

ISBN: 978 - 979 - 1458 - 73 - 3



PROSIDING

SSA 2013

Seminar Sains Atmosfer

Tema:

***Meningkatkan Peran Sains dan Teknologi Pengamatan Atmosfer
dalam Mendukung Pembangunan yang Berkelanjutan***



Rabu, 28 Agustus 2013

Ruang Auditorium LAPAN Bandung

KARAKTERISTIK GELOMBANG KELVIN EKUATORIAL ATMOSFERIK DIBAWAH PENGARUH EL NIÑO-OSILASI SELATAN

*Faiz Rohman Fajary^{1,2}, Sandro Wellyanto Lubis^{1,3}, Sonni Setiawan¹

¹*Department of Geophysics and Meteorology, Bogor Agricultural University (IPB), Indonesia*

²*Earth Sciences, Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia*

³*Physics of the Atmosphere, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany*

*faizfajary@yahoo.co.id

Abstract

The purpose of this research is to qualitatively analyze characteristics of atmospheric equatorial Kelvin waves using space-time spectral analysis (STSA) of zonal wind perturbation at the 100-hPa level (tropopause) in Normal (1990), La Niña (1988–1989), and El Niño (1997–1998) conditions. Kelvin waves propagate eastward with an implied phase velocity of ~17.4 m/s and are predominantly excited in the tropopause by deep tropical convections. Energy of Kelvin waves during the Normal, the El Niño, and the La Niña events is strongly observed in tropopause of Indonesia, however the existing energy during the La Niña becomes stronger than in the Normal. As for the El Niño event, the existing energy of the waves in tropopause of central and eastern Pasific is significantly stronger than to those in the Normal and the La Niña.

Keywords: ENSO, Kelvin Waves, STSA, Tropopause

Abstrak

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara kualitatif karakteristik gelombang Kelvin ekuatorial atmosferik dengan menggunakan STSA (*space-time spectral analysis*) pada angin zonal level 100-hPa (tropopause) pada kondisi Normal (1990), La Niña (1988–1989), dan El Niño (1997–1998). Gelombang Kelvin merambat dengan kecepatan fase ~17.4 m/s ke arah timur dan secara dominan dibangkitkan di tropopause oleh konvektif tropis kuat. Energi gelombang Kelvin pada kondisi Normal, El Niño, dan La Niña sama-sama menguat di tropopause kepulauan Indonesia, tetapi pada kondisi La Niña energi gelombang Kelvin di tropopause kepulauan Indonesia lebih kuat dibandingkan dengan kondisi Normal. Pada kondisi El Niño energi gelombang Kelvin di tropopause Samudra Pasifik bagian tengah dan timur lebih kuat dibandingkan dengan kondisi Normal dan La Niña.

Kata Kunci : ENSO, Gelombang Kelvin, STSA, Tropopause

1. PENDAHULUAN

Gelombang Kelvin ekuatorial atmosferik merupakan gelombang skala planeter yang terdapat di atmosfer ekuator. Gelombang ini merambat ke arah timur dan mempunyai kecepatan zonal dan perturbasi geopotensial [tidak terdapat perturbasi angin meridional] yang meluruh secara Gaussian terhadap lintang dan berpusat di ekuator

(Matsuno 1966, Wallace & Kousky 1968, Holton 2004, Randel & Wu 2005, Setiawan 2010). Gelombang atmosfer di wilayah ekuator memiliki peran dalam interaksi antara troposfer dan stratosfer, khususnya transfer momentum zonal dan ozon (Yang *et al* 2011). Di samping itu, gelombang tersebut mempengaruhi QBO (*quasi-biennial oscillation*) (Wallace & Kousky 1968, Maruyama 1969, Yang *et al* 2011, Yang *et al* 2012) dan osilasi setengah tahunan di stratosfer atas (Lindzen & Holton 1968).

Secara teoritis, gelombang Kelvin dapat dipahami dengan cara menurunkan persamaan-persamaan gerak atmosfer yang dilinierkan pada bidang- β ekuator (Matsuno 1966, Holton & Lindzen 1968, Wallace & Kousky 1968, Lubis & Setiawan 2011). Aproksimasi bidang- β digunakan untuk menyelesaikan permasalahan osilasi linear baik di ekuator maupun lintang menengah (Lindzen 1967). Observasi terhadap gelombang Kelvin dilakukan oleh Wallace dan Kousky (1968) dengan menggunakan data radiosonde di stratosfer ekuatorial, Maruyama (1969) dengan menggunakan analisis spektrum pada data angin atas dan suhu di stratosfer-bawah ekuatorial, dan Randel dan Wu (2005) dengan menggunakan data suhu di troposfer-atas dan stratosfer-bawah ekuatorial.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji karakteristik gelombang Kelvin pada kondisi El Niño, La Niña, dan Normal. Pada kondisi El Niño awan konvektif dominan terbentuk di atas wilayah Pasifik tropis bagian tengah dan timur (Murphree & Reynolds 1995), sedangkan saat terjadi La Niña awan konvektif terbentuk lebih dominan di atas wilayah Indonesia. Salah satu sumber pemicu gelombang Kelvin adalah pelepasan panas laten oleh awan konvektif terutama awan jenis cumulonimbus (Lane 2000, Holton 2004, Randel & Wu 2005). Hipotesis awal pada penelitian ini adalah pada kondisi El Niño energi gelombang Kelvin akan kuat teramati di atas wilayah Samudra Pasifik bagian tengah dan timur, sedangkan pada kondisi La Niña energi gelombang Kelvin kuat di atas wilayah Indonesia.

