harian. Efek lokal yang terdapat di wilayah IBT diduga menjadi salah satu sumber penyebab bangkitnya gelombang Kelvin di wilayah ini.

Pada musim transisi pertama (Periode II) dan kedua (Periode IV) terhadap IBB, osilasi dominan pertubasi angin zonal tidak menunjukkan hadirnya gelombang Kelvin di Indonesia hal ini dikarenakan distribusi energi yang berasosiasi dengan distribusi amplitudo tidak tersebar secara

Gaussian relatif terhadap lintang sehingga masih belum dapat dipastikan dengan jelas apakah osilasi dominan angin zonal 10-20 harian ini adalah gelombang Kelvin. Hilang dan munculnya gelombang Kelvin pada masing-masing periode sangat terkait dengan sumber pemicunya. Selain itu, distribusi amplitudo yang mendekati distribusi Gaussian, menunjukkan bahwa arah propagasi dari gelombang adalah baratan (kecepatan fasa positif). Nilai rata-rata energi kinetik (EK) gelombang Kelvin 10-20 harian yang dihitung dengan mengalikan nilai spektra daya dari tabel 1-4 dan frekuensinya $f(t) = \sum f(\omega) \Delta\omega$, menunjukkan bahwa EK gelombang Kelvin IBB lebih besar dibandingkan IBTA dan IBT. Tingginya nilai energi ini menunjukkan bahwa intensitas gelombang Kelvin di Indonesia Bagian Barat lebih besar jika dibandingkan dengan keberadaan gelombang Kelvin di Indonesia bagian Tengah dan Timur (Tabel 6).

Tabel 6. Rata - rata energi kinetik 10-20 harian gelombang Kelvin di lapisan tropopause Indonesia.

Wilayah Kajian	Energi Kinetik Rata-rata ($\cdot 10^5 J$)			
	I	II	III	IV
IBB	2348	-	1953	-
IBTA	1789	-	-	-
IBT	648	-	939	-

Analisis Struktur Horizontal Gelombang Kelvin di Stratosfer Bawah Indonesia

Analisis gelombang Kelvin di lapisan stratosfer bawah Indonesia difokuskan pada level 30 mb. Berdasarkan Tabel 7-10 dan analisis peluruhan amplitudo dalam analisis spektral, osilasi 10-20 harian yang dapat digolongkan kedalam osilasi gelombang Kelvin adalah yang terdapat pada periode I (Tabel 11) karena memenuhi syarat keberadaan gelombang Kelvin dimana distribusi amplitudo mendekati distribusi Gaussian di atmosfer.

Pada periode pengamatan I, gelombang Kelvin di IBB memiliki periode 15-18 harian, periode ini sama dengan hadirnya gelombang Kelvin di IBTA. Kehadiran gelombang Kelvin di IBT memiliki periode yang lebih bervariasi terhadap lintang, yaitu 11,3-18 harian. Keunikan gelombang Kelvin di lapisan stratosfer bawah ini adalah penguatan gelombang Kelvin hanya terjadi pada periode I dan menghilang atau lenyap pada periode II, III, dan IV. Diduga gelombang Kelvin pada level 30 mb yang dibangkitkan pada periode I ini merupakan perluasan dari gelombang Kelvin yang muncul pada lapisan tropopause [6]. Pada periode II, III, dan IV peluruhan energi tidak sesuai atau mendekati teori distribusi energi kinetik terhadap lintang secara meridional.

Jika dianalisis, hilangnya gelombang Kelvin pada periode ini dikarenakan melemahnya angin timuran pada level 30 mb, hal ini dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa pada periode II, III, dan IV kekuatan angin yang membangkitkan gelombang Kelvin diredam oleh kekuatan angin baratan. Secara

teori jika zonasi atau rata-rata kekuatan angin baratan bertambah maka laju fasa akan berkurang sehingga eksponensial dari perbandingan komponen parameter Rossby dan laju fasa akan berkurang. Hal ini akan mengakibatkan pelemahan amplitudo pertubasi angin zonal yang berasosiasi dengan pelemahan energi kinetik gelombang Kelvin. Jika angin baratan mendominasi maka gelombang Kelvin tidak akan bangkit dengan kata lain angin timuran memberikan energi yang penting untuk terbentuknya gelombang Kelvin.

