

MODULASI QBO TERHADAP ANOMALI KONSENTRASI UAP AIR DAN OZON DI STRATOSFER BAWAH

MODULATION OF QBO ON THE WATER VAPOR AND OZONE CONCENTRATION ANOMALIES IN THE LOWER STRATOSPHERE

Noersomadi*, Dita Fatria Andarini

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, PSTA LAPAN, Jalan Dr. Djununan 133, Bandung, 40173

*E-mail: noersomadi@lapan.go.id

Naskah masuk: 6 Maret 2020 Naskah diperbaiki: 3 November 2020 Naskah diterima: 16 November 2020

ABSTRAK

Angin rerata zonal di stratosfer bawah (100–10 hPa) yang merambat vertikal ke bawah seiring waktu dengan periode ~26 bulanan lazim disebut sebagai *Quasi Biennial Oscillation* (QBO). Untuk mengetahui hubungan antara QBO dengan konsentrasi uap air (H_2O) dan ozon (O_3) terhadap proses pendinginan dan pemanasan radiatif di stratosfer bawah, penelitian ini menggunakan data *Microwave Limb Sounder* (MLS) Aura versi 4.2 sepanjang Agustus 2004–Juli 2019 (16 tahun). Kami menitikberatkan pada analisis variasi antartahunan yaitu simpangan dari rerata tahunan anomali H_2O (H_2O^*) dan anomali O_3 (O_3^*). H_2O^* menunjukkan pola perambatan ke atas yang dikenal sebagai ‘atmospheric tape recorder’. Osilasi O_3^* positif–negatif dan anomali temperatur (T^*) hangat–dingin terlihat jelas merambat ke bawah bersesuaian dengan pola perubahan angin zonal. Diagram komposit H_2O^* di 100 hPa menunjukkan anomali kering sekitar ± 3 bulan dari transisi fasa QBO timuran (QBO *easterly*; QBO-E) ke fasa QBO baratan (QBO *westerly*; QBO-W), dimana O_3^* memperlihatkan fluktuasi menurun dan meningkat di 20–50 hPa. Udara kering ($H_2O^* \sim -0.5$ ppmv) dengan O_3^* positif (0.5 ppmv) tinggi akan menaikkan temperatur sebesar 2 K. Profil rerata H_2O^* , O_3^* dan T^* pada dua fasa QBO yang berbeda menunjukkan modulasi QBO pada variasi uap air dan ozon yang memengaruhi pendinginan dan pemanasan radiatif di stratosfer bawah. Dengan demikian, variasi dua komposisi kimia (H_2O dan O_3) terkait respon radiatif di stratosfer bawah perlu dipertimbangkan untuk pengembangan model iklim

Kata kunci: QBO, uap air, ozon, stratosfer bawah

ABSTRACT

Zonal mean wind in the lower stratosphere (100–10 hPa) that propagates vertically with a period of about 26 months is well known as the *Quasi-Biennial Oscillation* (QBO). To understand the relationship between QBO and both water vapor (H_2O^*) and ozone (O_3^*) concentration on the radiative cooling and heating in the lower stratosphere, this research utilized MLS Aura version 4.2 data from August 2004 to July 2019 (16 years). We focus on the analysis of interannual variation as the deviation from the annual mean of H_2O anomaly (H_2O^*) and O_3 anomaly (O_3^*). H_2O^* showed an upward propagation pattern called an atmospheric tape recorder. The positive-negative oscillation of O_3^* and warm-cool of temperature anomaly (T^*) were clearly seen propagating downward associate with zonal wind alteration. The composite diagram of H_2O^* at 100 hPa showed dry anomaly during about ± 3 months around the transition period from QBO easterly phase (QBO-E) to QBO westerly phase (QBO-W), where O_3^* depict decreasing and increasing fluctuations at 20–50 hPa. The dry air about -0.5 ppmv with ozone about 0.5 ppmv will increase the temperature by 2 K. The mean profile of H_2O^* , O_3^* and T^* during the two QBO phases showed QBO modulation on the water vapor and ozone variation that influence the radiative cooling and heating in the lower stratosphere. Therefore, the variation of two chemical constituents (H_2O and O_3) related to radiative response in the lower stratosphere should be considered when one will develop the climate model.

Keywords: QBO, water vapor, ozone, lower stratosphere

1. Pendahuluan

Diskusi tentang klimatologi zona tropis terutama wilayah benua maritim Indonesia menjadi menarik perhatian sejak beberapa dekade lalu. Sebab, benua maritim merupakan salah satu zona konvektif aktif

sebagai sumber energi panas laten yang membangkitkan dinamika atmosfer di troposfer atas dan stratosfer bawah [1–3]. Steiner dkk. (2009) [4] menggunakan data temperatur global dari pengamatan *limb sounder* berhasil mengungkap bahwa tren perubahan iklim dicirikan oleh

pemanasan di troposfer atas dan pendinginan di stratosfer bawah.

Isu kenaikan temperatur di permukaan telah menjadi perhatian dunia terkait perubahan iklim, yang menurut hasil penelitian terdahulu disebabkan oleh kenaikan konsentrasi gas karbon dioksida (CO_2). Akan tetapi, paradigma bahwa perubahan iklim hanya disebabkan oleh kenaikan konsentrasi CO_2 telah berubah sejak tahun 2010 [5]. Solomon dkk. (2010) [5] meneliti pola variasi tahunan konsentrasi uap air (H_2O) di stratosfer bawah dan hubungannya dengan tren kenaikan temperatur di permukaan. Mereka berargumen bahwa penurunan konsentrasi H_2O ini memiliki kontribusi sebesar 20% terhadap kenaikan temperatur permukaan. Di sisi lain, penelitian terkini menunjukkan bahwa variasi sub musiman di troposfer dikendalikan oleh perubahan angin zonal di stratosfer bawah (di sekitar paras 100 hPa–10 hPa) dengan periode ~26 bulanan yang disebut *Quasi Biennial Oscillation* (QBO) [6,7]. Di sisi lain, modulasi QBO terhadap variasi sub musiman juga berinteraksi dengan aktivitas gelombang ekuatorial [2,8,9]. Ini berarti bahwa penelitian dinamika global di stratosfer bawah penting dilakukan untuk memahami perubahan iklim.

