

**DINAMIKA LAPISAN STRATOSFER DI BELAHAN BUMI UTARA DAN DAMPAKNYA TERHADAP WILAYAH TROPIS: STUDI KASUS MUSIM DINGIN 2012-2013
(STRATOSPHERIC DYNAMICS IN THE NORTHERN HEMISPHERE AND ITS IMPACT TO THE TROPICS: A CASE STUDY OF 2012-2013 WINTER)**

Noersomadi

Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH)

Kyoto University, Uji campus

Gokasho, Uji-shi, Kyoto, Japan, 611-0011

e-mail: noersomadi@rish.kyoto-u.ac.jp

Diterima 18 Mei 2017; Direvisi 8 Januari 2018; Disetujui 9 Januari 2018

ABSTRACT

This research aims to investigate the dynamic of static stability (N^2), potential energy of gravity waves (Ep), and vortex in the stratospheric northern hemisphere during 2012-2013 winter using temperature (T) and zonal wind (u) data from NCEP-DOE Reanalysis II. The results showed two occurrences of decreasing N^2 associated with reversal of u in the first and third week of December 2012 were believed as a trigger of Sudden Stratospheric Warmings (SSW) on January 7, 2013. There was a flow from the polar to the tropics region during the SSW event. It caused the tropopause folding in the sub-tropic region indicated by the distribution of Ep on January 24, 2013. This tropopause folding triggered the convective activity over the Indonesian continents as shown by the negative OLR anomaly from 22 to 26 January 2013. The impact of SSW event in the northern hemisphere to the convective activity was 20%. This results showed the interaction between stratosphere and troposphere and also the teleconnection between the polar and the tropics.

Keywords: SSW, static stability, potential energy of gravity waves, vortex, and stratospheric dynamics

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menyelidiki dinamika stabilitas statis (N^2), energi potensial gelombang gravitas (Ep), dan pusaran angin di lapisan stratosfer Belahan Bumi Utara (BBU) selama musim dingin 2012-2013 menggunakan data temperatur (T) dan komponen angin zonal (u) dari *NCEP-DOE Reanalysis II*. Hasil riset menunjukkan bahwa dua kejadian penurunan N^2 pada pekan awal dan ketiga bulan Desember 2012 diyakini sebagai pemicu kejadian *Sudden Stratosphere Warmings* (SSW) tanggal 7 Januari 2013. Pada saat terjadi SSW terdapat aliran dari kutub menuju tropis. Aliran ini mengakibatkan terjadinya pelipatan lapisan tropopause di wilayah sub-tropis yang terlihat pada distribusi Ep tanggal 24 Januari 2013. Pelipatan lapisan tropopause ini kemudian memicu aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia yang ditandai oleh anomali OLR negatif antara tanggal 22-26 Januari 2013. Dampak kejadian SSW di BBU terhadap aktivitas konvektif di atas wilayah kepulauan Indonesia sebesar 20%. Hasil ini membuktikan interaksi antara lapisan stratosfer dan troposfer serta telekoneksi wilayah kutub dan tropis.

Kata kunci: *SSW, stabilitas statis, energi potensial gelombang gravitas, pusaran angin, dinamika stratosfer*

1 PENDAHULUAN

Stratosfer adalah lapisan lebih stabil dari troposfer yang ditandai oleh peningkatan temperatur atmosfer terhadap ketinggian (Fueglistaler dkk., 2009). Lapisan stratosfer global sangat peka terhadap anomali (perubahan dari rerata) cuaca dan iklim di wilayah tropis (Randell dan Wu, 2015). Disisi lain, terdapat dampak timbal balik dari lapisan stratosfer terhadap pertumbuhan awan konvektif di ekuator (Kodera, 2006). Oleh karenanya, penelitian terkait dinamika di lapisan stratosfer, terutama di Belahan Bumi Utara (BBU), penting dilakukan untuk memahami lebih lanjut tentang dampaknya terhadap wilayah tropis.

Variabel angin zonal u dapat diuraikan menjadi komponen rerata ditambah komponen perturbasi, $u = \bar{u} + u'$ (Holton, 2004). Kondisi lapisan stratosfer yang stabil menyebabkan gelombang gravitas atmosfer mudah merambat dan berinteraksi dengan angin dominan (*mean wind or background wind*), yakni angin zonal rerata (\bar{u}). Stabilitas statis atmosfer akan menurun apabila terjadi efek non linier seperti turbulensi dan atau pecah gelombang (Fritts dan Alexander, 2003). Dengan kata lain, nilai stabilitas statis merupakan salah satu indikator untuk mendeteksi adanya: 1) perambatan

gelombang atmosfer (stabil positif), atau 2) turbulensi (stabil negatif) yang mendukung proses pencampuran udara antara lapisan troposfer dan stratosfer (Griise dkk., 2010; Gettleman dkk., 2011).

Parameter stabilitas statis di atmosfer adalah nilai kuadrat frekuensi apung (*buoyancy frequency*) yang sering disebut sebagai *Brunt Väisälä frequency squared* (N^2). VandZandt (1982) memperkenalkan model spektrum gelombang atmosfer sebagai fungsi N^2 . Total energi potensial gelombang atmosfer dapat dihitung dari besaran N^2 untuk panjang gelombang vertikal (m) tertentu (Smith dkk., 1987). Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa gelombang atmosfer dengan $m < 5$ km akan mudah mengalami saturasi, yaitu saat amplitudo gelombang mencapai maksimum (Fritts dan Rastogi, 1985; Tsuda dkk., 1991).

Ketika gelombang atmosfer mengalami saturasi, maka akan terjadi deposit energi, dan fasa gelombang atmosfer yang berlawanan arah dengan angin dominan akan berinteraksi. Berikutnya, akan tercapai level kritis (paras $u = 0$ m/s) hingga terjadi pembalikan arah angin dominan (Holton, 2004). Konsep ini digunakan untuk menjelaskan proses fisis pembalikan arah \bar{u} yang terjadi bersamaan dengan peningkatan temperatur secara

drastis di lapisan stratosfer BBU (*Sudden Stratosphere Warmings/SSW*) (Albers dan Birner, 2014; Attard dkk., 2016).

SSW adalah kenaikan pesat temperatur rerata zonal sebesar 25 K di lintang 60°LU pada paras tekanan 10 mb (ketinggian ~30 km) yang terjadi dalam waktu beberapa hari sampai dengan dua minggu (<20 hari) (McInturf, 1978; Andrew dkk., 1987). O'Neill (2003) menyatakan bahwa SSW identik dengan perubahan rerata angin baratan ($\bar{u} > 0$) menjadi angin timuran ($\bar{u} < 0$) pada lintang dan paras tekanan yang sama bersesuaian dengan kenaikan temperatur 25 K. Hasil ulasan O'Neill (2003) kemudian dikembangkan oleh Charlton dan Polvani (2007) untuk membuat klasifikasi SSW terkait dengan perubahan angin terhadap dimensi ruang yang disebut pusaran angin. Merujuk definisi dan klasifikasi tersebut, Buttlar dkk., (2015) merekomendasikan penggunaan rerata zonal pada lintang 65°LU untuk menganalisis SSW.