2. DATA DAN METODE

Dalam penelitian ini data yang digunakan adalah data angin zonal (U) dan OLR (*outgoing longwave radiation*) dalam satu pita ekuator (15° LU– 15° LS) dengan resolusi $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. Data U adalah data harian dengan interval pengamatan enam jam yang diperoleh dari NCAR/NCEP *Reanalysis* I untuk kondisi Normal (Des 89–Feb 90 [DJF-N] & Sep 90–Nop 90 [SON-N]), La Niña (Des 88–Feb 89 [DJF-L] & Sep 88–Nop 88 [SON-L]), dan El Niño (Des 97–Feb 98 [DJF-E] & Sep 97–Nop 97 [SON-E]) di level

ketinggian 100-hPa (tropopause). El Niño 1997/1998 merupakan salah satu peristiwa El Niño paling kuat yang dimulai sekitar pada pertengahan tahun 1997 dan menghilang pada akhir musim gugur 1998 (Trenberth 1997, Barnston *et al* 1999). La Niña 1988/1989 dimulai pada bulan Mei 1988 dan berakhir pada bulan Juni 1989 (Trenberth 1997).

Tabel 1 : Episode hangat (merah) dan dingin (biru) berdasarkan ambang batas $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ rata-rata tiga bulan berjalan anomali SST di wilayah Niño 3.4 pada tahun 1988/1989 (La Niña), 1990 (Normal), dan 1997/1998 (El Niño) (Sumber: NOAA 2012).

Tahun	DJF	MAM	JJA	SON
1988	0.7	-0.2	-1.3	-1.6
1989	-1.7	-0.8	-0.3	-0.3
1990	0.1	0.2	0.3	0.3
1997	-0.4	0.4	1.7	2.4
1998	2.3	1	-0.5	-1.1

Berdasarkan Tabel 1, ONI (*Oceanic Niño Index*) minimum pada kondisi La Niña (1988/1989) terjadi pada periode SON dan DJF dan ONI maksimum pada kondisi El Niño (1997/1998) terjadi pada periode SON dan DJF. Oleh karena itu, untuk mengkaji karakteristik gelombang Kelvin pada tiga kondisi ini (Normal, La Niña, dan El Niño), periode dominan yang akan digunakan adalah SON dan DJF pada masing-masing kondisi, dengan kontrol adalah kondisi Normal (SON-N & DJF-N).

Data rata-rata harian OLR diperoleh dari NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*). Data OLR dapat digunakan untuk mengestimasi lokasi dan intensitas pusat awan konvektif tropis dan panas laten. Nilai anomali OLR diperoleh dengan cara menghilangkan efek seasonal dan tren pada data, menggunakan teknik pemulusan FFT. Semakin rendah nilai anomali OLR, menunjukkan semakin tebal dan besar tutupan awan, sehingga energi pelepasan panas laten akan semakin tinggi terjadi.

Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah STSA (*Space-Time Spectral Analysis*). Metode ini digunakan untuk mempelajari gelombang yang merambat secara zonal dan mendekomposisikan medan data kedalam komponen ruang dan waktu (bilangan gelombang dan frekuensi) yang merambat ke arah barat dan timur (Hayashi 1982, Wheeler & Kiladis 1999 [selanjutnya disebut WK99]). Perbedaan penelitian ini dengan WK99 terletak pada penggunaan data, dimana data utama yang

kami gunakan befokus pada komponen angin yang akhirnya akan dikombinasikan dengan variasi nilai OLR anomali.

Untuk menghindari aliasing; tren dan siklus musiman pada data angin zonal dihilangkan. Proses kompleks FFT (*Fast Fourier Transform*) dilakukan pada medan data dalam bujur untuk mendapatkan koefisien-koefisien Fourier pada masing-masing waktu dan lintang. Kemudian, dilakukan proses kompleks FFT lanjut dalam waktu terhadap koefisien-koefisien Fourier tersebut untuk merekonstruksi spektrum dalam fungsi bilangan gelombang dan frekuensi pada masing-masing lintang. Spektrum daya (*power spectrum*) angin zonal dirata-ratakan selama waktu kajian dan dijumlahkan dalam lintang (15° LU– 15° LS) (WK99). Panjang *temporal window* (nDayWin) yang digunakan dalam STSA adalah 80 hari, sedangkan panjang hari untuk melewati antar *temporal windows* (nDaySkip) adalah 30 hari.

Dalam struktur horizontal, gelombang ekuatorial linier dapat dibagi menjadi tipe simetris dan asimetris terhadap ekuator dalam fungsi lintang (ϕ). Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut: $U(\phi) = UA(\phi) + US(\phi)$, dimana $UA(\phi) = (U(\phi) - U(-\phi))/2$ merupakan komponen asimetris, dan $US(\phi) = (U(\phi) + U(-\phi))/2$ merupakan komponen simetris (WK99). Dimana, untuk gelombang dengan mode meridional (n) ganjil (genap), struktur horizontal dari medan perturbasi adalah simetris (asimetris) terhadap ekuator (WK99). Gelombang Kelvin memiliki $n = -1$ (ganjil) (Matsuno 1966) sehingga medan data dari gelombang Kelvin adalah simetris terhadap ekuator.