Kawatani dkk. (2014) [10] berhasil menguji simulasi variasi antartahunan H_2O yang terkait QBO menggunakan *Model for Interdisciplinary Research on Climate Atmospheric General Circulation Model* (MIROC-AGCM) dan *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5) dengan menganalisis data konsentrasi H_2O dari sensor *Microwave Limb Sounder on board Aura satellite* (MLS Aura). Variasi antar tahunan konsentrasi ozon (O_3) di stratosfer bawah, dari pengamatan insitu balon ozonsonde, juga memiliki keterkaitan dengan QBO [11]. Akan tetapi, hubungan variasi H_2O dan O_3 di stratosfer masih belum jelas, terutama kaitannya dengan proses pendinginan dan pemanasan radiatif di stratosfer bawah.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki variasi H_2O dan O_3 menggunakan data observasi MLS Aura versi 4.2 [12], dan menganalisis hubungannya dengan proses pendinginan dan pemanasan radiatif. Kami akan fokus pada variasi antartahunan terutama pada fase QBO baratan dan timuran, untuk kemudian berturut-turut didefinisikan sebagai QBO *westerly phase* (QBO-W) dan QBO *easterly phase* (QBO-E). Kami menguji anomali atau penyimpangan dari rerata musiman terhadap kedua variabel H_2O dan O_3 .

Kami akan menguraikan hasil dan pembahasan setelah penjelasan profil H_2O dan O_3 . Diskusi penelitian lebih dititikberatkan pada variasi H_2O dan

O_3 pada diagram ketinggian terhadap waktu dan diagram ketinggian terhadap lintang. Bagian kesimpulan dalam artikel ini akan menjelaskan kontribusi ilmiah dari penelitian ini.

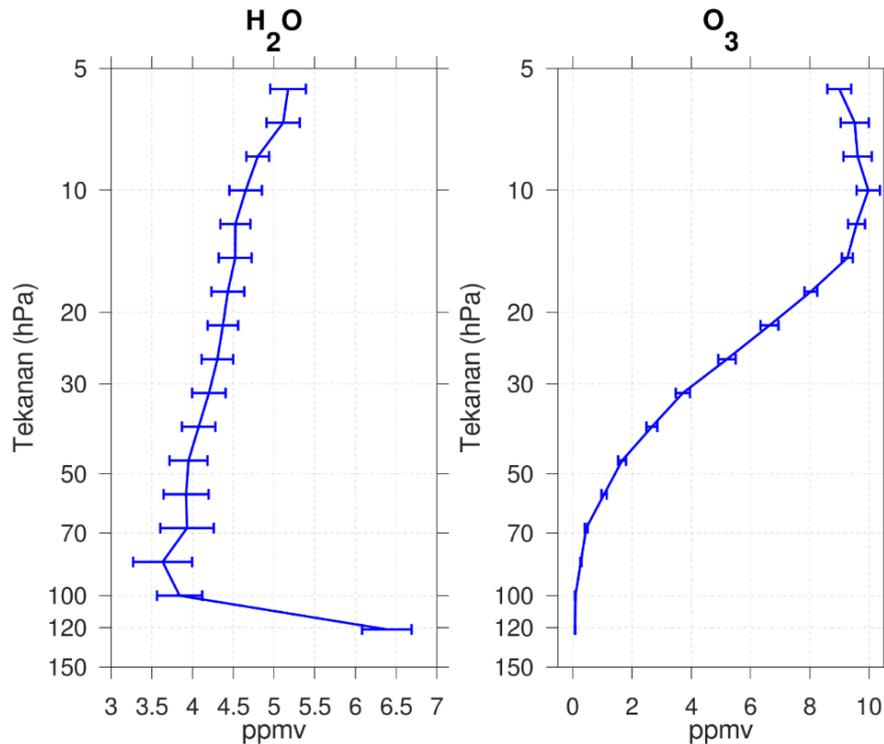
2. Metode Penelitian

Untuk menjawab pertanyaan penelitian mengenai hubungan variasi H_2O dan O_3 terhadap proses radiatif di stratosfer bawah, kami menggunakan data MLS Aura sebagai data utama dan *National Centers for Experimental Prediction Department of the Environment (NCEP DOE) Reanalysis II* sebagai data pendukung [13]. Berikut ini penjelasan rincinya.

Profil H_2O dan O_3 . Sapuan satelit orbit rendah atau *low Earth orbit* MLS Aura menghasilkan data vertikal dengan resolusi ~3 km dan mewakili ~150 km area horizontal di UTLS [12]. Informasi mengenai validitas data H_2O dan O_3 dari MLS Aura berturut-turut dapat ditemukan di jurnal yang ditulis oleh Lambert dkk. (2007) [14] dan Livesey dkk. (2008) [15]. Data profil H_2O dan O_3 yang digunakan merupakan versi terbaru (versi 4.2) yang memiliki bias lebih rendah dengan perbedaan 10% dibanding versi 3.3 yang digunakan oleh Kawatani dkk. (2014) [10]. Kami memanfaatkan data pengamatan MLS Aura mulai Agustus 2004 sampai Juli 2019 (sepanjang 16 tahun) yang dapat dikatakan representatif untuk menganalisis variasi antartahunan berkaitan dengan QBO.

