

Deteksi pengaruh gelombang Kelvin pada fluktuasi uap air di tropopause menggunakan model inversi

Dita Fatria Andarini^{1*}, Noersomadi¹

¹Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

*Email koresponden: dita.fatria@lapan.go.id

Direvisi: 2019-11-18. Diterima: 2020-02-21

©2020 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak Analisis pengaruh gelombang ekuatorial Kelvin terhadap fluktuasi uap air (H_2O) di lapisan tropopause (paras tekanan udara 100 hPa), dilakukan dengan memanfaatkan data *Microwave Limb Sounder* (MLS) Aura versi 4.2 dan angin zonal *NCEP DOE Reanalysis II* sepanjang tahun 2017. Model inversi gelombang melalui pendekatan *Newtonian* diterapkan untuk mencari parameter amplitudo (A) dan fasa (ϕ) gelombang dominan pada variasi anomali H_2O (H_2O^*). Hasil penyelarasan model inversi menunjukkan perambatan H_2O^* positif ke arah timur bersesuaian dengan angin zonal (U) positif (angin baratan) yang identik dengan pergerakan gelombang Kelvin. Perambatan ini didominasi oleh bilangan gelombang k_1 dengan A_1 dan ϕ_1 berturut-turut sebesar 0,44 dan $21,1^\circ$. Penulis menemukan bahwa variasi uap air dipengaruhi oleh perubahan angin baratan menjadi angin timuran dan konvergensi sebesar $0,15 \times 10^{-5} s^{-1}$. Analisis komposit diagram relatif terhadap nilai maksimum H_2O^* menunjukkan adanya pengaruh gelombang ekuatorial Kelvin terhadap distribusi uap air di tropopause. Penelitian terkait pengembangan model kopel troposfer dan stratosfer perlu mempertimbangkan proses dinamika gelombang Kelvin dan proses radiatif dari konsentrasi uap air di tropopause.

Kata kunci: uap air; gelombang Kelvin; tropopause; model inversi

Abstract Analysis on the influence of equatorial Kelvin wave on the fluctuations in water vapor (H_2O) at tropopause (100 hPa air pressure level) has been done utilizing *Microwave Limb Sounder* (MLS) Aura version 4.2 and zonal wind (U) from *NCEP DOE Reanalysis II* data throughout the year of 2017. The inverse wave model using *Newtonian* approximation has been applied to determine the dominant of both wave amplitude (A) and phase (ϕ) parameters on the H_2O anomaly (H_2O^*). The fitting of inverse modeling result showed an eastward propagation of positive H_2O^* associated with positive U (westerly wind) which is identical as Kelvin wave movement. The propagation is dominated by wavenumber k_1 , where A_1 and ϕ_1 is 0.44 and is 21.1° , respectively. The authors found that water vapor variations were influenced by the reversal of zonal wind from easterly to easterly and the convergence as large as $0,15 \times 10^{-5} s^{-1}$. The composite analysis relative to the maximum value H_2O^* showed the influence of equatorial Kelvin wave in the water vapor distribution at tropopause. The research on the development of the troposphere –stratosphere coupling model may need to consider the dynamical process of the equatorial Kelvin wave and radiative process of water vapor concentration in the tropopause.

Keywords: water vapor; Kelvin wave; tropopause; inversion model

PENDAHULUAN

Stratosphere–Troposphere Exchange (STE) merupakan salah satu bagian dari sirkulasi umum atmosfer dimana terjadi pertukaran massa udara dan unsur–unsur kimia di kedua lapisan tersebut melalui tropopause, lapisan transisi antara troposfer menuju stratosfer (Holton *et al.*, 1995; Fujiwara *et al.*, 2001). Di wilayah tropis, lapisan ini dinamakan dengan *Tropical Tropopause Layer* (TTL) atau lapisan tropopause tropis (Fueglistaler *et al.*, 2009). Kajian mengenai TTL menjadi menarik bukan hanya karena memisahkan dua lapisan yang memiliki karakteristik berbeda baik secara dinamik, radiatif maupun kimia, tetapi juga terdapat transport udara tak berbalik antar keduanya (Gettleman *et al.*, 2000). Pertukaran udara di dalam TTL memiliki peranan penting terhadap dinamika iklim global.

Solomon *et al.* (2010) menemukan bahwa peningkatan uap air di stratosfer pada tahun 1980–2000 berkontribusi terhadap kenaikan temperatur global. Namun, setelah tahun 2000 terjadi penurunan konsentrasi H_2O di stratosfer yang menyebabkan kenaikan temperatur global relatif lebih

lambat. Sehingga penelitian terkait variasi uap air di sekitar TTL sangat penting dilakukan mengingat peranannya terhadap iklim. Proses–proses yang mengontrol uap air di TTL berawal dari skala harian seperti pertumbuhan awan konvektif, skala antar–musiman diantaranya dinamika gelombang planeter, siklus tahunan dan antar–tahunan.

Solomon *et al.* (2010) menemukan bahwa peningkatan uap air di stratosfer pada tahun 1980–2000 berkontribusi terhadap kenaikan temperatur global. Namun, setelah tahun 2000 terjadi penurunan konsentrasi H_2O di stratosfer yang menyebabkan kenaikan temperatur global relatif lebih lambat. Dengan demikian Sehingga penelitian terkait variasi uap air di sekitar TTL sangat penting dilakukan mengingat peranannya terhadap iklim. Proses–proses yang mengontrol uap air di TTL berawal dari skala harian seperti pertumbuhan awan konvektif, skala antar–musiman diantaranya dinamika gelombang planeter, siklus tahunan dan antar–tahunan.

Secara umum pemodelan sistem iklim global terkait

dengan parameterisasi uap air dan dinamika gelombang planeter di atmosfer seperti gelombang Kelvin yang mengarah ke timur dan gelombang pencampuran gravitas-Rossby yang mengarah ke barat (Nishimoto & Shiotani, 2011; Kawatani *et al.*, 2014). Fujiwara *et al.* (2001) menunjukkan saat terjadi pecah gelombang Kelvin yang berkaitan dengan pertumbuhan awan konvektif di Samudera Hindia bagian barat, terdapat pertukaran udara di sekitar TTL berupa peningkatan ozon di troposfer atas dan peningkatan uap air di stratosfer bawah. Akan tetapi, distribusi global variasi uap air di TTL terhadap pengaruh gelombang Kelvin masih belum jelas. Oleh karenanya, penulis termotivasi untuk menyelidiki fluktuasi uap air di sekitar TTL secara global.