Attard dkk. (2016) melakukan investigasi SSW pada bulan Januari 2013 dan menemukan bahwa proses fisis di lapisan troposfer memicu kejadian SSW di bulan Januari 2013. Akan tetapi, penelitian tersebut tidak menjelaskan bagaimana dampak SSW terhadap wilayah lintang menengah dan ekuator. Pertanyaan riset yang muncul dari hasil Attard dkk. (2016) adalah bagaimana distribusi energi potensial gelombang gravitas (Ep) pada masa pra dan pasca terjadi SSW? Apakah perubahan Ep di stratosfer setelah masa puncak SSW berdampak pada pertumbuhan awan konvektif di ekuator?

Penelitian ini bertujuan memahami dinamika stabilitas statis pada masa pra dan pasca SSW, serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan awan konvektif di ekuator terutama di atas kepulauan maritim Indonesia, dengan mengambil studi kasus periode musim dingin di BBU dari November 2012 sampai Maret 2013. Untuk menjawab pertanyaan riset tersebut, penelitian ini menganalisis kondisi stabilitas statis (N^2) dan hasil estimasi energi potensial gelombang atmosfer (Ep)

berdasarkan N^2 serta menginvestigasi dampaknya terhadap wilayah tropis, dengan mengambil studi kasus SSW yang terjadi pada awal Januari 2013.

Sistematika pembahasan karya tulis ilmiah ini dimulai dengan penjabaran latar belakang riset, penjelasan metode penurunan N^2 , dan formula untuk menghitung Ep sebagai fungsi N^2 dan m . Analisis distribusi N^2 dan Ep , serta diskusi tentang mekanisme fisis di lapisan stratosfer pada masa pra dan pasca kejadian SSW diuraikan pada bagian berikutnya. Makalah ini dilengkapi kesimpulan yang berisi rangkuman hasil penelitian.

2 DATA DAN METODOLOGI

NCEP-DOE Reanalysis II adalah data grid global berukuran 2,5° bujur × 2,5° lintang yang memiliki 17 paras tekanan dari permukaan 1000 mb sampai lapisan stratosfer-bawah di ketinggian 10 mb sebagai hasil integrasi data observasi dan model dinamika atmosfer (Kanamitsu dkk., 2002). Penelitian ini menganalisis data harian T dan u periode November 2012 hingga Maret 2013. Untuk mendukung analisis dampak SSW terhadap aktivitas konvektif di wilayah tropis, penelitian ini menggunakan data *Outgoing Long Wave* (OLR), yakni data radiasi gelombang panjang dari pantulan permukaan bumi. Data OLR dianggap mewakili aktivitas konvektif di wilayah ekuator (Kiladis dkk., 2014). Nilai OLR rendah (tinggi) menunjukkan konvektif kuat (lemah).

Karena data T dalam koordinat isobar atau T pada tekanan udara (p) konstan, maka perlu dilakukan konversi $T(p)$ menjadi $T(z)$ sebelum menghitung N^2 . Reichler dkk. (2003); Austin dan Reichler (2008) memperkenalkan metode untuk menghitung gradien temperatur terhadap ketinggian ($\partial T/\partial z$) dari data *grid* dalam koordinat isobar (Persamaan 2-1 dan 2-2).

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial p^\kappa} \frac{\partial p^\kappa}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (2-1)$$

Dengan menggunakan persamaan gas ideal dan kesetimbangan hidrostatik, maka

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial p^\kappa} \frac{p^\kappa}{T} \frac{\kappa g}{R} \quad (2-2)$$

Nilai N^2 diperoleh dari $\partial T/\partial z$ dan *lapserate* adiabatik kering (g/c_p) (Persamaan 2-3) (Lindzen dan Holton, 1968). g adalah percepatan gravitasi ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), dan $c_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ adalah konstanta gas ideal pada tekanan tetap.

$$N^2 = \frac{g}{T} \left[\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right] \quad (2-3)$$

Persamaan (2-4) dan (2-5) adalah rumus untuk menghitung estimasi total energi potensial gelombang atmosfer, Ep (dalam satuan J/kg), diperoleh dari integrasi spektrum gelombang atmosfer (F) yang merupakan fungsi N^2 dan m ($m = 1/\lambda_z$), λ_z adalah panjang gelombang vertikal (Tsuda dan Hocke, 2002). Nilai m dipilih untuk $\lambda_{z1} = 2 \text{ km}$ dan $\lambda_{z2} = 5 \text{ km}$, sebagaimana hasil (Tsuda dkk., 2000) yang membuktikan bahwa gelombang atmosfer mudah mencapai saturasi pada interval λ_z tersebut.

$$F = \frac{N^4}{10g^2m^3} \quad (2-4)$$

$$Ep = \int_{m_1}^{m_2} F dm \quad (2-5)$$

Analisis variasi N^2 dan Ep dilengkapi dengan investigasi variasi angin horizontal. Dengan mengambil asumsi bahwa komponen selatan-utara (meridional) dan komponen vertikal vektor angin di lapisan stratosfer sangat kecil dibandingkan dengan komponen barat-timur (zonal), maka penelitian ini hanya menganalisis pusaran angin berdasarkan data u (komponen $\partial u/\partial y$ dan $\partial u/\partial z$) terbatas pada cakupan wilayah BBU (0° - 360° BT, 0° - 90° LU).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi stratosfer di BBU pada ketinggian 10 mb lintang 65° LU selama periode November 2012 sampai Maret 2013 dapat dilihat dari deret waktu u' dan T' (Gambar 3-1). Terdapat dua kejadian penurunan nilai u' positif menjadi negatif 9-10 m/s pada minggu pertama dan ketiga bulan Desember 2012 sebelum drastis mencapai puncak negatif 30-40 m/s di awal Januari 2013. Perubahan nilai u' menandakan perlambatan angin jet baratan di stratosfer. Puncak negatif u' yang menunjukkan penguatan angin timuran secara drastis terjadi pada 7 Januari 2013 disertai oleh kenaikan temperatur hingga melebihi 25 K. Puncak SSW musim dingin 2012-2013 terjadi pada periode awal Januari 2013 (Manney dkk., 2015; Attard dkk., 2016). Pada pertengahan dan akhir bulan Maret 2013 terjadi pembelokan kurva u' yang disertai pula oleh kenaikan T' . Akan tetapi, nilai T' positif sepanjang bulan Maret 2013 tidak termasuk kategori SSW karena tidak ada tanda yang menunjukkan perubahan angin baratan menjadi angin timuran.