Gambar 1 menunjukkan profil rerata dan standar deviasi H_2O dan O_3 sepanjang 16 tahun. Setelah menghitung rerata di tiap paras dari 120 hPa sampai 7 hPa, kami menghilangkan variasi tahunan untuk memperoleh data anomali. Karena dalam penelitian ini kami fokus pada sinyal antartahunan, maka standar deviasi yang ditampilkan dalam Gambar 1 dihitung dari fluktuasi antartahunan.

Data. Untuk melengkapi analisis variasi antartahunan konsentrasi uap air dan ozon di stratosfer, penelitian ini menggunakan data bulanan angin zonal (u) dan temperatur (T). Anomali u (u^*) dan anomali T (T^*) diperoleh dengan langkah yang sama untuk menghitung anomali H_2O dan O_3 . Data *NCEP DOE Reanalysis II* diperoleh dari <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>. Penyelidikan modulasi QBO terhadap H_2O dan O_3 dilakukan melalui analisis komposit pada saat fasa transisi dari QBO-E ke QBO-W, yakni dengan mengacu titik kritis ($u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$) di paras 30 hPa. Analisis dalam penelitian ini menitikberatkan pada interval ketinggian 100–10 hPa.



Gambar 1. Profil rerata dan standar deviasi antartahunan uap air dan ozon sepanjang Agustus 2004–Juli 2019