Pengamatan profil uap air di stratosfer meliputi pengamatan dari permukaan menggunakan balon (Hasebe *et al.*, 2018) dan pengukuran dari satelit seperti *Microwave Limb Sounder* (MLS) Aura (Stone *et al.*, 2000). Karena keterbatasan pengamatan dari permukaan untuk penyelidikan secara global, maka penelitian ini akan fokus menganalisis data uap air dari MLS Aura yang memiliki sapuan horizontal sekitar 165 km dan resolusi vertikal 3 km pada rentang ketinggian 100 – 1 hPa (Hurts *et al.*, 2014). Tingkat kepercayaan profil uap air hasil pengamatan MLS Aura sebesar 0,1 *part per million volume* (ppmv) di paras 100 hPa, yaitu ketinggian referensi TTL (Livesey *et al.*, 2013).

Pemodelan atmosfer global meliputi model simulasi dinamik dan statistik serta model inversi. Model inversi merupakan pencarian koefisien persamaan matematik melalui penyelarasan data pengamatan. Pendekatan menggunakan model inversi dapat dimanfaatkan untuk pencarian parameter gelombang atmosfer ekuator (gelombang Kelvin). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh gelombang Kelvin di ekuator terhadap fluktuasi uap air (H_2O) di 100 hPa. Analisis fluktuasi uap air dari data observasi MLS Aura versi 4.2 akan fokus pada aplikasi model inversi untuk penyelarasan data fluktuasi H_2O (Livesey *et al.*, 2015)..

METODE PENELITIAN

Data

Penelitian ini menggunakan data MLS Aura sebagai data utama untuk melihat variasi H_2O di paras 100 hPa (tropopause) sepanjang ekuator pada tahun 2017.. dengan asumsi bahwa periode ini termasuk kategori kondisi normal yaitu tidak ada fenomena gangguan iklim global seperti El Nino dan La Nina (Trenberth & Hoar 1997; Son *et al.*, 2017). Data H_2O MLS Aura yang digunakan yaitu data level 2 versi terbaru yang diturunkan dari *channel* 190 GHz dan memiliki bias lebih rendah dibanding versi 3.3 dan 2.2 (Hurst *et al.*, 2014; Livesey *et al.*, 2011). Adapun validasi data uap air dari MLS sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh Lambert *et al.* (2007) dengan ketelitian mencapai ~0,2–0,3

ppmv dan resolusi vertikal ~3–4 km di stratosfer. Secara saintifik, data uap air MLS Aura memiliki ketelitian tinggi pada level tekanan 300 hPa–0,002 hPa. Adapun Lambert *et al.* (2007) melakukan validasi data MLS Aura, dengan ketelitian mencapai $\approx 0,2-0,3$ ppmv.pada paras tekanan 68–0,01 hPa melalui simulasi dan membandingkannya dengan data observasi *ground-based, ballon-borne* dan *Ballon Observation of the Stratosphere* (BOS) Gondola.

Data angin zonal (U) harian dari *NCEP DOE Reanalysis II* digunakan untuk melihat pengaruh angin terhadap variasi H_2O di paras 100 hPa. Data *NCEP DOE Reanalysis II* berupa grid dengan ukuran horizontal $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (bujur \times lintang) di 17 paras tekanan dari 1000 hPa hingga 10 hPa (Kanamitsu *et al.*, 2002). Adapun ini diperoleh dari (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep_reanalysis2.html).

METODE PENELITIAN

Model inversi gelombang Kelvin

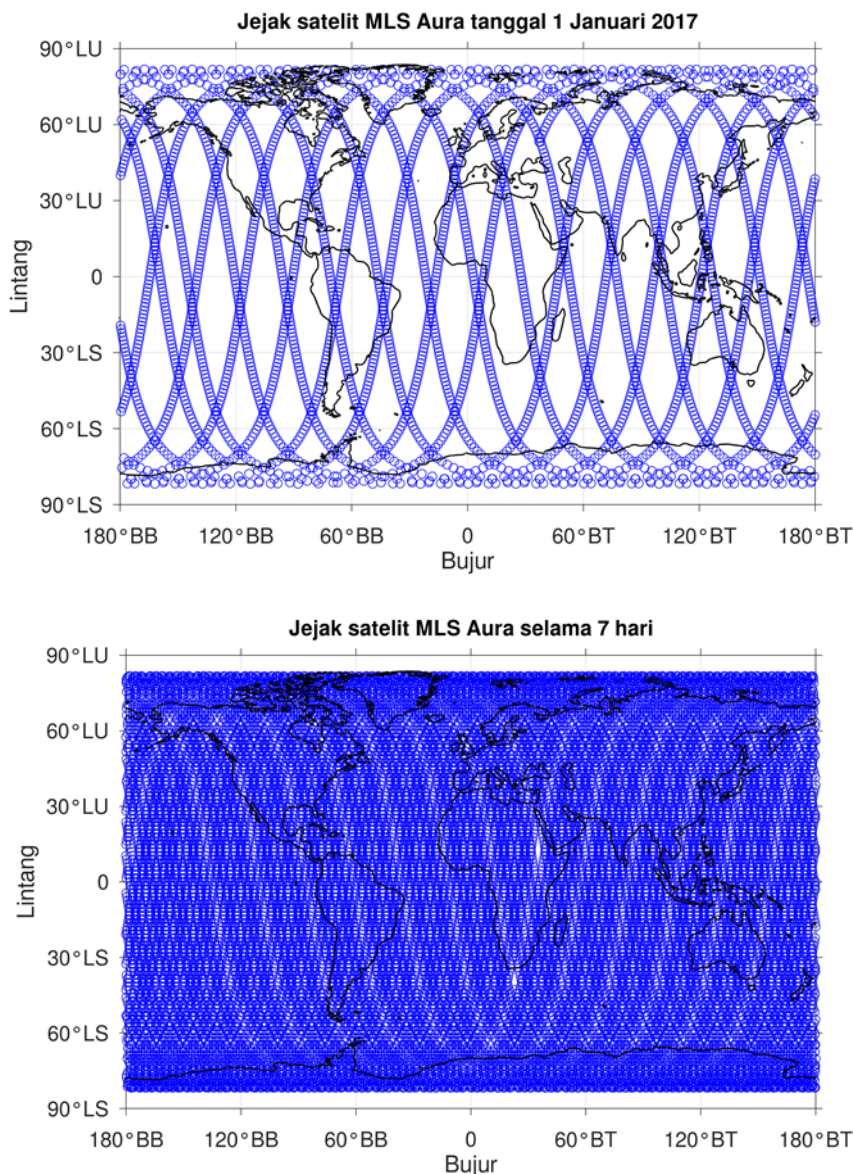
Data MLS Aura berupa sapuan acak dengan ~3500 profil vertikal per hari (Livesey *et al.*, 2011). Gambar 1 menunjukkan contoh data sapuan uap air MLS Aura pada tanggal 1 Januari 2017. Data sapuan acak satelit MLS Aura disusun ke dalam grid berukuran $5^\circ \times 5^\circ$ (bujur \times lintang). Karena satelit MLS Aura mengikuti orbit kutub, diperlukan beberapa hari untuk memenuhi sapuan penuh sepanjang ekuator seperti pada gambar 2. Oleh sebab itu, penulis menerapkan perata-rataan berjalan sepanjang 7 hari (hari ketiga sebagai hari sentral) menggunakan persamaan 1, dengan pembobotan mempertimbangkan koordinat lokasi dan waktu profil sapuan (Randel *et al.*, 2005; Kedzierski *et al.*, 2016). Adapun penelitian ini diawali dengan melihat pola anomali H_2O (H_2O^*), yakni nilai penyimpangan dari rerata H_2O pada interval lintang $10^\circ LS$ sampai $10^\circ LU$ di paras 100

$$\bar{x}_{MA7} = \frac{X_{t-2} + X_{t-1} + X_t + X_{t+1} + X_{t+2} + X_{t+3} + X_{t+4}}{7}$$

hPa.