Dalam penelitian ini, produk utama dari STSA adalah spektrum daya angin zonal dalam domain bilangan gelombang (k)-frekuensi (ω), dimana bilangan gelombang maksimum adalah 15 dan frekuensi (*nyquist*) adalah 0.5 siklus per hari. Selain itu, dalam penelitian ini, kami hanya menggunakan komponen simetris, mengingat struktur horizontal gelombang Kelvin memiliki karakteristik simetris relatif terhadap lintang. Proses filtrasi pada gelombang Kelvin dilakukan dengan kriteria sebagai berikut: bilangan gelombang (k) adalah 1–14, kedalaman ekuivalen (*equivalent depth* [H]) adalah 8–90 m, dan periode (T) adalah 2.5–20 hari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

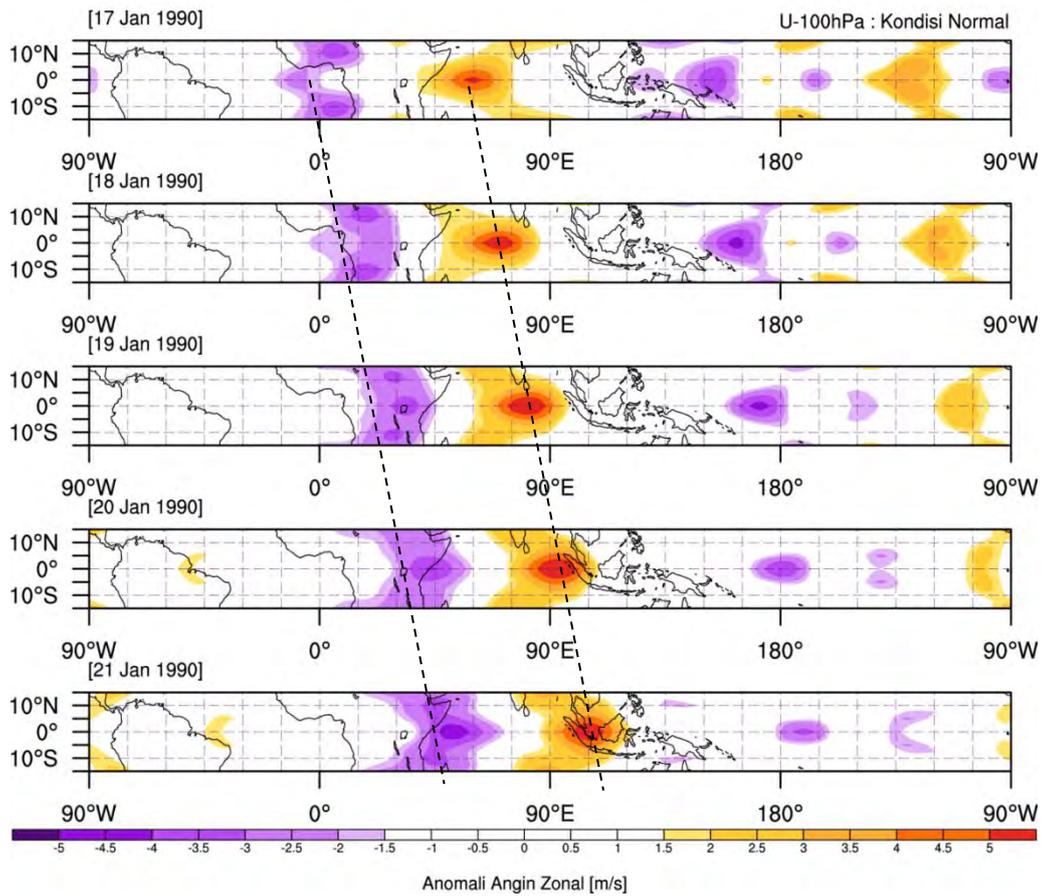
3.1 Karakteristik Gelombang Kelvin pada Kondisi Normal, El Niño, dan La Niña

Setelah melakukan invers terhadap spektrum kuasa bilangan gelombang-frekuensi dengan $k=1-14$, $H=8-90$ m, dan $T=2.5-20$ hari, nilai rekonstruksi perturbasi angin zonal yang berasosiasi kuat dengan gelombang Kelvin dapat diperoleh.