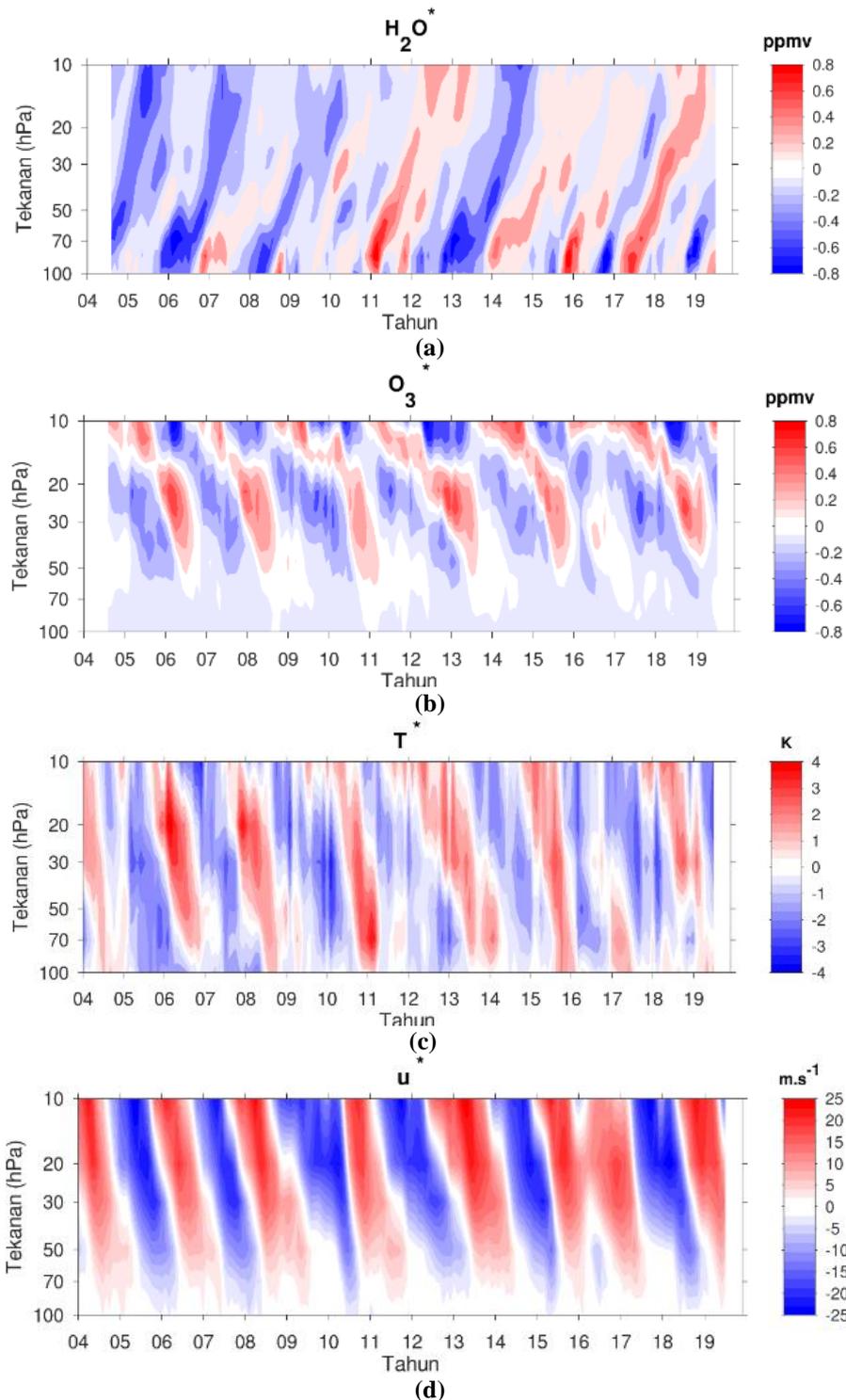
3. Hasil dan Pembahasan

Sebelum fokus pada anomali H₂O (H₂O*) dan anomali O₃ (O₃*) kami menampilkan profil rerata dan standar deviasi dari fluktuasi antartahunan untuk kedua variabel (Gambar 1). Rerata H₂O menurun tajam dari paras 120 hPa ke 100 hPa. Profil H₂O menurun tajam karena di ketinggian ini termasuk zona troposfer atas dan mendekati ketinggian tropopause. Udara kering yang terdesak ke atas apabila terdapat pertumbuhan awan cumulus, akan terjebak dan menurunkan kadar uap air di sekitar tropopause akibat proses pembekuan. Proses ini disebut sebagai *freeze drying*. Rerata H₂O pada rentang 100 hPa–10 hPa berkisar diantara 3.6–4.7 ppmv dengan standar deviasi maksimum di sekitar 100–83 hPa sebesar 0.75 ppmv (Gambar 1). Profil rerata H₂O dari data MLS Aura versi 4.2 ini konsisten dengan yang dilaporkan oleh Kawatani dkk. (2014) [10] namun nilai standar deviasi lebih kecil sekitar 10%. Penekanan kami adalah pada standar deviasi yang mencapai maksimum di dekat tropopause yang menunjukkan bahwa fluktuasi antartahunan H₂O lebih tegas terlihat di sekitar ketinggian ini.

Rerata O₃ sangat kecil ~0.2 ppmv di 83 hPa dan semakin meningkat hingga mencapai maksimum 10

± 0.1 ppmv di 10 hPa. Nilai ini konsisten dengan hasil pengamatan ozonsonde seperti yang ditunjukkan oleh Witte dkk. (2008) [11]. Kandungan ozon di sekitar tropopause sangat kecil karena ketinggian ini merupakan lapisan transisi. Ozon lebih terkonsentrasi di stratosfer tengah yang menyerap energi matahari dan menaikkan temperatur di stratosfer sehingga lapisan ini menjadi stabil dibanding troposfer. Akan tetapi, standar deviasi di 10 hPa (~30 km) hasil penelitian ini lebih kecil dibanding hasil pengamatan ozonsonde oleh Witte dkk. (2008) [11]. Hal ini kemungkinan karena kami fokus pada variasi antartahunan saja, sehingga deviasi yang mewakili amplitudo fluktuasi relatif lebih rendah dengan nilai deviasi yang melibatkan semua sinyal termasuk sinyal antarmusiman dan siklus tahunan.

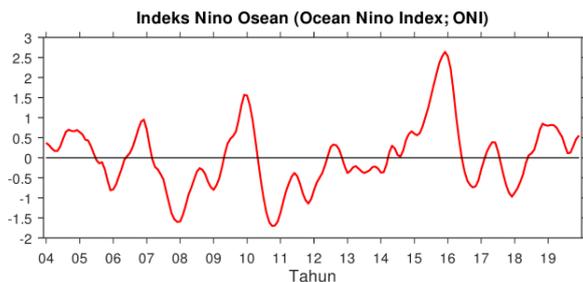
Sinyal antartahunan H₂O dan O₃. Gambar 2a dan 2b menunjukkan diagram ketinggian (tekanan) terhadap waktu H₂O* dan O₃* sepanjang Agustus 2004 sampai Juli 2019. QBO di stratosfer bawah dapat dilihat dengan jelas dari *u** yang menunjukkan pergantian angin baratan dan angin timuran merambat ke bawah, serta *T** yang menunjukkan propagasi ke bawah osilasi hangat–dingin (Gambar 2c dan 2d). Dari Gambar 2 ini dapat dikatakan bahwa terdapat keterkaitan antara variasi antartahunan H₂O* dan O₃* dengan QBO di stratosfer.



Gambar 2. Anomali variabel setelah dihilangkan sinyal tahunan; (a) uap air, (b) ozon, (c) temperatur dan (d) angin zonal

Gambar 3 menunjukkan ocean nino index atau ONI (<https://psl.noaa.gov/data/correlation/oni.data>) yang dapat dijadikan sebagai proksi kejadian El Niño (ONI > 0.5) dan La Niña (ONI < -0.5). Terlihat bahwa pola anomali negatif H_2O^* di sekitar tropopause terjadi sekitar 4 bulan setelah ONI menunjukkan nilai negatif (La Niña). Proses yang mungkin terjadi adalah saat kondisi di troposfer menunjukkan La Niña, pertumbuhan awan konvektif lebih tinggi dan

terkonsentrasi di wilayah benua maritim Indonesia. Anomali temperatur di sekitar tropopause menunjukkan negatif karena terjadi proses dehidrasi akibat udara dari troposfer atas yang terjebak.



Gambar 3 Deret waktu bulanan indkes nino osean sepanjang Januari 2004 s.d. Desember 2019.

Kita dapat melihat uap air berosilasi mulai dari tropopause dan merambat ke atas sampai ketinggian 10 hPa. Pola perambatan ke atas ini disebut sebagai ‘atmospheric tape recorder’ seperti yang pertama kali dilaporkan oleh Motel dkk. (1996) [16]. Hal yang baru pada penelitian ini yaitu kami menemukan bahwa variasi antartahunan H_2O^* adalah modulasi QBO, terutama di ketinggian 50 – 30 hPa. H_2O^* menunjukkan nilai maksimum positif (0.8 ppmv) pada akhir tahun 2010 sampai awal tahun 2011. Disisi lain, pada saat transisi 2013–2014, H_2O^* hanya mencapai 0.4 ppmv. H_2O^* negatif pada transisi 2005–2006 mencapai -0.8 ppmv yang menyebar hingga 50 hPa. Nilai minimum ini lebih tinggi dibanding pada awal tahun 2008 (-0.6 ppmv), namun pola H_2O^* negatif pada 2005–2006 terulang saat transisi 2012–2013. Ini berarti bahwa amplitudo H_2O^* bervariasi terhadap waktu, terutama di ketinggian 100–50 hPa.