(1)

Untuk melihat propagasi gelombang Kelvin di 100 hPa, penulis mengaplikasikan persamaan inversi non-linier (persamaan 2) melalui pendekatan Newtonian untuk memperoleh penyelarasan gelombang pada fluktuasi H_2O^* (Grandis, 2009). Asumsi yang digunakan yaitu gelombang Kelvin memiliki nilai amplitudo terbesar di ekuator yang didominasi oleh dua bilangan gelombang horizontal k (Tsai *et al.*, 2004; Noersomadi & Hadi, 2010). Nilai amplitudo (A) dan fasa (φ) diperoleh dengan memasukkan nilai H_2O^* di setiap grid 5° bujur (x). Setelah memperoleh nilai A dan φ , penulis mereproduksi H_2O^* hasil model inversi. Kemudian



Gambar 1. Data sapuan uap air MLS Aura pada (a) tanggal 1 Januari 2017, dan (b) selama 7 hari tanggal 1-7 Januari 2017

melakukan tahapan tersebut setiap hari sentral sepanjang 2017.

$$H_2O^*(x) = \sum_{k=1}^2 A_k \cos k(x - \varphi_k) \quad (2)$$

Analisis komposit terhadap bujur relatif

Analisis persistensi gelombang Kelvin di sepanjang ekuator dilakukan melalui tahapan analisis komposit terhadap bujur relatif. Definisi bujur relatif ($x_r = 0^\circ$) adalah lokasi x dimana ditemukan H_2O^* hasil model mencapai maksimum diantara 120°BB dan 120°BT . Kemudian melakukan perata-rataan komposit H_2O^* terhadap x_r . Langkah ini diterapkan pula pada variabel U dan turunan pertama U terhadap x ($\frac{\partial U}{\partial x}$), yang dapat digunakan untuk menganalisis divergensi.

Persamaan 3 merupakan teorema divergensi satu dimensi dan pendekatan numerik yang menggunakan beda tengah (Holton, 2004). Nilai positif (negatif) dari $\frac{\partial U}{\partial x}$ menunjukkan proses divergensi (konvergensi).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_{n+1} - U_{n-1}}{2 \cdot \Delta x}$$

Dalam model dinamika atmosfer terdapat pendekatan gerak udara yang dikenal dengan arus geostropik, yaitu gerak yang terjadi akibat kesetimbangan antara gaya *Coriolis* sebagai fungsi lintang dan gaya gradien tekanan. Arus geostropik pada umumnya terlihat di lintang menengah. Matsuno (1966) adalah orang yang pertama kali mengembangkan model quasi gerak geostropik khusus untuk wilayah lintang rendah atau tropis. Model perambatan

gelombang ekuatorial dapat diasumsikan seperti gerak fluida pada perairan dangkal yang didekati dengan linierisasi persamaan gerak dan persamaan kontinuitas. Gerak gelombang di wilayah ekuator dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut melalui pendekatan non-dimensional:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} - yV + \frac{\partial \phi}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + yU + \frac{\partial \phi}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

Dimana U , V , dan ϕ adalah variabel tak bebas terhadap x , y dan t pada persamaan di bawah ini:

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U} \\ \hat{V} \\ \hat{\phi} \end{bmatrix} e^{i(kx - \omega t)} \tag{5}$$

Dengan U dan V merupakan komponen angin zonal dan meridional, ϕ adalah ketinggian potensial, x merepresentasikan bujur, k adalah bilangan gelombang dalam arah bujur dan ω menyatakan frekuensi gelombang.

Substitusi U dan ϕ dari persamaan 3 dan 4 akan diperoleh persamaan diferensial orde-2:

$$\frac{d^2 V}{dy^2} + \left(\omega^2 - k^2 - \frac{k}{\omega} - y^2 \right) V = 0 \tag{6}$$

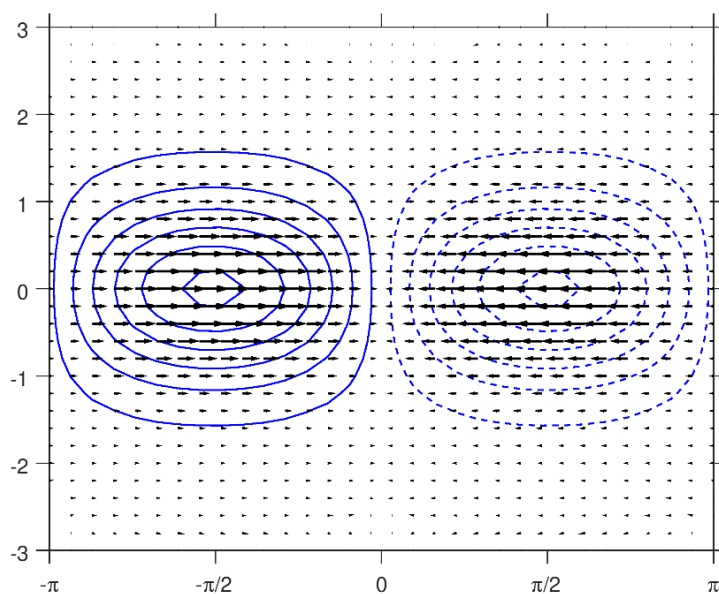
Untuk kondisi ekuator dimana $y \approx 0$, maka syarat batas persamaan (6) adalah $V \rightarrow 0$ untuk y semakin besar. Dengan demikian persamaan (6) dapat diselesaikan dengan hubungan dispersi antara frekuensi ω dan bilangan gelombang k yang mengikuti polinomial Hermit.

$$\omega^2 - k^2 - \frac{k}{\omega} = 2n + 1, \text{ untuk } n = 0, 1, 2, \dots \tag{7}$$