Aktivitas gelombang planeter dan gelombang gravitas bertepatan dengan $\bar{u}=0 \text{ m/s}$ (Hei dkk., 2008; Alexander dkk., 2008; Alexander dkk., 2009). Artinya, perlambatan angin baratan hingga mencapai 0 m/s kemudian terjadi penguatan angin timuran menggambarkan keberadaan aktivitas gelombang atmosfer. Hal ini akan didiskusikan lebih rinci pada bagian 3.3.

Attard dkk., 2016 mengategorikan dua penguatan angin timuran yang terjadi pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 sebagai dua gangguan atmosfer yang memicu fenomena SSW tanggal 7 Januari 2013. Mereka menganalisis aktivitas gelombang atmosfer sebagai pemicu SSW dengan menjabarkan aliran momentum yang merambat ke atas dari troposfer. Hal yang belum dijelaskan secara rinci adalah dinamika stabilitas statis sebelum, pada saat, dan setelah

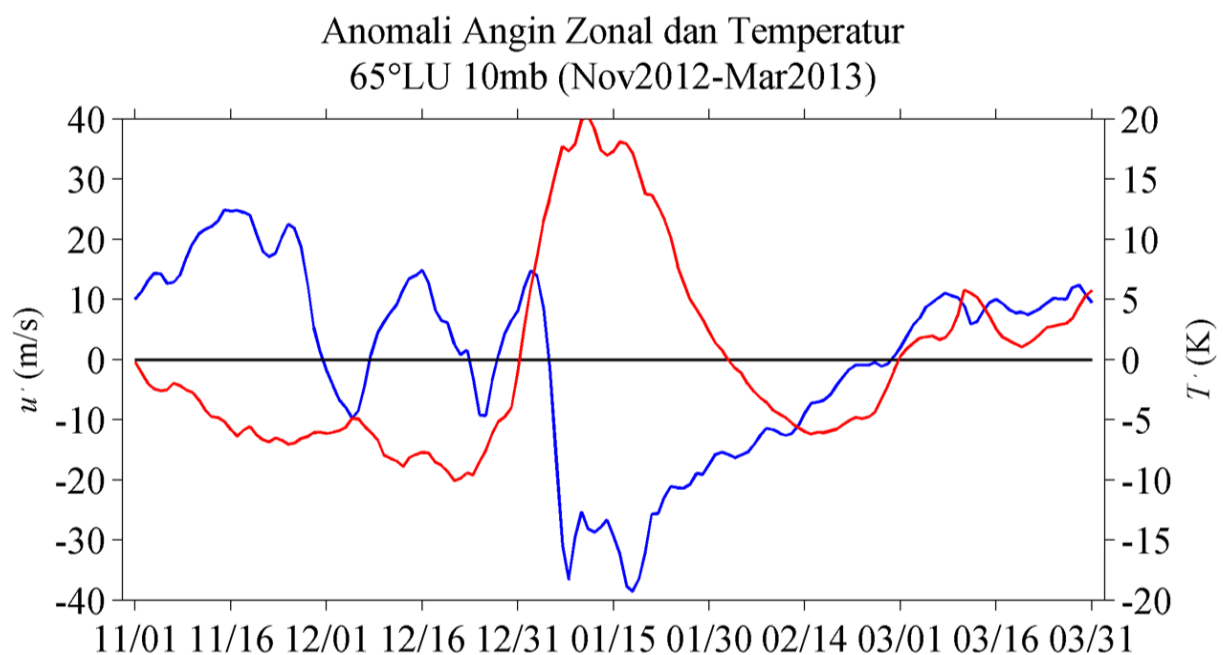
kejadian SSW dari bulan Desember 2012 sampai dengan akhir Januari 2013.

3.1 Dinamika Stabilitas Statis dan Angin Zonal

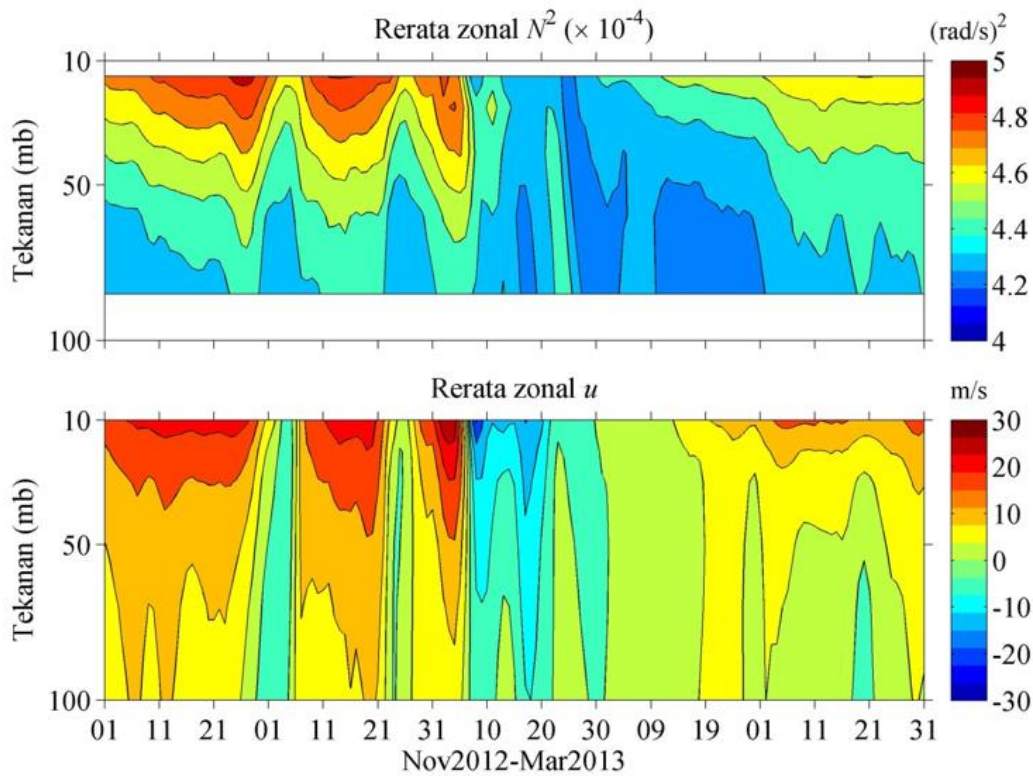
Perambatan gelombang atmosfer dipengaruhi oleh kondisi kestabilan atmosfer. Gelombang atmosfer merambatkan energi bersesuaian dengan kenaikan nilai stabilitas statis. Proses fisis yang mungkin terjadi pada saat nilai stabilitas statis menurun yaitu amplitudo gelombang mencapai titik kritis maksimum dan tidak dapat melebihi nilai kritis tersebut seiring dengan perambatan vertikal ke atas yang berakibat terjadi saturasi gelombang (Fritts dan Alexander, 2003; Alexander dkk., 2010). Proses saturasi gelombang atmosfer akan menyimpan momentum atau energi dan kemudian berinteraksi dengan angin dominan. Interaksi tersebut akan memperlambat angin rerata hingga kemudian membalikkan arahnya. Dinamika saturasi gelombang atmosfer dijelaskan oleh model spektrum gelombang yang merupakan fungsi dari N^2 (Tsuda, 2014; Alexander dkk., 2010).