Tabel 7 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan stratosfer bawah Indonesia pada periode I (1 Januari-30 Maret).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	18/-6.2	18/-5.4	15/-6.0
5° LU	18/-6.0	18/-5.7	11.25/-4.2
EQ	15/-15	15/-3.9	15/-2.8
5° LS	15/-8.6	15/-9.5	18/-10.7
10° LS	15/-20.1	15/-20.1	15/-21.7

Tabel 8 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan stratosfer bawah Indonesia pada periode II (31 Maret-28 Juni).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	11.3/-0.5	18/-0.1	12.9/-0.4
5° LU	12.9/+7.5	11.3/+6.7	18/+7.4
EQ	10/+10	10/+11.3	11.3/+12.8
5° LS	15/+7.4	15/+11.4	15/+13.4
10° LS	15/+1.8	15/+3.8	10/+3.3

Tabel 9 Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan stratosfer bawah Indonesia pada periode III (29 Jun - 26 September).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	15/-6.3	15/-5.2	12.9/-6.5
5° LU	15/+4.4	10/+4.7	15/+3.9
EQ	18/+13.7	11.3/+13.5	15/+14.4
5° LS	15/+14.4	15/+17.5	18/+19.1
10° LS	15/+9.1	15/+10.4	12.9/+11.0

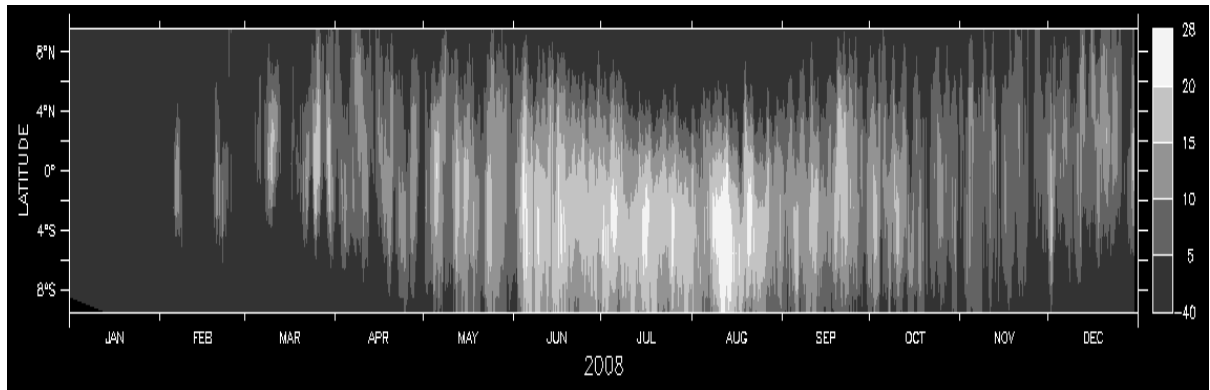
Tabel 10. Periode dominan spektra daya dan rata-rata kecepatan angin zonal di lapisan stratosfer bawah Indonesia pada periode IV (27 September - 25 Desember).

Lintang	Periode Gelombang (Hari)/ \bar{u} (m/s)		
	100° BT	115° BT	130° BT
10° LU	12.9/+1.6	15/+1.2	15/-0.6
5° LU	18/+7.3	15/+6.6	15/+6.7
EQ	11.3/+8.7	18/+9.1	18/+9.5
5° LS	12.9/+6.1	12.9/+7.0	12.9/+8.9
10° LS	18/-0.5	18/+1.4	12.9/+1.0

Tabel 11. Periodisitas gelombang Kelvin di lapisan stratosfer bawah Indonesia.