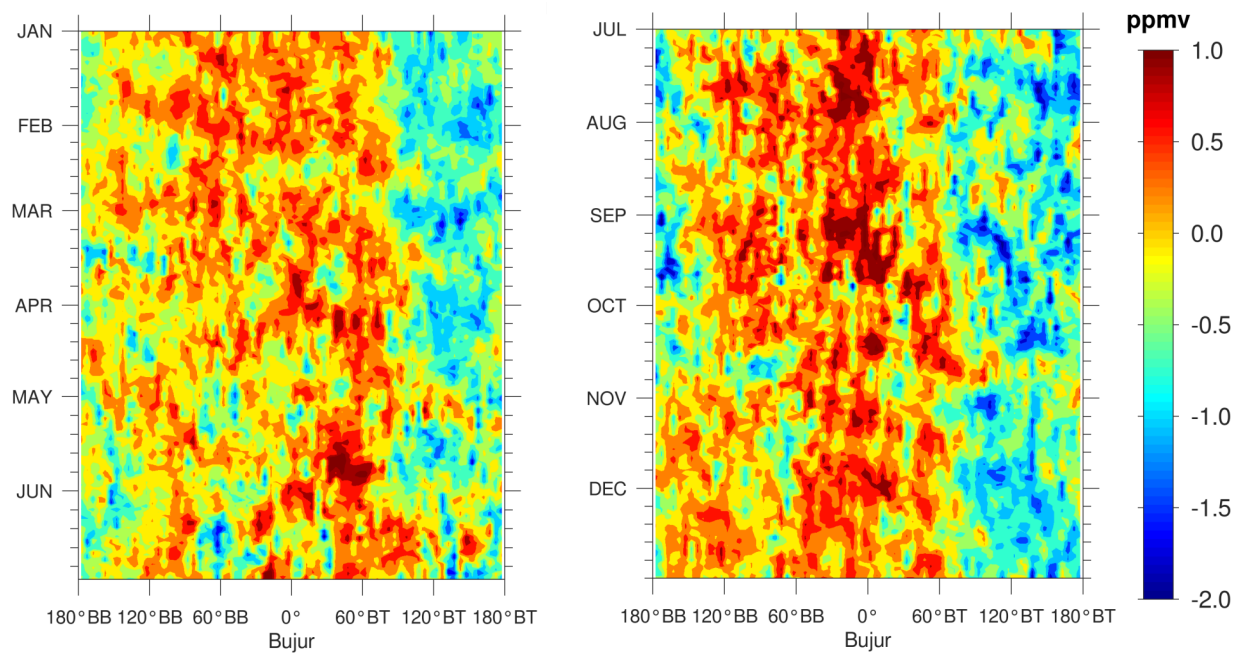
Persamaan (7) merepresentasikan tipe gelombang ekuatorial (Kiladis *et al.*, 2009). Solusi khusus untuk gelombang Kelvin yaitu dengan mengasumsikan $V=0$ di sepanjang ekuator. Hal ini diperoleh apabila dipilih $n = -1$. Gambar 2 menunjukkan model matematika dari gelombang Kelvin hasil pengolahan data dengan mengadaptasi penelitian Matsuno (1966) dan Kiladis *et al.* (2009). Menurut teori, periodisitas gelombang Kelvin berkisar antara 7 hingga 20 harian dengan cepat rambat sekitar 20–60 m.s⁻¹.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Atmosfer memiliki spektrum luar yang terdiri dari beberapa gelombang yaitu ekuatorial Rossby (*equatorial Rossby*, ER), gelombang pencampuran gravitas Rossby (*Mixed Rossby Gravity*, MRG), gelombang gravitas inersia (*inertia gravity*), gelombang Kelvin dan osilasi lain dengan periode lebih dari 30 harian. Gelombang yang dominan terjadi di ekuator yaitu gelombang pencampuran gravitas Rossby dan gelombang Kelvin dengan skala waktu perambatan yang berbeda. Gelombang pencampuran gravitas Rossby memiliki skala waktu 3–7 harian, sedangkan gelombang Kelvin akan mengalami perambatan 3 hingga 20 harian (Wheeler & Kiladis, 1999; Kiladis *et al.*, 2009). Sehingga pada perata-



Gambar 2. Hasil pengolahan data Pola gelombang Kelvin berdasarkan hubungan dispersi frekuensi ω dan bilangan gelombang k untuk $n = -1$. Sumbu- x dan y adalah bujur dan lintang non-dimensi (hasil plot ulang yang diadaptasi dari Matsuno (1966) dan Kiladis *et al.* (2009)). Tanda panah ke kanan (ke kiri) menunjukkan arah angin zonal (U) positif (negatif). Kontur garis utuh (garis putus) menunjukkan geopotensial positif (negatif).



Gambar 3. Diagram waktu terhadap bujur rerata anomali uap air (H_2O^*) di paras 100 hPa pada lintang $10^\circ LS$ sampai $10^\circ LU$ sepanjang tahun 2017

rataan 7 harian yang dilakukan pada penelitian ini tidak dapat menangkap gelombang dengan periode kurang dari tujuh hari.

Berdasarkan diagram waktu terhadap bujur H_2O^* pada lintang $10^\circ LS$ sampai $10^\circ LU$ di paras 100 hPa sepanjang tahun 2017 (Gambar 3), ditemukan bahwa perambatan H_2O^* positif ke arah timur yang identik dengan sinyal gelombang Kelvin terjadi pada pertengahan bulan Januari dan Februari serta pertengahan April sampai Mei. Selain itu, maksimum udara basah ($H_2O^* > 0$) juga terlihat di bulan berikutnya yaitu sekitar pertengahan bulan Juli dan September yang merambat ke arah timur. Secara keseluruhan udara basah dominan terlihat di belahan bumi barat sampai sekitar $60^\circ BT$ dan udara kering ($H_2O^* < 0$) di belahan bumi timur mulai dari sekitar $90^\circ BT$. Distribusi H_2O^* yang ditunjukkan dalam Gambar 3 masih merupakan fluktuasi mentah, sehingga selanjutnya dilakukan analisis pemodelan inversi untuk menyaring perambatan dua bilangan gelombang yang dominan.

Sampel data dipilih pada satu waktu yaitu tanggal 2 Januari 2017 untuk menunjukkan sampel fluktuasi H_2O^* seperti pada Gambar 43. Hasil penyelarasan dengan persamaan (21) diperoleh nilai A_1 sebesar 0,43; A_2 sebesar 0,24; ϕ_1 sebesar $-38,29$ dan ϕ_2 sebesar 33,99. Nilai anomali H_2O positif (negatif) menunjukkan udara basah (kering). Udara basah terlihat mulai $160^\circ BB$ sampai $60^\circ BT$ dengan maksimum di sekitar $20^\circ BT$ sebesar 0,4 ppmv. Sedangkan udara kering terlihat mulai $60^\circ BT$ dan semakin kering ke arah timur hingga mencapai minimum di sekitar $120^\circ BT$ sebesar $-0,7$ ppmv. Secara umum, model persamaan (2) dapat merepresentasikan fluktuasi uap air sepanjang ekuator

bumi.