Gambar 3-2 menunjukkan diagram ketinggian terhadap waktu rerata N^2 dan

u pada paras tekanan 100, 70, 50, 30, dan 10 mb di lintang $65^\circ - 90^\circ$ LU. Dengan mengingat Persamaan (2-3), maka nilai N^2 mewakili paras tekanan 85, 60, 40, dan 15 mb. Terlihat perubahan nilai N^2 dalam waktu singkat terjadi dua kali pada awal dan minggu ketiga bulan Desember 2012 dari 5×10^{-4} (rad/s)² di ketinggian 15 mb menurun hingga $4,2 \times 10^{-4}$ (rad/s)² di ketinggian 60-85 mb. Pola yang sama terlihat pada kontur u yang menunjukkan perlambatan angin baratan 20-30 m/s menjadi angin timuran 5-10 m/s. Pola kejadian penurunan tingkat kestabilan atmosfer bersesuaian dengan pelemahan angin zonal tersebut disebabkan oleh gangguan dari lapisan troposfer. Hal ini sesuai dengan yang diperkirakan dan konsisten dengan riset sebelumnya, yakni bahwa terdapat induksi fluks momentum dari troposfer (Coy dan Pawson, 2015). Hasil yang menarik adalah pola perubahan N^2 dan u di awal Januari 2013 berbeda dengan dua kejadian sebelumnya. Pada saat puncak kejadian SSW, tampak bahwa baik N^2 dan u mengalami perubahan secara drastis dan perubahan nilai kedua parameter tersebut berlangsung sampai minggu ketiga Januari 2013.



Gambar 3-1: Deret waktu rerata zonal u' (kurva biru) dan T' (kurva merah)



Gambar 3-2 Rerata zonal N^2 (panel atas) dan u (panel bawah) di lintang $65^\circ - 90^\circ \text{LU}$

Diagram waktu terhadap lintang rerata zonal (Gambar 3-3) memperlihatkan nilai N^2 di ketinggian 15 mb dan u di 10 mb. Terlihat jelas bahwa N^2 mengalami peningkatan mencapai $5 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ sesaat sebelum terjadi penurunan hingga $4,4 \pm 0,1 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012. Fase ini terjadi bersamaan dengan perubahan rerata u positif menjadi negatif 10-20 m/s di lintang tinggi. Stabilitas statis lapisan stratosfer menurun drastis di lintang tinggi $65^\circ - 90^\circ \text{LU}$ hingga $4,1 \pm 0,1 \times 10^{-4} (\text{rad/s})^2$ pada saat kejadian SSW tanggal 7 Januari 2013 beriringan dengan perubahan drastis rerata angin baratan menjadi angin timuran yang mencapai 30 m/s. Kondisi stabilitas statis menurun secara perlahan hingga pada minggu ketiga Januari 2013 melebar ke wilayah lintang tengah sekitar 45°LU . Dinamika penurunan stabilitas lapisan stratosfer terjadi bersamaan dengan degradasi pelemahan angin zonal.

Dua kejadian perubahan stabilitas statis seiring dengan pelemahan angin zonal di bulan Desember 2012 memastikan hasil analisis gangguan atmosfer (Attard

dkk., 2016; Coy dan Pawson, 2015). Penjelasan mekanisme fisiknya adalah sebagai berikut. Ketika stabilitas statis meningkat sesaat sebelum terjadi perlambatan angin baratan, aktivitas gelombang atmosfer meningkat hingga terjadi saturasi gelombang (Fritts dkk., 2003; Alexander dkk., 2010). Aliran momentum gelombang akan menyimpan energi yang terserap oleh angin baratan sampai kemudian terjadi turbulensi atau pecah gelombang. Turbulensi atau pecah gelombang akan menurunkan stabilitas statis atmosfer yang diwakili oleh penurunan N^2 .

Martineau dan Son (2013) menemukan bahwa pelemahan angin rerata zonal terjadi berkaitan dengan SSW. Kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013 terlihat jelas merambat dari lintang tinggi dan mengganggu rerata u di lintang tengah. Hal yang menarik adalah tampak terjadi perubahan sirkulasi di lintang menengah ($30^\circ - 45^\circ \text{LU}$) hingga wilayah sub-tropis ($15^\circ - 30^\circ \text{LU}$) selama periode pertengahan Januari 2013. Akan tetapi, stabilitas statis pada lintang $15^\circ - 45^\circ \text{LU}$ menunjukkan tidak ada perubahan

yang berarti, meskipun terdapat sedikit perubahan nilai N^2 pada akhir Januari 2013 di wilayah ekuator (Gambar 3-3 panel kiri).

3.2 Gangguan Atmosfer terkait Kejadian SSW

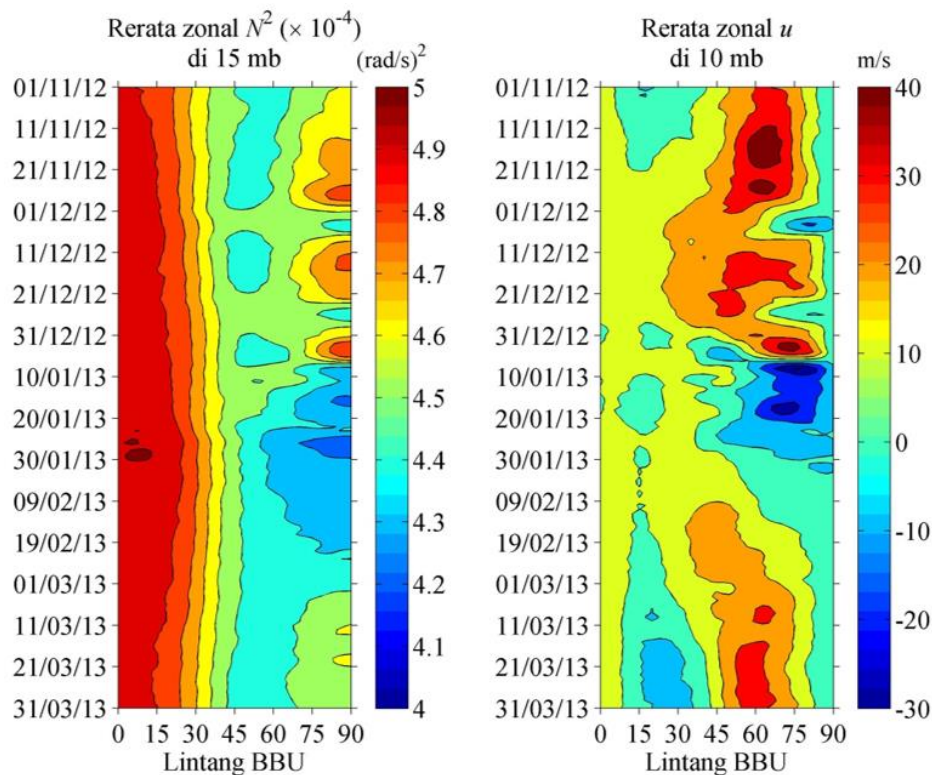
Pada bagian ini akan diuraikan pola gangguan atmosfer sebelum, pada saat, dan setelah kejadian SSW. Dua kejadian penurunan stabilitas statis bersamaan dengan anomali angin zonal pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 dikategorikan sebagai gangguan yang memicu SSW pada 7 Januari 2013. Gambaran variasi dalam bidang horizontal terkait setelah kejadian SSW diambil pada tanggal 24 Januari 2013 yang mana sekitar periode tersebut terjadi sedikit peningkatan stabilitas statis di wilayah tropis (lihat kembali Gambar 3-3 panel kiri).