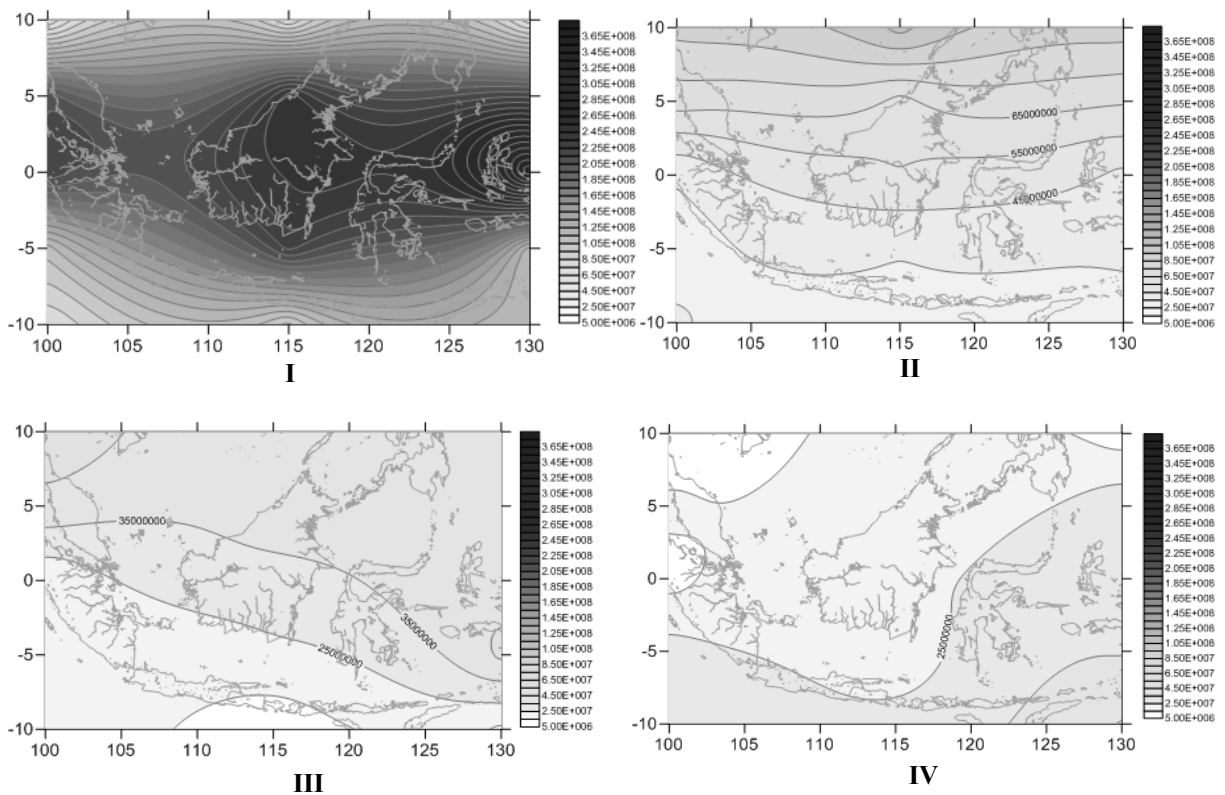
Wilayah Kajian	Periode Gelombang (Hari)			
	I	II	III	IV
IBB	15-18*	-	-	-
IBTA	15-18*	-	-	-
IBT	11.3-18*	-	-	-

* Bervariasi dalam lintang 10° LU-10° LS.



Gambar 3. Rata-rata kecepatan angin zonal 100BT-130BT (m/s) pada periode pengamatan I, II, III, dan IV ketinggian stratosfer bawah (30 hPa).

Distribusi energi kinetik gelombang Kelvin secara horizontal pada ketinggian 30 mb dapat dilihat pada Gambar 4. Pada periode I energi kinetik gelombang Kelvin tertinggi terpusat di sekitar ekuator dan melemah pada lintang lainnya. Pada periode lainnya kehadiran gelombang Kelvin tidak terlihat jelas dan lenyap. Gelombang Kelvin yang hanya muncul pada periode I dan lenyap pada periode II, III, dan IV masih perlu dikaji lebih lanjut lagi.



Gambar 4. Distribusi Energi Kinetik (Joule) Gelombang Kelvin Stratosfer Bawah (30 hPa) 10-20 harian.