Setelah melakukan penyelarasan fluktuasi H_2O^* untuk sampel satu hari, penulis melanjutkan analisis estimasi secara spasial sepanjang 2017. Diagram waktu terhadap bujur H_2O^* hasil model dan angin zonal dapat dilihat pada Gambar 5. Udara basah terkumpul di belahan bumi barat hingga sekitar $60^\circ BT$, sedangkan udara kering terkonsentrasi di belahan bumi timur. Perambatan ke timur terjadi sekitar pertengahan bulan Januari hingga Februari, bulan Juni dan pertengahan bulan Juli hingga Agustus yang ditunjukkan dengan adanya propagasi H_2O^* positif. Selain itu, ditemukan juga adanya perambatan cepat yang terjadi pada bulan Juni. Terlihat adanya perambatan H_2O^* positif ke arah timur kemudian di pertengahan bulan Juni berbalik ke barat hingga akhir bulan Juni (Gambar 5a). Perambatan ke arah barat ini kemungkinan bagian dari sinyal gelombang percampuran antara gravitas dan Rossby (Thompson *et al.*, 2011). Hasil penyelarasan ini semakin mempertegas bahwa gelombang tersebut didominasi oleh bilangan gelombang 1 dan terlihat kontras antara belahan bumi barat dan timur.

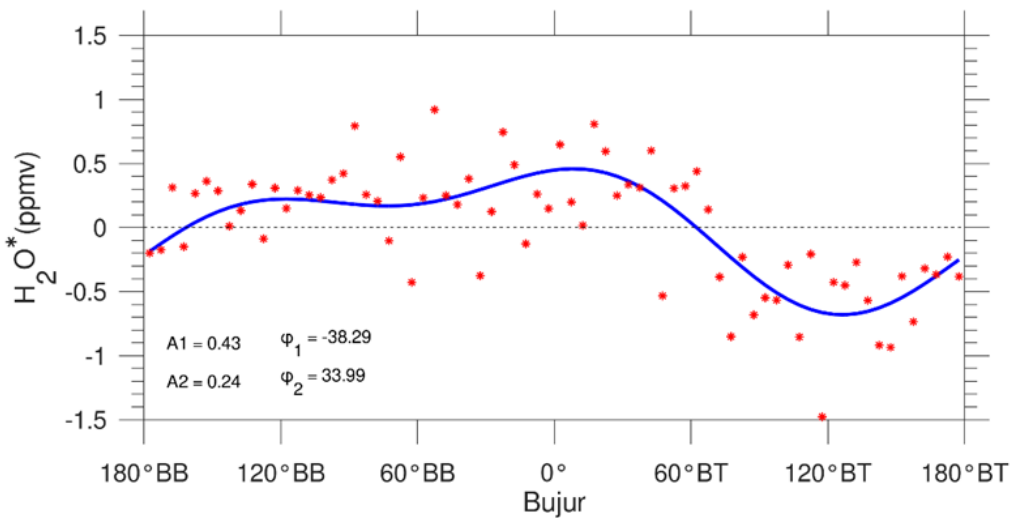
Sebagai pendukung analisis perambatan gelombang ditampilkan nilai anomali angin zonal (U^*) yaitu penyimpangan rerata pada paras 100 hPa (Gambar 5b). Perambatan gelombang ke arah timur terlihat bersesuaian dengan H_2O^* positif yang ditunjukkan oleh propagasi U^* positif. Secara umum, belahan bumi barat didominasi oleh angin baratan ($U^* > 0$) dan belahan bumi timur oleh angin timuran ($U^* < 0$) yang mana hasil ini konsisten dengan hasil yang ditunjukkan oleh Suzuki & Shiotani (2008). Akan tetapi, penelitian sebelumnya belum menunjukkan pengaruh gelombang Kelvin terhadap variasi H_2O . Penelitian ini ber-

hasil menunjukkan keterkaitan perambatan sinyal gelombang Kelvin pada H_2O^* dan U^* .

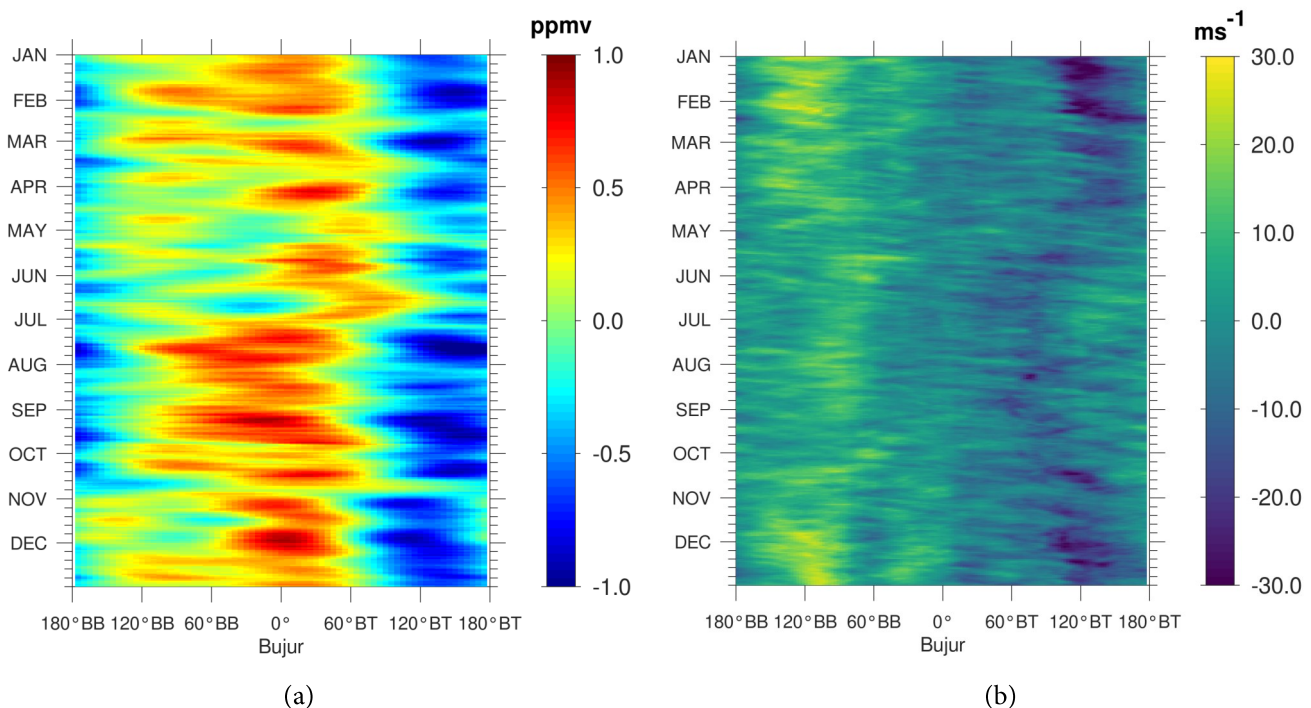
Identifikasi bilangan gelombang dominan pada fluktuasi H_2O^* diperoleh dari nilai amplitudo (A) dan fasa (φ) hasil penyelerasan seperti terlihat pada Gambar 6. Amplitudo kuat A_1 terdapat pada pertengahan bulan Januari, Februari, April, Juli dan September (Gambar 6a). Nilai maksimum A_1 terjadi pada pertengahan bulan September yang mencapai 0,8. Hal ini seperti yang terlihat pada diagram waktu terhadap bujur (Gambar 3 dan 5a) bahwa pada waktu-waktu tersebut terlihat perambatan satu gelombang ke arah timur yang kuat. Nilai rata-rata A_1 adalah 0,44 dan A_2 sebesar 0,22 menunjukkan bahwa fluktuasi H_2O^* didominasi oleh

gelombang $k=1$.