Sinyal QBO terdeteksi kuat pada O_3^* di ketinggian 50–10 hPa yang memperlihatkan pola pergantian anomali negatif dan positif bersesuaian dengan propagasi T^* negatif (dingin) dan positif (hangat). Osilasi O_3^* di stratosfer ini juga beriringan dengan perambatan ke bawah pola angin baratan dan angin timuran. Dibawah 50 hPa, variasi antartahunan O_3^* sangat lemah. Witte dkk. (2008) [11] menunjukkan bahwa di bawah 25 km (~50 hPa) lebih didominasi oleh siklus tahunan. Hasil yang menarik terlihat pada tahun 2016–2017 dan 2017–2018 di interval 50 – 30 hPa, dimana pergantian O_3^* positif dan negatif berlangsung lebih lama dari periode sebelumnya. Pola anomali tersebut terlihat juga pada u^* dan T^* yang berkaitan dengan fenomena QBO disruption [17].

El Niño kuat terlihat memiliki hubungan terhadap terjadinya QBO disruption. Hipotesa proses fisis yang terjadi adalah seperti hasil analisis model oleh Kawatani dkk (2019) [18] bahwa El Niño mempengaruhi terhadap perubahan angin zonal di stratosfer yang lebih cepat (periodisitas QBO lebih singkat) dibanding saat kejadian La Niña.

Pergantian fasa QBO-E menjadi QBO-W terlihat jelas pada waktu dimana $u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$. Ern dkk. (2014)

[19] menunjukkan bahwa energi gelombang ekuatorial yang berkaitan dengan besaran $(T^*)^2$, mencapai maksimum saat transisi $u^* < 0$ ke $u^* > 0$. Oleh karenanya, $u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$ dapat dijadikan acuan untuk mengetahui modulasi QBO terhadap H_2O^* dan O_3^* . Kami akan mendiskusikan secara rinci melalui analisis komposit relatif terhadap $u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$ di 30 hPa.

Diagram komposit H_2O^* dan O_3 . Berdasarkan data MLS Aura sepanjang 16 tahun, kami menemukan sejumlah 5 sampel fasa transisi dari QBO-E ($u^* < 0$ atau ke arah barat) menjadi QBO-W ($u^* > 0$ atau ke arah timur). Jumlah sampel ini memang belum cukup memadai untuk memperoleh hasil statistik yang berarti (minimum 30 sampel) karena keterbatasan data pengamatan. Akan tetapi, langkah analisis ini dapat menguji hasil yang dilaporkan oleh Witte dkk. (2008) [11] perihal O_3^* dan Kawatani dkk. (2014) [10] terkait H_2O^* terutama berhubungan dengan proses pemanasan dan pendinginan radiatif.

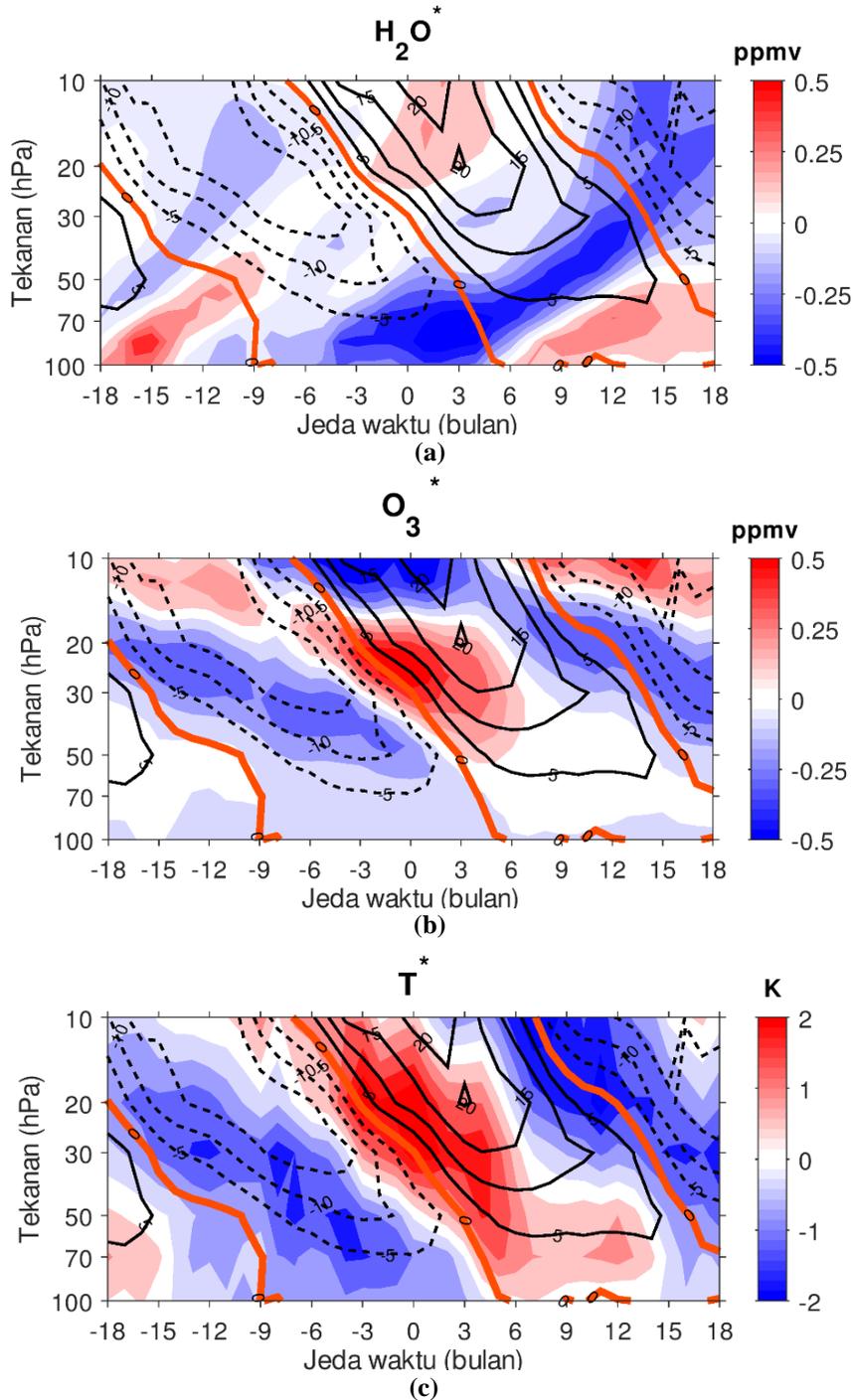
Gambar 4a, 4b dan 4c berturut-turut menunjukkan diagram komposit ketinggian terhadap waktu variabel H_2O^* , O_3^* dan T^* . Titik nol pada sumbu- x adalah waktu acuan saat $u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$ di 30 hPa. Anomali basah ($H_2O^* > 0$) terlihat di 100–70 hPa pada saat $u^* > 0$, sebaliknya anomali kering ($H_2O^* < 0$) tampak bersesuaian dengan $u^* < 0$. Nilai maksimum anomali basah pada waktu 16 bulan sebelum transisi terulang kembali 10 bulan setelah transisi. Fluktuasi ini menunjukkan modulasi QBO terhadap H_2O^* dengan periode ~26 bulan. Anomali kering di 100 hPa mulai terlihat 3 bulan sebelum dan 3 bulan sesudah transisi QBO di 30 hPa. Kemudian anomali kering ini merambat ke atas sampai di ketinggian 30–10 hPa pada waktu 15–18 bulan setelah periode transisi. Udara kering dari tropopause yang merambat ke atas hingga 10 hPa terlihat lebih kuat dibanding udara basah.