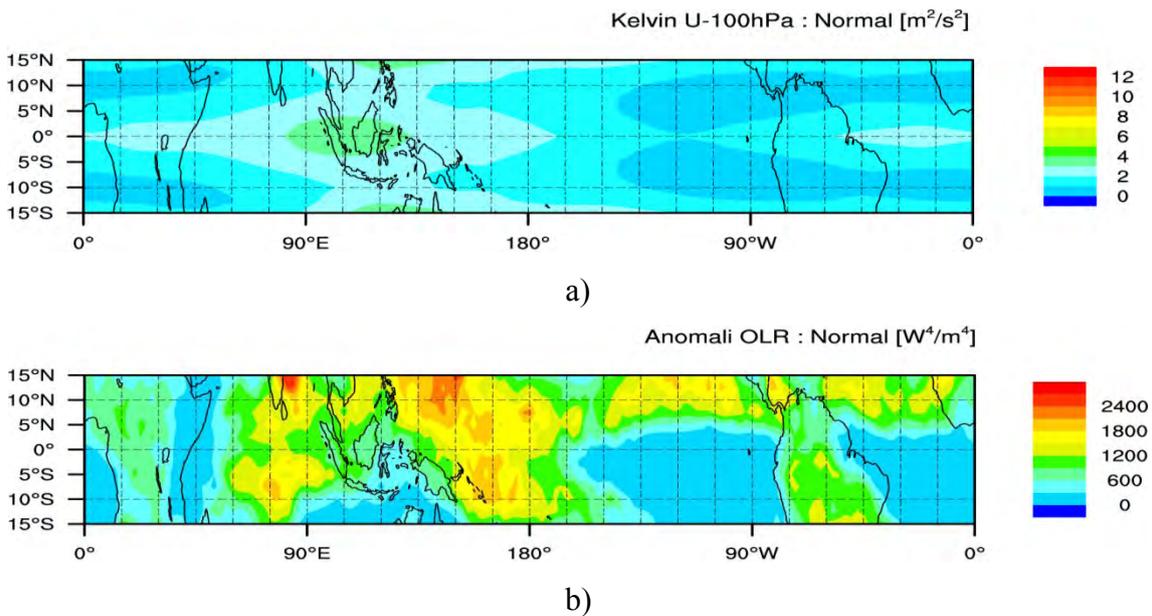
Berdasarkan Gambar 1, ciri-ciri utama yang terlihat dari gelombang Kelvin yang telah diisolasi adalah bahwa perturbasi angin zonal bersifat simetris dan memiliki puncak di sekitar ekuator. Nilai modulasi angin zonal meluruh secara eksponensial dengan bertambahnya posisi lintang. Arah fasa perambatan adalah timuran, mengikuti fungsi kurva dispersif teoritik gelombang Kelvin, dan dengan laju perambatan berkisar pada ~ 17.4 m/s. Karakteristik gelombang Kelvin yang diperoleh ini bersesuaian dengan konsep pemodelan linear gelombang Kelvin yang diturunkan dalam basis persamaan perairan dangkal barotropik (Matsuno 1966, Wallace & Kousky 1968, Holton 2004, Randel & Wu 2005, Setiawan 2010).

Gambar 2a–7a menunjukkan distribusi spasial varians angin zonal untuk gelombang Kelvin pada masing-masing kondisi kajian. Secara umum nilai varians perturbasi angin zonal yang berasosiasi dengan gelombang Kelvin memiliki puncak di sekitar ekuator, dan meluruh dengan bertambahnya posisi lintang. Pola yang diperoleh ini secara umum bersesuaian dengan nilai osilasi perturbasi OLR gelombang Kelvin yang ditemukan sebelumnya oleh WK99 (Gambar 7e dan 7f dalam WK99).

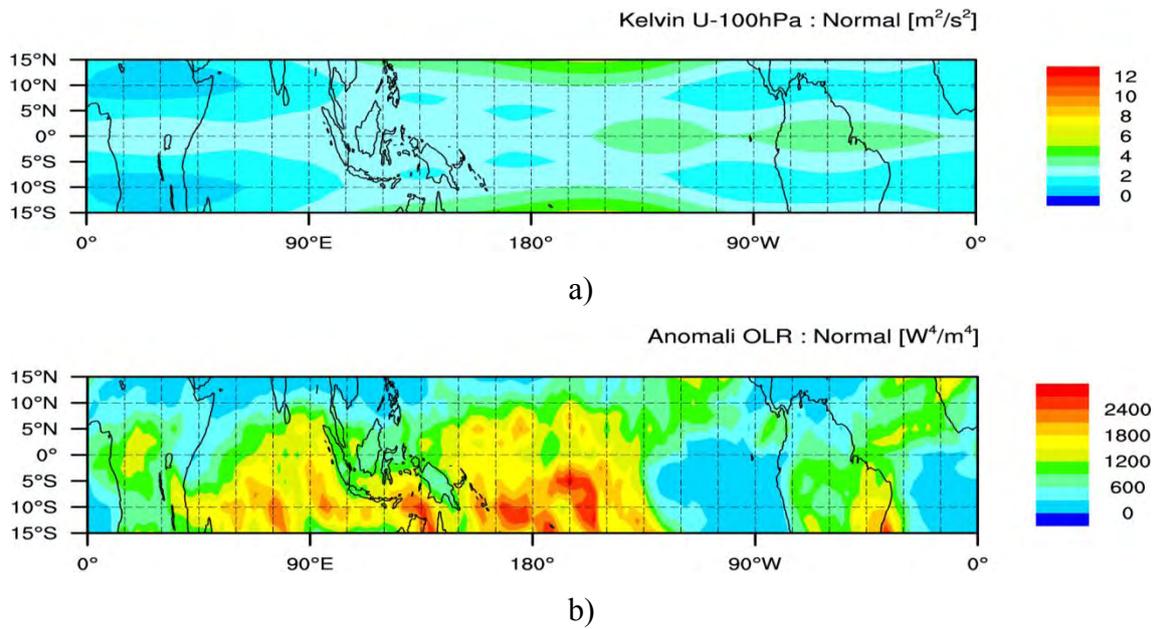
Pada periode SON-N (Gambar 2a), energi gelombang Kelvin menguat di tropopause benua Afrika, dan Samudra Pasifik bagian barat sampai dengan Samudra Atlantik. Nilai maksimum amplitudo gelombang pada kondisi normal SON-N berada di tropopause kepulauan Indonesia. Kuatnya energi gelombang Kelvin pada periode kajian ini bersesuaian dengan semakin rendahnya nilai varians anomali OLR yang teramati (Gambar 2b), khususnya di sekitar kepulauan Indonesia. Hal ini mengindikasikan bahwa gelombang Kelvin pada periode ini umumnya dipicu oleh pelepasan panas laten dari aktivitas pertumbuhan awan-awan konvektif. Pada periode DJF-N (Gambar 3a), energi yang teramati relatif lebih kuat dan menyebar cukup seragam di sepanjang pita ekuator. Perluasan nilai varians ini bersesuaian dengan perluasan secara garis bujur distribusi keawanan yang diindikasikan oleh penyebaran nilai anomali OLR yang lebih rendah dibandingkan pada periode SON-N