Kontur N^2 di 15 mb dan u di 10 mb pada bidang horizontal polar stereografik 180 °BB-180 °BT dan 0 ° -90 °LU ditampilkan dalam Gambar 3-4(a)-(d). Gambar 3-4(a) dan (b) menggambarkan dua kondisi perubahan N^2 di bulan Desember 2012 yang bersesuaian dengan perubahan u sebelum puncak kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013 (Gambar 3-4c). Pada waktu kejadian sebelum puncak SSW terlihat bahwa wilayah seperti Kanada bagian utara, Pegunungan Greenland (4 Desember 2012) dan Perbukitan Aleutian (26 Desember 2012) menunjukkan nilai N^2 tinggi bertepatan dengan pelemahan angin zonal (zona $u = 0$ m/s). Kondisi N^2 rendah dan $u = 0$ m/s terlihat di wilayah utara Samudera Pasifik. Mulai dari anomali pada bulan Desember 2012 sampai dengan akhir Januari 2013, pusat N^2 rendah (kontur warna biru pada Gambar 3-4(a) dan (b) di sekitar kutub utara, memperlihatkan pola perpindahan zona N^2 rendah dari sekitaran lintang 65 °LU belahan bumi bagian timur menuju ke

lintang lebih tinggi dan kemudian mencapai belahan bumi bagian barat sampai di sekitar Kanada utara (Gambar 3-4d). Pada masa puncak SSW dan periode setelahnya (24 Januari 2013), terlihat bahwa kondisi stabilitas statis terganggu dan terlihat merata di lintang tengah dengan nilai N^2 $4,5 - 4,8 \times 10^{-4}$ (rad/s)². Apabila dibandingkan antara kondisi stabilitas statis pada tanggal 26 Desember 2012 dan 24 Januari 2013, maka wilayah tropis sekitar 90°-180°E (Benua Maritim Indonesia dan Samudera Pasifik) mengalami perubahan nilai N^2 .

Zona $u = 0$ m/s (titik kritis) menandakan terjadi pembalikan vektor angin horizontal akibat interaksi fasa gelombang dengan angin dominan (Alexander dkk., 2010). Dengan kata lain pada titik kritis tersebut terdapat aktivitas gelombang planeter atau gelombang gravitas. Proses fisis yang mungkin terjadi pada N^2 tinggi di lokasi yang sama dengan $u = 0$ m/s adalah gelombang planeter atau gelombang gravitas merambat ke atas. Sedangkan pada lokasi N^2 rendah dan $u = 0$ m/s, terjadi turbulensi (pergolakan massa udara) atau resonansi gelombang (Birner dan Williams, 2008; Albers dan Birner, 2014).

Ern dkk., (2014) mengungkapkan bahwa peningkatan aktivitas gelombang di stratosfer terjadi di sekitar titik kritis ($u = 0$ m/s). Energi gelombang gravitas yang bersumber dari pegunungan di wilayah Greenland, Aleutian, dan bagian utara Kanada merambat ke atas yang dipandu oleh perpindahan arus jet baratan dari lapisan stratosfer bagian bawah ke tengah dan mengarah ke utara (Alexander dkk., 2009). Gelombang gravitas ini akan mencapai keadaan saturasi dan secara perlahan menurunkan stabilitas statis lapisan stratosfer itu sendiri karena terjadi efek non linier (turbulensi) sampai kemudian menaikkan temperatur (Martineau dan Son, 2013; Manney dkk., 2015).



Gambar 3-3: Rerata zonal N^2 yang diturunkan dari data temperatur pada ketinggian 20 mb dan 10 mb (panel kiri) dan rerata zonal angina horizontal komponen barat-timur di ketinggian 10 mb (panel kanan)

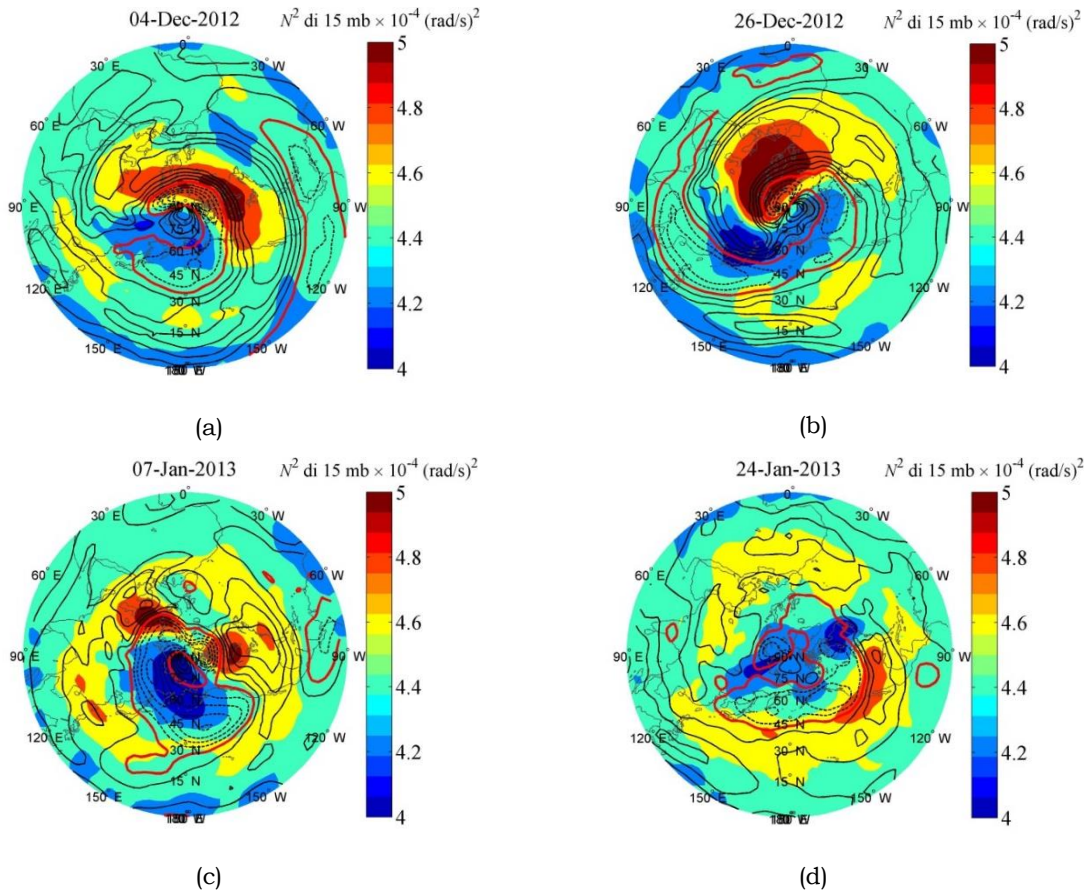
3.3 Dampak Kejadian SSW terhadap Aktivitas Konvektif di atas wilayah Indonesia