Diagram komposit O_3^* menunjukkan penurunan konsentrasi dari 20 hPa (mulai dari 18 bulan sebelum transisi) bergerak kebawah sampai sekitar 70 hPa (6 bulan hingga saat transisi) bersesuaian dengan fasa QBO-E. Anomali positif ozon tampak di ketinggian 10 hPa yang bergerak ke bawah lebih lambat menuju 20 hPa dan beriringan ke bawah (18–9 bulan sebelum transisi) terhadap periode perubahan dari QBO-E menjadi QBO-W di 20–50 hPa. Konsentrasi ozon maksimum terlihat pada zona $u^* = 0$ yang bertepatan dengan pemanasan radiatif (Gambar 4c). Pada saat yang sama, O_3^* di 10 hPa memperlihatkan nilai negatif yang kemudian bergerak ke bawah relatif terhadap waktu beriringan dengan periode transisi dari fasa QBO-W menjadi QBO-E. Secara umum dapat dikatakan bahwa terdapat perambatan ke bawah relatif terhadap waktu, konsentrasi ozon yang mengalami penurunan dan peningkatan, berturut turut

bersamaan dengan fasa QBO-E dan QBO-W, terutama di ketinggian 20–50 hPa, pola sebaliknya terlihat di paras 10–20 hPa.

Modulasi QBO terhadap variasi antartahunan H_2O^* dan O_3^* tampak berpengaruh pada pola pemanasan dan pendinginan radiatif di stratosfer bawah terutama di sekitar 50–30 hPa (Gambar 4c). Ketika terjadi