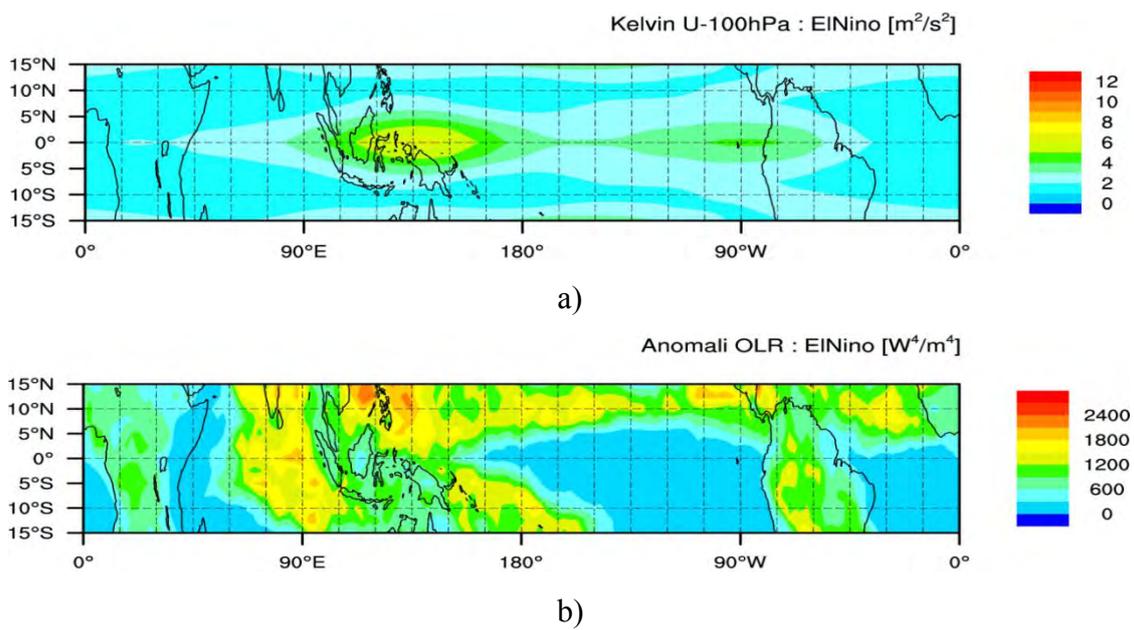
Gambar 1 : Gelombang Kelvin ekuatorial dengan bilangan gelombang 1–14, periode 2.5–20 hari, dan kedalaman ekuivalen 8–90 m. Arah propagasi adalah timuran.



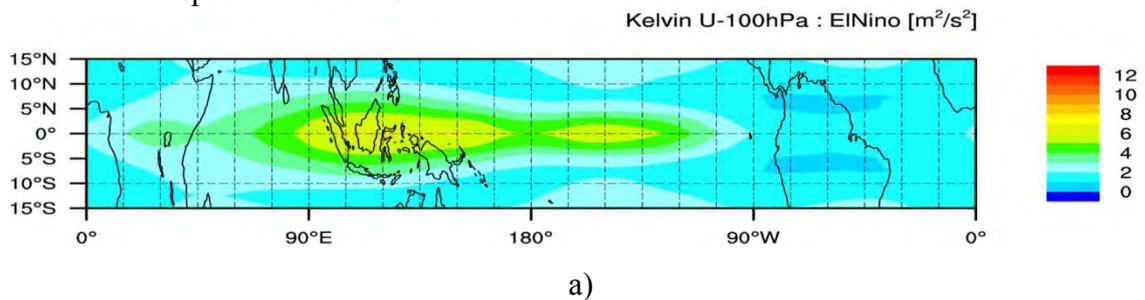
Gambar 2 : Periode SON-N a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.

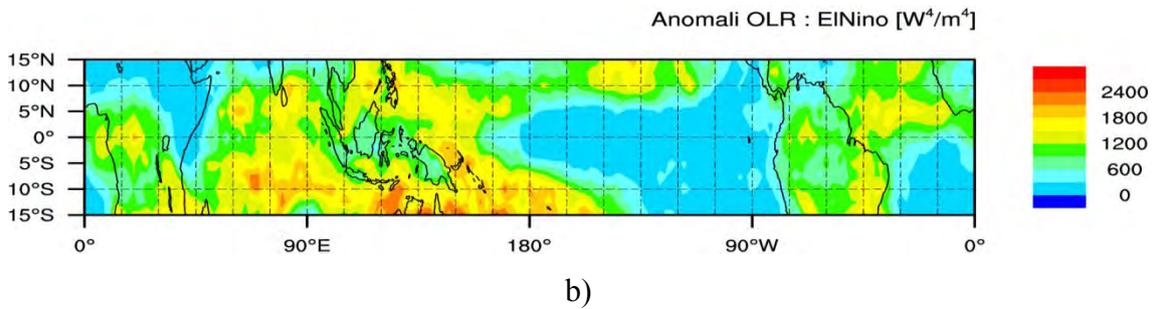


Gambar 3 : Periode DJF-N a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.