Setelah menganalisis variasi N^2 secara global, penjabaran analisis di bagian ini akan lebih fokus pada penampang melintang estimasi total energi potensial gelombang gravitas (Persamaan 2-5) dan pusaran angin dalam batas 90° - 140° BT. Gambar 3-5 menunjukkan diagram ketinggian terhadap lintang distribusi Ep , $\partial u/\partial z$, dan $\partial u/\partial y$ pada waktu yang dipilih seperti dalam Gambar 3-4. Satuan $\partial u/\partial z$ dan $\partial u/\partial y$ berturut-turut dalam m/s per mb dan m/s per rad. Berdasarkan hasil perkalian silang vektor gradien dan angin horizontal ($-\partial u/\partial z \mathbf{j} + \partial u/\partial y \mathbf{k}$), maka nilai positif (negatif) $\partial u/\partial z$ menunjukkan vektor ke atas (bawah), sedangkan nilai positif (negatif) dari $\partial u/\partial y$ mewakili vektor ke selatan (utara). Batas ketinggian meliputi lapisan troposfer dan stratosfer untuk memperlihatkan dampak yang terlihat di troposfer lintang menengah dan ekuator setelah kejadian SSW.

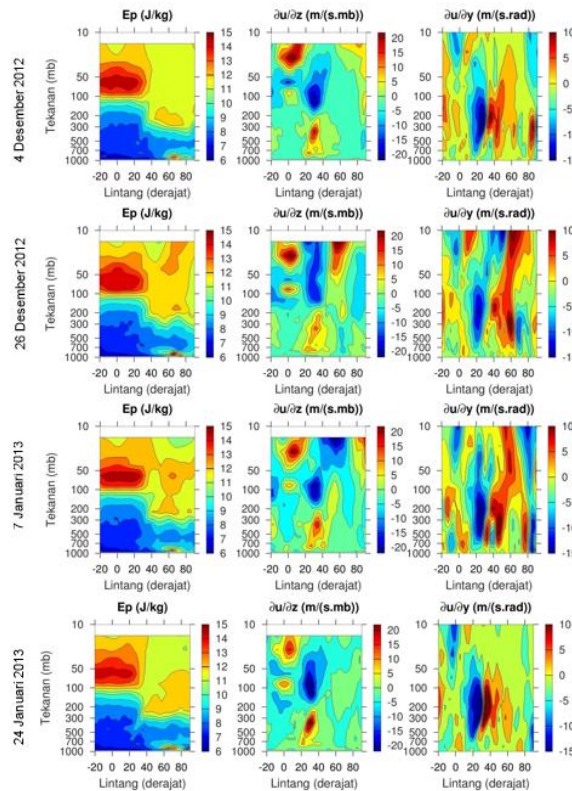
Sumbu horizontal dibatasi dari 20° LS sampai 90° LU karena penelitian ini hanya menganalisis dinamika di BBU.

Nilai Ep pada lintang 40° - 90° LU di atas 100 mb tanggal 4 Desember 2012 sekitar 11 J/kg. Peningkatan Ep mencapai 12-13 J/kg terjadi pada 26 Desember 2012 bersamaan dengan perubahan secara drastis pola pusaran angin di 40° - 60° LU yang mencapai ± 20 m/(s.mb) dan ± 10 m/(s.rad). Perubahan drastis pada tanggal 26 Desember 2012 ini telah diinvestigasi oleh Attard dkk. (2016) yang merupakan pemicu kejadian SSW pada tanggal 7 Januari 2013.

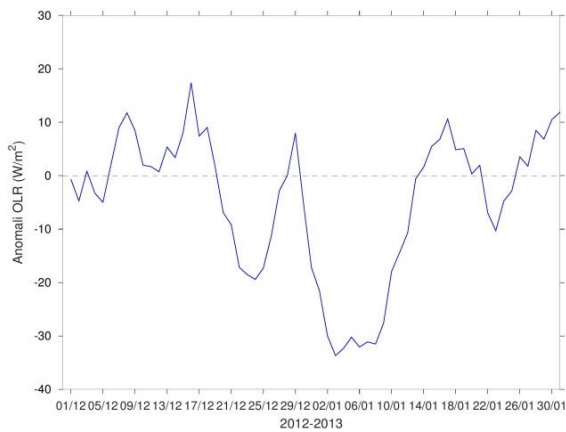
Diagram melintang $\partial u/\partial y$ di sekitar 60° - 80° LU paras 50-10 mb pada saat kejadian SSW menunjukkan pola kebalikan pada tanggal 26 Desember 2012. Negatif $\partial u/\partial z$ dan positif $\partial u/\partial y$ di lapisan stratosfer di lintang menengah menggambarkan ada aliran ke bawah dan menuju tropis. Aktivitas gelombang gravitas yang ditunjukkan oleh Ep juga meningkat di lintang menengah sekitar 100-50 mb.



Gambar 3-4: Diagram polar stereografik N^2 di 15 mb (kontur warna) dan u di 10 mb (kontur garis hitam) dengan interval tiap 10 m/s, angin baratan (timuran) diwakili oleh garis penuh (garis putus-putus). Kontur garis merah menunjukkan zona $u = 0$ m/s



Gambar 3-5: Diagram ketinggian terhadap lintang distribusi energi potensial gelombang gravitas dan pusaran angin dalam batas 90°-140° BT pada waktu yang dipilih sesuai dengan Gambar 3-4



Gambar 3-6: Anomali OLR (nilai OLR dikurangi reratanya) di atas wilayah 90°-140° BT dan 10°LS-10°LU.