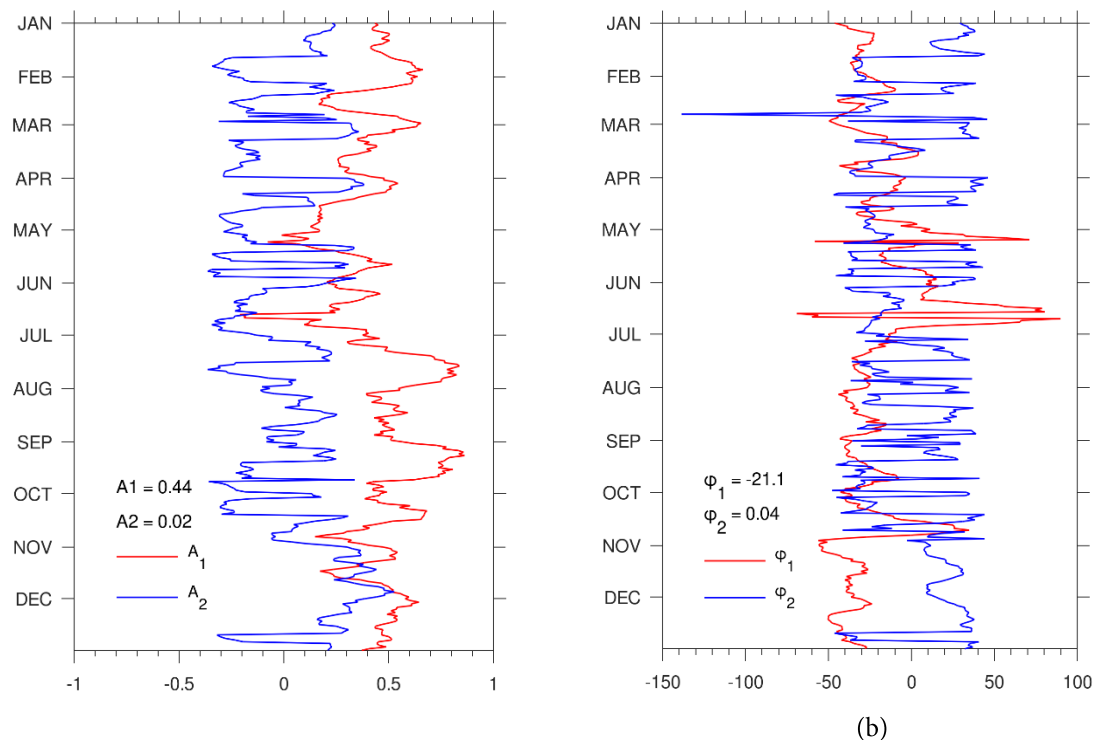
Analisis kecepatan perambatan gelombang, dilakukan melalui interpretasi deret waktu fasa seperti terlihat pada Gambar 6b. Perambatan gelombang secara cepat dapat diidentifikasi dari perubahan fasa yang cepat dalam waktu singkat. Demikian pula propagasi gelombang terlihat lambat apabila nilai fasa gelombang relatif konstan dalam waktu yang lama. Pada φ_1 , perubahan cepat terjadi pada bulan Juli, sedangkan fase lambat terjadi sekitar pertengahan bulan Januari, Agustus dan September. Nilai rata-rata φ_1 dan φ_2 berturut-turut yaitu 21,1 dan 0,04, yang berarti bahwa secara umum perambatan gelombang yang terlihat terbentuk oleh gelombang dengan fasa φ_1 .



Gambar 4. Sampel penyelerasan fluktuasi uap air tanggal 2 Januari 2017 dengan model persamaan 2



Gambar 5. Diagram waktu terhadap bujur (a) hasil penyelerasan untuk keseluruhan deret waktu H_2O^* dari Gambar 1, dan (b) anomali angin zonal (U^*) harian sepanjang tahun 2017



Gambar 6. Deret waktu (a) amplitudo, dan (b) fasa gelombang Kelvin hasil penyalarsan

Setelah teridentifikasi bahwa gelombang k_1 lebih dominan pada fluktuasi H_2O^* di paras 100 hPa sepanjang ekuator, maka untuk melihat dominasi tersebut dilakukan analisis rata-rata relatif terhadap nilai maksimum H_2O^* di sepanjang ekuator pada setiap waktunya., kemudian mengambil sampel data $\pm 90^\circ$ dari titik maksimum H_2O^* . Gambar 67a menunjukkan nilai H_2O^* sekitar 0,04 ppmv di 90° sebelah barat dari titik maksimum. Nilai H_2O^* di $x_r = 0^\circ$ sebesar 0,44 ppmv dan kembali menurun di sebelah timur hingga mencapai nilai minimum sebesar $-0,24$ ppmv.

Gambar 7b menunjukkan rata-rata angin zonal di sebelah barat titik maksimum H_2O^* adalah angin baratan yang mencapai 6 m.s^{-1} . Angin baratan terlihat relatif konstan dalam rentang 70° – 30° sebelah barat $x_r = 0^\circ$, sekitar 4 m.s^{-1} . Kemudian angin baratan tersebut melemah seketika mendekati titik x_r . Memasuki zona sebelah timur x_r angin zonal berubah arah menjadi angin timuran dimana cenderung konstan dalam rentang 20° – 60° sekitar 2 m.s^{-1} dan semakin kuat hingga mencapai -6.5 m.s^{-1} di 90° . Dengan demikian, titik maksimum H_2O^* identik dengan perubahan angin baratan menjadi angin timuran.