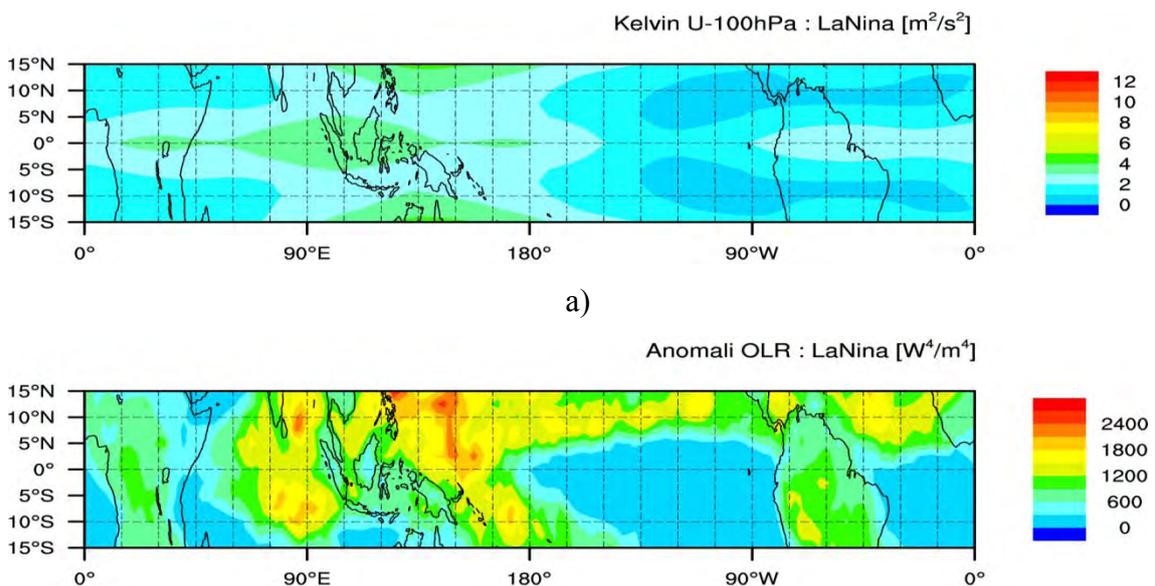
Gambar 4 : Periode SON-E a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.





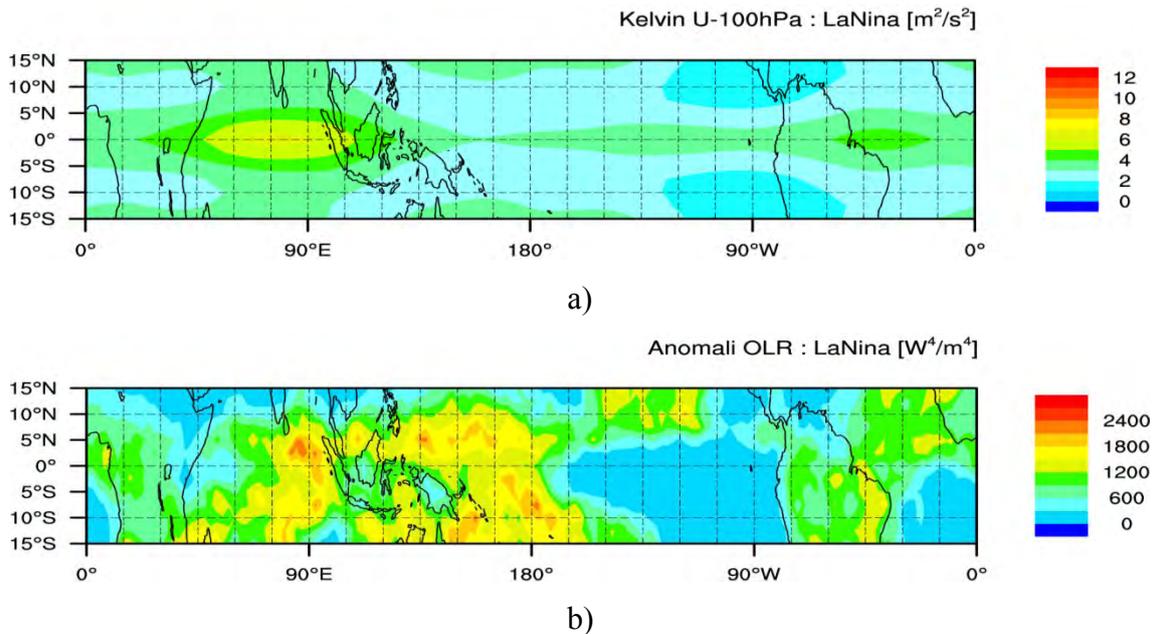
Gambar 5 : Periode DJF-E a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.