Dampak kejadian SSW terhadap wilayah sub-tropis dan tropis mulai terlihat pada tanggal 24 Januari 2013. *Ep* di sekitar 20°-30° LU pada paras 100-200 mb menunjukkan pola yang disebut pelipatan lapisan tropopause (*tropopause folding*) (Fueglistaler dkk., 2009; Gettleman dkk., 2011). Desakan terhadap lapisan tropopause di wilayah sub-tropis ini kemudian memicu anomali aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia (Gambar 3-6). Korelasi silang anomali angin zonal di 10 mb terhadap anomali OLR menunjukkan positif dengan keterlambatan sekitar 15 hari (Kodera, 2006). Anomali negatif OLR di antara tanggal 22-26 Januari 2013 hanya mencapai 10 W/m² lebih kecil daripada yang terjadi pada awal Januari 2013 yang mencapai lebih dari -30 W/m². Meskipun anomali negatif pada akhir Januari 2013 ini dapat juga dipengaruhi oleh kondisi lokal dan juga oleh fasa monsun Asia-Australia dan *Madden Julian Oscillation* (MJO) (Kiladis dkk., 2014), namun kejadian SSW pada bulan Januari 2013 ini memiliki kontribusi sebesar 20%, yakni hasil korelasi silang deret waktu anomali angin zonal di 10 mb (Gambar 3-1) terhadap anomali OLR.

Hasil penelitian ini merupakan temuan dari analisis studi kasus SSW *major* pada bulan Januari 2013 (berdasarkan kategori Butler dkk., 2015). Hasil kuantitatif ini perlu dilakukan uji statistik dari kejadian SSW *major* dan *minor* menggunakan data klimatologi

untuk melihat perbedaan pengaruh kedua tipe SSW tersebut terhadap aktivitas konvektif di wilayah tropis. Interaksi SSW *major* (*minor*) yang lebih identik dengan pemisahan/*split* (*perpindahan/displacement*) pusaran angin terhadap gangguan atmosfer di wilayah tropis seperti *Quasi Biennial Oscillation* (QBO) dan *Madden-Julian Oscillation* (MJO) (Garfinkel dkk., 2012; Liu dkk., 2014) juga perlu dipertimbangkan untuk melihat dampak timbal balik lapisan troposfer-stratosfer.

4 KESIMPULAN

Dinamika lapisan stratosfer BBU selama masa pra, saat, dan pasca kejadian SSW di bulan Januari 2013 telah diteliti berdasarkan data *T* dan *u* dari *NCEP-DOE Reanalysis II*. Analisis dinamika stabilitas statis, energi potensial gelombang gravitas dan pusaran angin dipilih pada tanggal 4 dan 26 Desember 2012 yang dikategorikan sebagai periode sebelum puncak SSW tanggal 7 Januari 2013. Adapun penjabaran kondisi pasca kejadian SSW merujuk pada tanggal 24 Januari 2013.

Hasil penelitian memperlihatkan peningkatan dan penurunan secara drastis dalam waktu singkat pada *N²* terjadi bersamaan dengan perubahan rerata angin baratan menjadi timuran di awal dan minggu ketiga Desember 2012 yang menjadi pemicu kejadian SSW. Pada masa puncak SSW, *N²* menurun secara drastis di wilayah kutub utara bertepatan dengan pelemahan angin zonal. Pada saat kejadian SSW tanggal 7 Januari 2013 terdapat aliran dari kutub menuju tropis dan berdampak terjadi pelipatan lapisan tropopause di wilayah sub-tropis pada tanggal 24 Januari 2013. Pelipatan lapisan tropopause ini kemudian memicu aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia antara tanggal 22-26 Januari 2013. Kontribusi kejadian SSW di BBU terhadap aktivitas konvektif di atas wilayah Indonesia sebesar 20%. Nilai prosentase ini memperlihatkan proses interaksi lapisan stratosfer-troposfer dan telekoneksi wilayah kutub dan tropis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Toshitaka Tsuda atas diskusi mengenai dinamika stratosfer. Data *NCEP-DOE Reanalysis II* diperoleh dari NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA (www.esrl.noaa.gov), serta Tim Redaksi Jurnal Sains Dirgantara dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

- Albers, J. R., dan T., Birner, 2014. *Vortex Preconditioning due to Planetary and Gravity Waves prior to Sudden Stratospheric Warmings*. J. Atmos. Sci., 71, 4028–4054, doi:10.1175/JAS-D-14-0026.1.
- Alexander, M.J., M., Geller, C., Mc-Landress, S., Polavarapu, P., Preusse, F., Sassi, K., Sato, S., Eckermann, M., Ern, A., Hertzog, Y., Kawatani, M., Pulido, T., Shaw, M., Sigmond, R., Vincent, S., Watanabe, 2010. *Recent Developments in Gravity-Wave Effects in Climate Models and the Global Distribution of Gravity-Wave Momentum Flux From Observations and Models*, Q. J. R. Meteorolog. Soc., 136, 1103–1124, doi:10.1002/qj.637.
- Alexander, S.P., A.R., Klekociuk, dan T., Tsuda, 2009. *Gravity Wave and Orographic Wave Activity Observed Around the Antarctic and Arctic Stratospheric Vortices by the COSMIC GPS-RO Satellite Constellation*. J. Geophys. Res. 114, doi: 10.1029/2009JD011851.
- Alexander, S.P., T., Tsuda, dan Y., Kawatani, 2008. *COSMIC GPSRO Observations of Northern Hemisphere Winter Stratospheric Gravity Waves and Comparisons with an Atmospheric General Circulation Model*. Geophys. Res. Lett., 35, L10808, doi:10.1029/2008GL033174.
- Andrews, D. G., J. R., Holton, dan C. B., Leovy, 1987. *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press, 489.
- Attard, H. E., R.-B., Rosimar, T. G., Corey, dan L. L., Andrea, 2016. *Tropospheric and Stratospheric Precursors to the January 2013 Sudden Stratospheric Warming*. Mon. Weather Rev., 1321-1339.
- Austin, J., dan T. J. Reichler, 2008. *Long-Term Evolution of the Cold Point Tropical Tropopause: Simulation Results and Attribution Analysis*, J. Geophys. Res., 113, D00B10, doi: 10.1029/2007JD009768.
- Birner, T., dan P. D., Williams, 2008. *Sudden Stratospheric Warmings as Noise-Induced Transitions*. J. Atmos. Sci., 65, 3337–3343, doi:10.1175/2008JAS2770.1.
- Butler, A. H., D. J., Seidel, S. C., Hardiman, N., Butchart, T. Birner, dan A. Match, 2015. *Defining Sudden Stratospheric Warmings*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, 1913–1928, doi:10.1175/BAMS-D-13-00173.1.
- Charlton, A. J., dan L. M., Polvani, 2007. *A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks*. J. Climate, 20, 449–469, doi:10.1175/JCLI3996.1.
- Coy, L., dan S., Pawson, 2015. *The Major Stratospheric Sudden Warming of January 2013: Analyses and Forecasts in the GEOS-5 Data Assimilation System*. Mon. Wea. Rev., 143, 491–510, doi: 10.1175/MWR-D-14-00023.1.
- Ern, M., F., Ploeger, P., Preusse, J. C., Gille, L. J., Gray, S., Kalisch, M. G., Mlynczak, J. M., Russell III, dan M., Riese, 2014. *Interaction of Gravity Waves with The QBO: a Satellite Perspective*, J. Geophys. Res. Atmos., 119, 2329–2355, doi: 10.1002/2013JD020731.
- Fritts, D. C., dan Alexander, M. J., 2003. *Gravity Wave Dynamics and Effects in the Middle Atmosphere*, Rev. Geophys., 41, 1003, doi:10.1029/2001RG000106.
- Fritts, D. C., dan P. K., Rastogi, 1985. *Convective and Dynamical Instabilities due to Gravity Wave Motions in the Lower and Middle Atmosphere: Theory and Observations*, Radio Sci., 20, 1247–1277.
- Fueglistaler, S., A. E., Dessler, T. J., Dunkerton, I., Folkins, Q., Fu, dan P. W., Mote, 2009. *Tropical Tropopause Layer*, Rev. Geophys., 47, RG1004, doi:10.1029/2008RG000267.
- Garfinkel, C. I., S. B., Feldstein, D. W., Waugh, dan C., Yoo, S., Lee, 2012. *Observed Connection between Stratospheric Sudden Warmings and the Madden-Julian Oscillation*. Geophys. Res. Lett., 39, L18807, doi:10.1029/2012GL053144.
- Gottelman, A., P., Hoor, L., Pan, W. J., Randel, M. I., Hegglin, dan T., Birner, 2011. *The Extratropical Upper Troposphere and*