Merujuk pada persamaan (3) proses divergensi angin horizontal dapat didekati oleh turunan pertama U terhadap x . Hasil perata-rataan nilai dU/dx relatif terhadap x_r ditunjukkan oleh Gambar 7c. Proses divergensi terjadi sekitar 50° BB sampai 70° BB. Secara umum, proses konvergensi mendominasi sepanjang bujur relatif dan mencapai nilai maksimum di sekitaran x_r , sesuai dengan teori gelombang equator (Kiladis *et al.*, 2009 dan Matsuno *et al.*, 1966). Ini berarti bahwa nilai maksimum H_2O^* dipengaruhi oleh ada

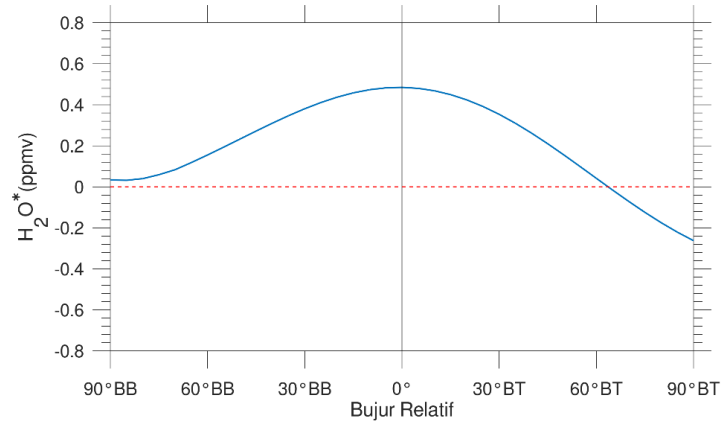
nya konvergensi angin zonal yang mencapai $0,15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Penelitian ini telah menunjukkan sinyal gelombang Kelvin pada variasi uap air di ekuator yang diperkuat oleh konvergensi angin zonal. Thompson *et al.* (2017) berhasil mengungkap dominasi gelombang k_1 pada variasi ozon hasil pengukuran balon ozonsonde. Sementara dalam penyelidikan ini penulis berhasil menemukan gelombang k_1 juga mendominasi fluktuasi uap air. Sehingga dapat dikatakan bahwa proses dinamik di tropopause memiliki peranan penting terhadap variabilitas komposisi gas variabel atmosfer.

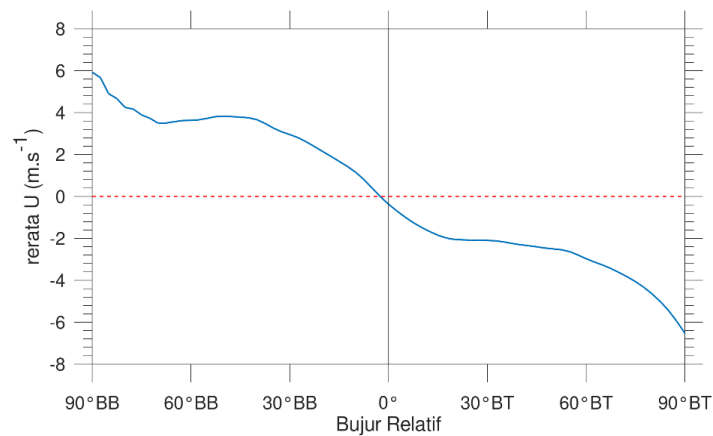
KESIMPULAN

Model gelombang inversi telah diterapkan untuk menganalisis perambatan gelombang Kelvin pada fluktuasi H_2O^* menggunakan data MLS Aura pada tahun 2017. Model persamaan gelombang inversi non-linier dapat menggambarkan fluktuasi H_2O^* di paras 100 hPa sepanjang ekuator bumi. Diagram fluktuasi H_2O^* hasil model memperlihatkan adanya perambatan H_2O^* positif ke arah timur di beberapa waktu sepanjang tahun 2017. Hal ini beresesuaian dengan propagasi U^* positif ke arah timur atau angin baratan yang identik dengan perambatan gelombang Kelvin. Hasil penyalarsan model inversi menunjukkan bahwa fluktuasi H_2O^* didominasi oleh bilangan gelombang 1 yang ditandai dengan nilai A_1 (0,44) lebih besar dari A_2 (0,02) dan ϕ_1 (21,1) lebih besar dari ϕ_2 (0,04).

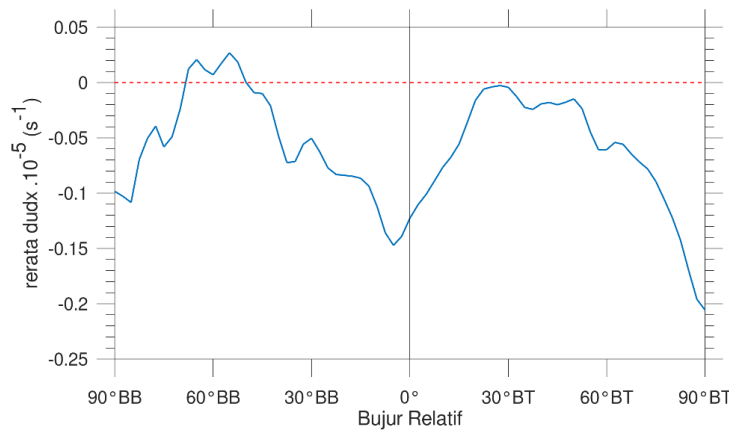
Berdasarkan diagram bujur relatif terhadap nilai maksimum H_2O^* , angin baratan terjadi di sebelah barat nilai maksimum H_2O^* dan berkurang hingga menuju titik $x_r = 0^\circ$,



(a)



(b)



(c)

Gambar 7. rerata variasi H_2O^* , U^* dan dU/dx terhadap bujur relatif dimana 0° menunjukkan lokasi H_2O^* maksimum (lihat teks untuk penjelasan rinci)

kemudian berubah arah menjadi angin timuran dan semakin meningkat di belahan bumi timur relatif. Konvergensi terjadi hampir di seluruh bujur relatif dengan nilai maksimum berada di sekitar di $x_r = 0^\circ$. Oleh karena itu, nilai maksimum H_2O^* dipengaruhi oleh perubahan angin baratan menjadi angin timuran dan adanya konvergensi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *Earth Observing System Microwave Limb Sounder Aura* (EOS MLS

Aura) of NASA dan *Physical Sciences Division (PSD) of the Earth System Research Laboratory (ESRL) NOAA* yang telah menyediakan data uap air dan angin zonal. Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan di Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA) dan tidak didanai oleh sumber pendanaan eksternal.

KONTRIBUSI PENULIS

Pada penelitian ini, penulis ke-1 melakukan pengolahan data, analisis data, dan membuat naskah publikasi, dan

Penulis ke-2 mendesain metode penelitian dan interpretasi hasil.