Pada periode El-Niño SON-E (Gambar 4a), energi gelombang Kelvin yang teramati umumnya lebih kuat dibandingkan pada kondisi Normal. Tingginya sabuk keawanan yang terbentuk di atas Samudra Pasifik menjadi sumber dinamo utama pemicu bangkitnya gelombang ini. Proses pelepasan panas laten yang ditandai dengan tingginya nilai SST pada tahun-tahun El-Niño menyediakan energi yang substansial untuk mengeksitasi perambatan vertikal dan horizontal gelombang ini hingga mencapai lintang tengah. Selain itu, rendahnya sabuk keawanan pada bagian timur Pasifik, yang diindikasikan dengan rendahnya nilai OLR anomali, dapat digunakan juga untuk menspekulasi energi pemicu gelombang Kelvin via panas laten yang dilepaskan oleh proses mikrofisik awan-awan konvektif. Selanjutnya, pada periode DJF-E, nilai varians menjadi dua kali lebih kuat dan lebih meluas ke timur Samudra Atlantik. Tingginya aktivitas pada DJF-E ini, merupakan implikasi dari penguatan aktivitas gelombang Kelvin di kepulauan maritim dan Samudra Hindia, yang pada akhirnya merambat ke timur dan membawa energi hingga ke tropopause Samudra Pasifik bagian tengah dan barat (hasil kalkulasi energi kinetik tidak ditampilkan disini).



b)

Gambar 6 : Periode SON-L a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.

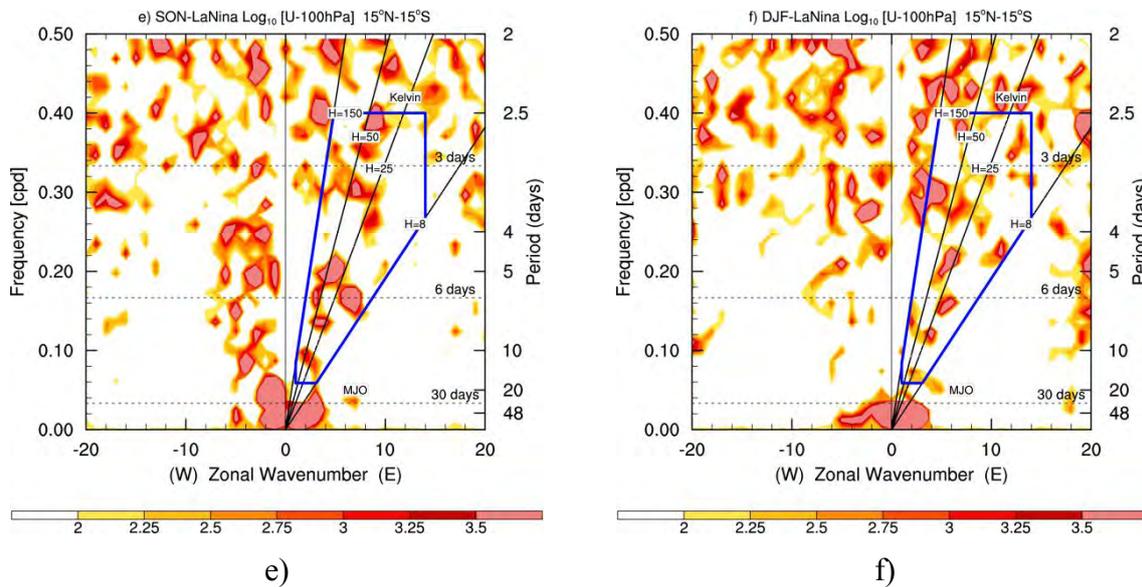


Gambar 7 : Periode DJF-L a) distribusi spasial varians gelombang Kelvin b) distribusi spasial anomali OLR.

Pada kondisi La Niña energi gelombang Kelvin di tropopause mengalami pergeseran ke arah barat, dimana varians aktivitas gelombang pada kepulauan Indonesia dan Samudra Hindia memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah lainnya dalam satu pita ekuator (Gambar 6a & Gambar 7a). Sama halnya dengan periode El-Niño, penguatan aktivitas ini disebabkan oleh awan konvektif hasil transfer massa uap air dari proses kesetimbang kontinuitas masa udara pada kondisi La-Niña. Hasilnya, aktivitas gelombang Kelvin cenderung lebih dominan terbentuk di atas kepulauan Indonesia dibandingkan di wilayah timur Samudra Pasifik. Energi gelombang Kelvin pada kondisi Normal dan La Niña terlihat sama-sama menguat di tropopause kepulauan Indonesia. Tetapi pada kondisi La Niña energi gelombang Kelvin di atas Indonesia teramati jauh lebih kuat dibandingkan saat kondisi Normal.

3.2 Spektrum Bilangan Gelombang-Frekuensi pada Kondisi Normal, El Niño, dan La Niña

Eksistensi gelombang Kelvin dengan menggunakan STSA ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan hasil STSA, terdapat aktivitas gelombang Kelvin pada semua waktu kajian pada kondisi Normal, El Niño, dan La Niña. Namun, aktifitas gelombang



Gambar 8 : Komponen simetris spektrum daya (m^2/s^2) bilangan gelombang-frekuensi angin zonal di level 100-hPa untuk a) SON-N b) DJF-N c) SON-E d) DJF-E e) SON-L f) DJF-L.