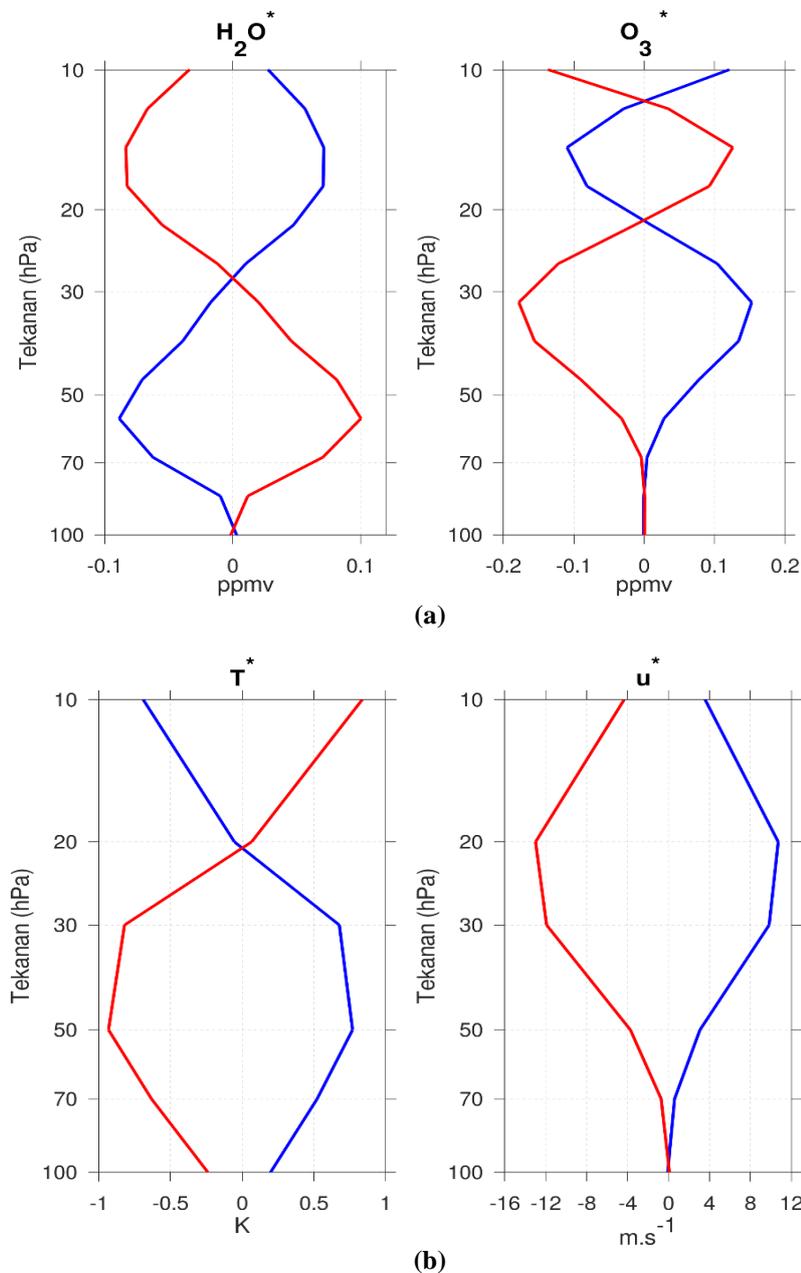
peningkatan H_2O^* bersamaan dengan penurunan O_3^* respon pada saat QBO-E terjadi pendinginan radiatif. Pada saat udara kering ($H_2O^* \sim -0.5$ ppmv) bergerak ke atas dan udara dengan kandungan ozon tinggi (0.5 ppmv) bergerak ke bawah bertemu di sekitar periode transisi (bulan ke-0), maka akan terjadi pemanasan radiatif sebesar 2 K oleh ozon. Hasil ini menegaskan variasi pemanasan dan pendinginan di stratosfer bawah berkaitan dengan perambatan QBO.



Gambar 4. Diagram komposit anomali variabel relatif terhadap $u^* = 0 \text{ m.s}^{-1}$ di 30 hPa; (a) uap air, (b) ozon dan (c) temperatur

Profil rerata H_2O^* dan O_3^* pada saat QBO-E dan QBO-W. Untuk melihat perbedaan pola anomali uap air dan ozon pada saat QBO-E dan QBO-W, kami menghitung rerata profil berturut-turut relatif terhadap $u^* < 0$ dan $u^* > 0$ di 30 hPa. Gambar 5 menunjukkan profil rerata H_2O^* dan O_3^* dilengkapi rerata T^* dan u^* . Selama masa QBO-W yang ditandai oleh rerata u^* sebesar 10 m.s^{-1} di 30 hPa, H_2O^* menurun mencapai minimum -0.08 ppmv di 56 hPa dan berbalik meningkat hingga mencapai titik maksimum 0.06 ppmv di 15 hPa (garis biru pada Gambar 5). Dalam periode yang sama, O_3^* terlihat minimum -0.1 ppmv di 15 hPa dan berbalik meningkat hingga tercapai maksimum 0.15 ppmv di 30 hPa. Respon temperatur di 30 hPa saat QBO-W

terhadap anomali positif ozon menyebabkan pemanasan radiatif mencapai sekitar 0.75 K di 30–50 hPa. Sementara itu, selama periode QBO-E dengan rerata u^* di 30 hPa sebesar -13 m.s^{-1} , terjadi peningkatan uap air 0.1 ppmv di 56 hPa dan penurunan ozon -0.18 ppmv di 30 hPa. Respon temperatur di sekitar ketinggian yang sama menunjukkan pendinginan radiatif sebesar -0.9 K . Secara keseluruhan, terlihat pola kebalikan antara profil rerata H_2O^* dan O_3^* pada fasa QBO-W dan QBO-E yang berhubungan dengan pemanasan dan pendinginan radiatif.



Gambar 5. Profil rerata anomali variabel pada fasa QBO-E (merah) dan QBO-W (biru)

Hal yang menarik adalah puncak minimum H_2O^* (56 hPa) terletak lebih rendah dibanding puncak maksimum O_3^* (30 hPa) saat QBO-W. Akan tetapi, di interval ketinggian 30–10 hPa, $O_3^* < 0$ terlihat lebih terpusat pada ketinggian 20–30 hPa, sedangkan $H_2O^* > 0$ terlihat lebih menyebar sepanjang 30–10 hPa. Pola sebaliknya terlihat juga selama periode QBO-E. Kami menemukan pola dua kutub berdasarkan profil T^* , yaitu anomali hangat–dingin di 50–100 hPa dan anomali dingin–hangat di 10–30 hPa yang berkaitan dengan konsentrasi uap air dan ozon.