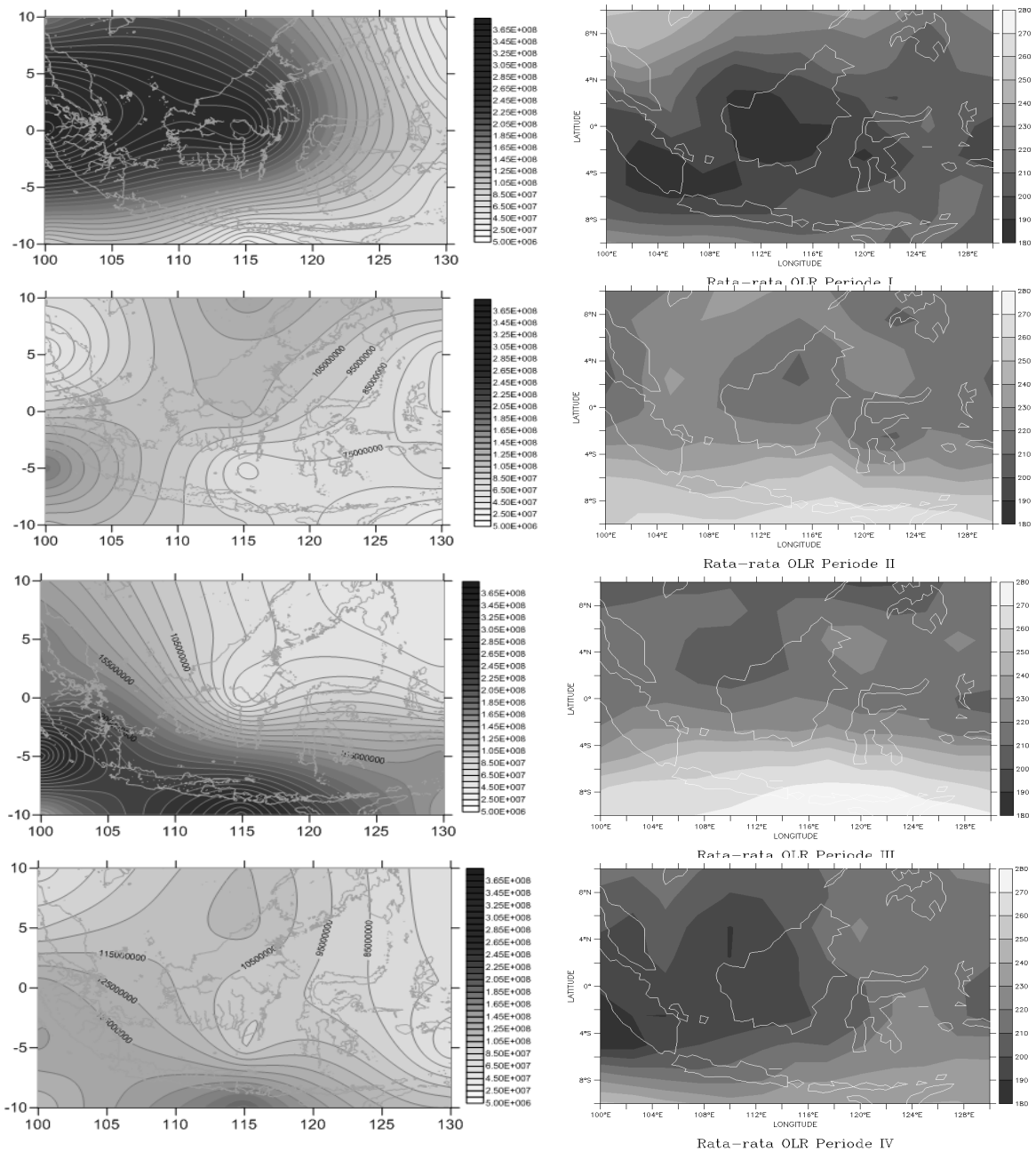
Respon Gelombang Kelvin terhadap Diabatic *Forcing* di Tropopause Indonesia.

Gelombang Kelvin dibangkitkan oleh kekuatan diabatik dari awan-awan konvektif skala besar di lapisan troposfer hingga tropopause. Di wilayah ekuator hal ini perlu dikaji karena proses *diabatic heating* dan *laten heat* sangat intensif dan menyumbangkan energi yang besar terhadap pembangkitan gelombang Kelvin. Gelombang Kelvin pada periode 10-20 harian bukan merupakan hasil dari *diabatic forcing* troposfer dalam satu spektral yang sama melainkan merupakan hasil dari *forcing* diabatik yang bersifat *red noise* dalam distribusi spektral. Salah satu contoh dari *red noise* adalah osilasi curah hujan musonal di Asia Tenggara yang dapat memicu kehadiran gelombang Kelvin pada periode lebih dari 10 harian [11].

Periode I merupakan periode pada saat terjadinya monsun Asia dimana pada periode tersebut keberadaan awan-awan kumululus skala besar hampir menutupi semua wilayah IBB dan IBTA begitu pula kondisi sebaliknya pada saat monsun Australia di periode III. Penutupan awan akibat efek monsun Asia ini menyediakan energi yang besar untuk bangkitnya Gelombang Kelvin di Indonesia. Khususnya bagian Barat. Hal ini dibuktikan oleh adanya distribusi energi kinetik (EK) 10-20 harian yang dominan di Indonesia khususnya bagian Barat dan nilai OLR yang rendah pada wilayah ini (Gambar 5).