Secara teoritik, laju gelombang (c) dapat diperoleh dengan menggunakan nilai kedalaman ekuivalen (H) berdasarkan persamaan gelombang perairan dangkal barotropik dalam bidang beta, $c = \sqrt{gH}$, dimana g adalah percepatan gravitasi. WK99 mengisolasi gelombang Kelvin pada kisaran nilai $H=8-90$ m, dimana sinyal varians gelombang Kelvin dominan terletak di sekitar $H=25$ m (Gambar 6b dalam WK99), sedangkan dalam penelitian ini nilai maksimum spectra daya umumnya menempati posisi $H=8-150$ m, dengan sinyal varians gelombang Kelvin dominan terletak di sekitar $H=50$ m (Gambar 8b dan 8d). Nilai ini menunjukkan bahwa laju perambatan gelombang Kelvin yang termati pada penelitian ini memiliki laju fasa yang lebih cepat dibandingkan yang ditemukan oleh WK99. Hal ini disebabkan karena gelombang Kelvin yang termati pada level 100-hPa merupakan fase transisi dari gelombang yang bersifat lembab “*moist*” menuju gelombang yang bersifat kering “*dry*”. Gelombang yang ter-*couple* secara kuat dengan proses konvektif cenderung memiliki bilangan gelombang vertikal dan kedalaman ekuivalen yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan gelombang kering, dan hal ini akhirnya akan berimplikasi pada perlambatan laju fasa gelombang.

4 KESIMPULAN

Gelombang Kelvin merambat dengan kecepatan fasa sekitar ~ 17.4 m/s ke arah timur. Tingginya sabuk keawanan yang terbentuk di atas Samudra Hindia dan Pasifik menjadi sumber dinamo utama pemicu bangkitnya gelombang Kelvin. Pada kondisi El-Niño (La-Niña), aktivitas gelombang Kelvin bermigrasi ke arah timur (barat), mengikuti proses pertumbuhan awan konvektif dan pelepasan panas laten di atas samudra. Proses pelepasan panas laten yang ditandai dengan nilai SST yang tinggi pada tahun-tahun El-Niño menyediakan energi yang substansial untuk mengeksitasi perambatan vertikal dan horizontal gelombang Kelvin hingga mencapai lintang tengah. Analisis STSA menunjukkan bahwa eksistensi gelombang Kelvin pada periode El-Niño DJF-E memiliki nilai spektrum yang paling dominan dibandingkan dengan periode-periode lainnya. Tingginya laju fasa pada penelitian ini menunjukkan bahwa gelombang Kelvin yang teramati merupakan gelombang transisi dari lembab *„moist“* menuju kering *„dry“*.

DAFTAR RUJUKAN

- Barnston, A. G., Glantz, M. H., and He, Y., Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in SST Forecasts during the 1997–98 El Niño Episode and the 1998 La Niña Onset, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80(2), 217–243, 1999.
- Hayashi, Y., Space-Time Spectral Analysis and Its Applications to Atmospheric Waves, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 60(1), 156–171, 1982.
- Holton, J. R., *An Introduction to Dynamics Meteorology*, Ed ke-4, Burlington: Elsevier, 2004.
- and Lindzen, R. S., A Note on Kelvin Waves in the Atmosphere, *Mon. Wea. Rev.*, 96(6), 385–386, 1968.
- Lane, T. P., Reeder, M. J., and Clark. T. L., Numerical Modeling of Gravity Wave Generation by Deep Tropical Convection, *J. Atmos. Sci.*, 58, 1249–1274, 2000.
- Lindzen, R. S., Planetary Waves on Beta-Planes, *Mon. Wea. Rev.*, 95(7), 441–451, 1967.
- and Holton, J. R., A Theory of the Quasi-Biennial Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 25, 1095–1107, 1968.
- Lubis, S. W. and Setiawan. S., Theoretical Simulation of Free Atmospheric Planetary Waves on an Equatorial Beta-Plane, *J. Theor. Comput. Stud.*, 1–17, 2011.
- Maruyama, T., Long-Term Behavior of Kelvin Waves and Mixed Rossby-Gravity Waves, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 47(4), 245–254, 1969.

- Matsuno, T., Quasi-geostrophic Motions in the Equatorial Area, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 44(1), 25–42, 1966.
- Murphree, T. and Reynolds, C., El Niño and La Niña Effects on the Northeast Pacific: The 1991–1993 and 1988–1989 Events, *CalCOFI*, 36, 45–56, 1995.
- [NOAA] National Oceanic & Atmospheric Administration, Cold and warm episodes by season, [terhubung berkala], http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml, [17 Nov 2012], 2012.
- Randel, W. J. and Wu, F., Kelvin Wave Variability near the Equatorial Tropopause Observed in GPS Radio Occultation Measurements, *J. Geophys. Res.*, 110, 1–13, 2005.
- Setiawan, S., Perumusan Struktur Horizontal dan Struktur Vertikal Gelombang Atmosfer Ekuatorial Planeter. Bogor: Institut Pertanian Bogor, 2010.
- Trenberth, K. E., The Definition of the El Niño, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(12), 2771–2777, 1997.
- Wallace, J. M. and Gousky, V. E., Observational Evidence of Kelvin Waves in the Tropical Stratosfer, *J. Atmos. Sci.*, 25, 900–907, 1968.
- Wheeler, M. and Kiladis, G. N., Convectively Coupled Equatorial Waves: Analysis of Clouds and Temperature in the Wavenumber-Frequency Domain, *J. Atmos. Sci.*, 56, 374–399, 1999.
- Yang, G. Y., Hoskins, B. J., and Slingo, J. M., Equatorial Waves in Opposite QBO Phases, *J. Atmos. Sci.*, 68, 839–862, 2011.
- , and Gray, L., The Influence of the QBO on the Propagation of Equatorial Waves into the Stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 69, 2959–2982, 2012.