DAFTAR PUSTAKA

- Fueglistaler, A., Dessler, A. E., Dunkerton, T.J., Folkins, I., Fu, Q., & Mote, P.W. (2009). Tropical Tropopause Layer. *Review of Geophysics*, 47, RG1004.
- Fujiwara, M., Hasebe, F., Shiotani, M., Nishi, N., Voemel, H., & Oltmans, S.J. (2001). Water vapor control at the tropopause by equatorial Kelvin waves observed over the Galapagos. *Geophysics Research Letters*, 28, 3143–3146.
- Gettleman, A., Holton, J.R., & Douglass, A.R. (2000). Simulations of water vapor in the lower stratosphere and upper troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 105, D7, 9003–9023. doi:10.1029/1999JD901133.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika (HAGI).
- Hasebe, F., Aoki, S., Morimoto, S., Inai, Y., Nakazawa, T., Sugawara, S., Ikeda, C., Honda, H., Yamazaki, H., Halimurrahman, Komala, N., Putri, F.A., Budiyono, A., Soedjarwo, M., Ishidoya, S., Toyoda, S., Shibata, T., Hayasi, M., Eguchi, N., ... & Sugidachi, T. (2018). Coordinated Upper-Troposphere-to-Stratosphere Balloon Experiment in Biak. *Bulletin of the American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0289.1>.
- Holton, J.R., Haynes, P.T., McIntyre, M.E., Douglass A.R., Rood, R.B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-Troposphere Exchange. *Reviews of Geophysics*, 3 (4), 403–439.
- Holton, J.R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology Fourth Edition*. Elsevier Academic Press.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., & Potter, G.L. (2002). NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1631-1643.
- Kawatani, Y., Lee, J.N., & Hamilton, K. (2014). Interannual Variations of Stratospheric Water Vapor in MLS Observations and Climate Model Simulations. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 71, 4071–4085. doi: 10.1175/JAS-D-14-0164.1.
- Kedzierski, R.P., Neef, L & Matthes, K. (2016). Tropopause sharpening by data assimilation. *Geophysical Research Letters*, 43, 8298–8305. doi:10.1002/2016GL069936.
- Kiladis, G.N., Wheeler, M.C., Haertel, P.T., Staub, K.H., & Roundy, P.E. (2009). Convectively Coupled Equatorial Waves. *Reviews of Geophysics*, 47, RG2003, doi:10.1029/2008RG000266.
- Lambert, A., Read, W.G., Livesey, N.J., Santee, M.L., Manney, G.L., Froidevaux, L., Wu, D.L., Schwartz, M.J., Pumphrey, H.C., Jimenez, C., Nedoluha, G.E., Cofield, R.E., Cuddy, D.T., Daffer, W.H., Druin, B.J., Fuller, R.A., Jarnot, R.F., Knosp, B.W., Pickett H.M., Perun, V.S., Snyder, W.V., Stek, P.C., Thurstans, R.P., Wagner, P.A., Waters, J.W., Jucks, K.W., Toon, G.C., Stachnik, R.A., Bernath, P.F., Boone, C.D., Walker, K.A., Urban, J.M., Murtagh, D., Elkins, J.W., & Atlas, W. (2007). Validation of the Aura Microwave Limb Sounder middle atmosphere water vapor and nitrous oxide measurements. *Journal of Geophysical Research*, 112. doi:10.1029/2007JD008724.
- Livesey, N.J., Read, W.G., Foidevaux, L., Lambert, A., Manney, G.L., Pumphrey, H.C., Santee, M.L., Schwartz, M.J., Wang, S., Cofield, R.E., Cuddy, D.T., Fuller, R.A., Jarnot, R.F., Jiang, J.H., Knosp, B.W., stek, P.C., Wagner, P.A., & Wu, D.L. (2013). EOS MLS version 3.3 and 3.4 Level 2 data quality and description document. *Tech. rep., Jet Propulsion Laboratory*, <http://mls.jpl.nasa.gov/>
- Mori, S., Hamada, J. I., Tauhid, Y. I., Yamanaka, M. D., kamoto, N., Murata, F., Sakurai, N., Hashiguchi, H., & Sribimawati, T. (2004). Diurnal land-sea rainfall peak migration over Sumatera Island, Indonesian maritime continent, observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 2021–2039.
- Nishimoto, E., & Yoden, S. (2017). Influence of the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on the Madden-Julian Oscillation during Austral Summer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74, 1105–1125.
- Noersomadi, & Hadi, T. W. (2010). Downward Propagating Equatorial Kelvin Wave over the Eastern Indian Ocean as Revealed from Radiosonde and GPS Radio Occultation (CHAMP) Data. *Jurnal Matematika Dan Sains*, vol. 15 nomor 1.
- Randel, W.J., & Wu, F. (2005). Kelvin wave variability near the equatorial tropopause observed in GPS radio occultation measurements. *Journal of Geophysical Research*, 10, D03102. doi:10.1029/2004JD005006.
- Solomon, S., Rosenlof, K.H., Portmann, R.W., Daniel, J.S., Davis, S.M., Sanford, T.J., & Plattner, G. (2010). Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming. *Science*, 327 (5970), 1212–1223.
- Son, S.W., Lim, Y., Yoo, C., Hendon, H.H., & Kim, J. (2017). Stratospheric Control of the Madden-Julian Oscillation. *American Meteorological Society*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0620.1>
- Stone, E.M., Pan, L., Sandor, B.J., Read, W.G., & Waters, J.W. (2000). Spatial distributions of upper tropospheric water vapor measurements from the UARS Microwave Limb Sounder. *Journal of Geophysical Research*, 105, D10, 12,149–12,161. doi:10.1029/2000JD900125
- Thompson, M.A., Allen, A.L., Lee, S., Miller, K., & Witte, J.C. (2011). Gravity and Rossby wave signatures in the tropical troposphere and lower stratosphere based on Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ), 1998–2007. *Journal of Geophysical Research*, 116, D05302. doi:10.1029/2009JD013429
- Thompson, M.A., Witte, J.C., Sterling, C., Jordan, A., Johnson, B.J., Oltmans, S.J., Fujiwara, M., Vomel, H., Allaart, M., Pitters, A., Coetzee, G.J.R., Posny, F., Corrales, E., Diaz, J.A., Felix, C., Komala, N., Lai, N., Nguyen, H.T.A, Maata, M.,... Thiongo, K. (2017). First Reprocessing of Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) Ozone Profiles (1998–2016): 2. Comparisons with Satellites and Ground-Based Instruments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 13,000–12,025. <https://doi.org/10.1002/2017JD027406>.
- Trenberth, K.E., & Hoar, T.J. (1997). EL Nino and Climate Change. *Geophysical Research Letters*, Vol.24, No 23, 3057–3060.
- Tsai, H-F., Tsuda, T., Hajj, G.A., Wickert J., & Aoyama, Y. (2004). Equatorial Kelvin Waves Observed with GPS Occultation Measurements (CHAMP and SAC-C). *Journal of Meteorological Society of Japan*, 82, 397–406.
- Wheeler, M., & Kiladis, G.N. (1999). Convectively Coupled Equatorial Waves: Analysis of Cloud and Temperature in the Wavenumber-Frequency Domain. *Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 374–399.