Pada periode III, saat fenomena monsun Australia terjadi, respon energi kinetik gelombang Kelvin 10-20 harian tampak menguat hanya di sekitar ekuator hingga bagian selatan Indonesia. Kehadiran gelombang Kelvin ini diduga muncul karena adanya energi yang disumbangkan dari pergerakan monsun Australia. Pada periode transisi (II dan IV), respon energi Kinetik gelombang Kelvin tidak tampak begitu besar yang artinya keberadaan gelombang Kelvin pada periode ini tidak terlihat jelas di Indonesia.

Secara umum dapat ditarik kesimpulan bahwa respon energi kinetik gelombang atmosfer 10-20 harian akan muncul pada saat intensitas monsun menguat di Indonesia, dengan kata lain munculnya gelombang Kelvin di Indonesia dengan periode 10-20 harian merupakan respon pada saat terjadinya osilasi musonal di Asia Tenggara khususnya Indonesia. Analisis ini sesuai dengan penemuan sebelumnya yang dilakukan oleh Murakami [11] bahwa osilasi curah hujan musonal di Asia Tenggara dapat memicu kehadiran gelombang Kelvin pada periode lebih dari 10 harian. Namun hubungan fenomena monsun dan penguatan gelombang Kelvin di atmosfer Indonesia, disarankan masih perlu diteliti secara kuantitatif (analisis statistika lanjut) agar diperoleh gambaran yang lebih jelas bagaimana evolusi dan interaksi antara monsun dan gelombang Kelvin mempengaruhi dinamika atmosfer tropis.



Gambar 5. Distribusi Energi Kinetik (Joule) Gelombang Kelvin Tropopause 10-20 harian dan Rata-Rata OLR 90 harian (W/m^2) pada Periode I, II, III, dan IV (Atas ke bawah).

KESIMPULAN

Gelombang Kelvin yang tertangkap di lapisan tropopause Indonesia Bagian Barat (IBB) memiliki periodisitas 15 harian relatif terhadap rata-rata aliran dasar angin timuran $-15,4$ m/s pada musim basah (Periode I) dan 18 harian ($\bar{u} = -10,6$ m/s) pada musim kering (Periode III). Energi yang dimiliki

gelombang Kelvin pada musim basah lebih besar dibandingkan pada saat musim kering. Di Indonesia Bagian Timur (IBT) gelombang ini hadir dengan periode yang bervariasi 10-12,9 harian ($\bar{u}_- = -18$ m/s) pada periode pengamatan I dan 15-18 harian ($\bar{u}_- = -6,3$ m/s) pada periode pengamatan III. Sedangkan pada Indonesia Bagian Tengah (IBTA) gelombang Kelvin hanya hadir pada periode pengamatan I, dengan periode 12,9-18 harian ($\bar{u}_- = -18$ m/s). Pada lapisan stratosfer bawah Indonesia, gelombang Kelvin hanya teramati pada periode I dengan periodisitas yang bervariasi 15-18 harian (IBB dan IBTA) dan 11,3-18 harian (IBT). Pada periode transisi (II dan IV) kehadiran gelombang Kelvin tidak terlihat jelas teramati di atmosfer Indonesia. Fenomena monsun Asia dan Australia memberikan respon terhadap pembangkitan gelombang Kelvin 10-20 harian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dima, I.M., and J.M. Wallace. *Atmos. Sciences*. 64 (2006): 2862.
2. Holton, J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier Inc, USA, 2004, 4rd Ed., 2004.
3. Wallace, J.M., and V.E. Kousky. *Atmos. Sciences*. 25 (1968): 900.
4. Holton, J.R., and R.S. Lindzen. *Monthly Weather Review*. 96 (1968): 385.
5. Matsuno, T. *Metor. Soc. Jap.* 44 (1966): 25.
6. Dhaka, S.K., *et al.* *Atmos. Sciences*. 57 (1995): 1189.
7. Noersomadi. *Master Thesis, Bandung Institute of Technology*, 2009.
8. Nababan, C.A. *B.Sc. Thesis, Bogor Agricultural University*, 2009.
9. Ningrum, W. *B.Sc. Thesis, Bogor Agricultural University*, 2009.
10. Chatfield, C. *The Analysis of Time Series: An Introduction*. London: Chapman and Hall, 4rd Ed., 1989.
11. Murakami, T. *Atmos. Sciences*. 29 (1972): 1129.