- Lower Stratosphere, Rev. Geophys., 49, RG3003, doi:10.1029/2011RG000355.
- Griise, K. M., D. W. J., Thompson, dan T., Birner, 2010. *A Global Survey of Static Stability in the Stratosphere and Upper Troposphere*, J. Clim., 23, 2275–2292.
- Hei, H., T., Tsuda, dan T., Hirooka, 2008. *Characteristics of Atmospheric Gravity Wave Activity in the Polar Regions Revealed by GPS Radio Occultation Data with CHAMP*, J. Geophys. Res., 113, D04107, doi:10.1029/2007JD008938.
- Holton, J.R., 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Elsevier Academic Press.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J., Hnilo, M. Fiorino, dan G. L., Potter, 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bull. Amer. Meteor. Soc. 1631-1643.
- Kiladis, G.N., J., Dias, K.H., Straub, M.C., Wheeler, S.N., Tulich, K., Kikuchi, K.M., Weickmann, M.J., Ventrice, 2014. *A Comparison of OLR and Circulation Based Indices for Tracking the MJO*. Monthly Weather Review, 142 1697-1715.
- Kodera, K., 2006. *Influence of Stratospheric Sudden Warming on the Equatorial Troposphere*. Geophys. Res. Lett., 33, L06804, doi:10.1029/2005GL024510.
- Lindzen, R.S., dan J.R., Holton, 1968. A Theory of the Quashi-Biennial Oscillation. J. Atmos. Sci., 25, 1095-1107.
- Liu, C., B., Tian, K.-F., Li, G. L., Manney, N. J., Livesey, Y. L., Yung, dan D. E., Waliser, 2014. *Northern Hemisphere Mid-Winter Vortex-Displacement and Vortex-Split Stratospheric Sudden Warmings: Influence of The Madden-Julian Oscillation and Quasi-Biennial Oscillation*. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 12 599–12 620, doi: 10.1002/2014JD021876.
- Manney, G.L., Z. D., Lawrence, M. L., Santee, W., G., Read, N. J., Livesey, A., Lambert, L., Froidevaux, H. C., Pumphrey, and M.J., Schwartz, 2015. *A Minor Sudden Stratospheric Warming With a Major Impact: Transport And Polar Processing In The 2014/2015 Arctic Winter*, Geophys. Res. Lett., 42, 7808–7816, doi: 10.1002/2015GL065864.
- Martineau, P., dan S.-W., Son, 2013. *Planetary-Scale Wave Activity as a Source of Varying Tropospheric Response to Stratospheric Sudden Warming Events: a Case Study*. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 10994–11006, doi:10.1002/jgrd.50871.
- McInturff, R. M., 1978. *Stratospheric Warmings: Synoptic, Dynamic and General-Circulation Aspects*. Tech. Rep. NASA-RP-1017, NASA, Washington, DC, 166.
- O'Neill, A., 2003. *Middle Atmosphere: Sudden Stratospheric Warmings*. Encyclopedia of Atmospheric Sciences, J. R. Holton, J. A. Curry, and J. A. Pyle, Eds., Academic, 1342–1353.
- Randell, W.J., dan F. Wu, 2015. *Variability of Zonal Mean Temperatures Derived from a Decade of GPS Radio Occultation Data*. J. Atmos. Sci., 72, 1261-1275, doi: 10.1175/JAS-D-14-0216.1.
- Reichler, T., M., Dameris, dan R., Sausen, 2003. *Determining the Tropopause Height from Gridded Data*, Geophys. Res. Lett., 30(20), 2042, doi:10.1029/2003GL018240.
- Smith, S. A., D. C., Fritts, dan T. E., VanZandt, 1987. *Evidence for a Saturated Spectrum of Atmospheric Gravity Waves*, J. Atmos. Sci., 44, 1404–1410.
- Tsuda, T., 2014. *Characteristics of Atmospheric Gravity Waves Observed using The MU (Middle and Upper Atmosphere) Radar and Global Positioning System (GPS) Radio Occultation*. Review. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 90, 12-27.
- Tsuda, T., K., Hocke, 2002. *Vertical Wave Number Spectrum of Temperature Fluctuations in the Stratosphere using GPS Occultation Data*, J. Meteorol. Soc. Japan, 80, 925–938.
- Tsuda, T., M., Nishida, C., Rocken, and R. H., Ware, 2000. *A Global Morphology of Gravity Wave activity in the Stratosphere Revealed by the GPS Occultation Data GPS/MET*, J. Geophys. Res., 105(D6), 7257–7273.
- Tsuda, T., T. E., VanZandt, M., Mizumoto, S., Kato, dan S., Fukao, 1991. *Spectral Analysis of Temperature and Brunt-Vaisala Frequency Fluctuations Observed by Radiosondes*, J. Geophys. Res., 96, 17265–17278.
- VanZandt, T. E., 1982. *A Universal Spectrum of Buoyancy Waves in the Atmosphere*, Geophys. Res. Lett., 9, 575–578.