Penelitian ini telah mengungkap bahwa modulasi QBO terhadap konsentrasi uap air dan ozon memengaruhi pola pemanasan dan pendinginan radiatif di stratosfer bawah. Griise dkk. (2010) [20] menyatakan bahwa kestabilan di stratosfer bawah bernilai negatif dan positif berturut–turut saat QBO-E dan QBO-W. Secara teori, stabilitas atmosfer akan menurun seiring dengan penurunan temperatur, dan sebaliknya. Hasil yang diperlihatkan dalam penelitian menunjukkan bahwa pada saat QBO-E terjadi pendinginan radiatif oleh peningkatan H_2O^* dan penurunan O_3^* . Sebaliknya, ketika memasuki fasa QBO-W udara kering dengan konsentrasi ozon tinggi akan menaikkan temperatur akibat pemanasan radiatif. Kenaikkan temperatur ini berpotensi meningkatkan indeks kestabilan atmosfer [20].

Nilai variansi temperatur yang dapat diwakili oleh $(T^*)^2$ sebanding dengan besaran energi potensial gelombang ekuatorial [8,19,21]. Hasil menurut Gambar 4 menunjukkan pada saat QBO-E nilai $(T^*)^2$ sebesar $(-0.9 K)^2 = 0.81 K^2$, sedangkan selama QBO-W sebesar $(0.75 K)^2 \approx 0.56 K^2$. Perbedaan variansi temperatur saat QBO-E dan QBO-W berhubungan erat dengan konsentrasi H_2O^* dan O_3^* .

4. Kesimpulan

Penyelidikan variasi antartahunan H_2O dan O_3 di stratosfer bawah menggunakan data MLS Aura telah mengekstrak modulasi QBO terhadap kedua variabel tersebut. Kontur H_2O^* menunjukkan osilasi yang merambat ke atas relatif terhadap waktu yang disebut ‘*atmospheric tape recorder*’. Perambatan ke bawah tampak jelas pada O_3^* terutama di ketinggian 50–0 hPa. Pergerakan anomali hangat–dingin secara bergantian terkait QBO juga terlihat pada T^* , yang menggambarkan proses pemanasan dan pendinginan radiatif.

Hasil komposit H_2O^* menegaskan anomali kering di 100 hPa mulai terlihat 3 bulan sebelum dan 3 bulan sesudah transisi QBO di 30 hPa. Sementara itu, O_3^* menurun dan meningkat bersesuaian dengan fasa QBO-E dan QBO-W, terutama di ketinggian 20–50 hPa, sedangkan pola berlawanan tampak di 10–20 hPa. Ketika udara kering ($H_2O^* \sim -0.5$ ppmv)

merambat ke atas dan $O_3^* 0.5$ ppmv, maka akan terjadi pemanasan radiatif hingga 2 K.

Identifikasi profil rerata H_2O^* , O_3^* dan T^* pada fasa QBO-W menunjukkan H_2O^* minimum -0.08 ppmv di 56 hPa dan O_3^* maksimum 0.15 ppmv di 30 hPa menyebabkan pemanasan radiatif hingga 0.75 K. Sedangkan selama periode QBO-E, H_2O^* maksimum 0.1 ppmv dan O_3^* minimum -0.18 ppmv memberikan respon pendinginan radiatif mencapai -0.9 K. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa modulasi QBO terhadap anomali konsentrasi uap air dan ozon menyebabkan respon pendinginan dan pemanasan radiatif di stratosfer bawah

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *Earth Observing System Microwave Limb Sounder Aura* (EOS MLS Aura) of NASA (<https://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>) yang menyediakan data uap air dan ozon. Penelitian ini bagian dari kegiatan Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA) LAPAN.

Pernyataan Kontribusi Penulis

Noersomadi: menulis manuskrip, mendesain penelitian dan menginterpretasi data.
Dita Fatria Andarini: melakukan pengolahan data dan bersama Noersomadi menyepakati isi naskah.

Daftar Pustaka

- [1] J.R. Holton, P.T. Haynes, M.E. McIntyre, A.R. Douglass, R.B. Rood, and L. Pfister, “Stratosphere-Troposphere Exchange,” *Reviews of Geophysics*, 3, 4, 403–439, 1995.
- [2] W.J. Randel, and F. Wu, “Kelvin wave variability near the equatorial tropopause observed in GPS radio occultation measurements,” *Journal of Geophysical Research*, 10, D03102, doi:10.1029/2004JD005006, 2005.
- [3] A. Fueglistaler, A.E. Dessler, T.J. Dunkerton, I. Folkins, Q. Fu, and P.W. Mote, “Tropical Tropopause Layer,” *Review of Geophysics*, 47, RG1004, 2009.
- [4] A.K. Steiner, B.C. Lackner, F. Ladstadter, B. Scherllin-Pirscher, U. Foelsche, and G. Kirchengast, “GPS radio occultation for climate monitoring and change detection,” *Radio Science*, 46, RS0D24, doi:10.1029/2010RS004614, 2011.
- [5] S. Solomon, K.H. Rosenlof, R.W. Portmann, J.S. Daniel, S.M. Davis, T.J. Sanford, and G. Plattner, “Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming,” *Science*, 327 (5970), 1212–1223. 2010.

- [6] M.P. Baldwin, L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton, P.H. Haynes, W.J. Randel, J.R. Holton, M.J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D.B.A. Jones, J.S. Kinnnersley, C. Marquardt, K. Sato, and M. Makahasi, "The Quasi-Biennial Oscillation," *Review of Geophysics*, 39 (2), 179–229, 2001.
- [7] S. Son, Y. Lim, C. Yoo, H.H. Hedon, and J. Kim, "Stratospheric Control of the Madden-Julian Oscillation," *Journal of Climate*, 30, 1909–1922, 2017.
- [8] S.P. Alexander, T. Tsuda, Y. Kawatani, and M. Takahashi, "Global distribution of atmospheric waves in the equatorial upper troposphere and lower stratosphere: COSMIC observations of wave mean flow interactions," *Journal of Geophysical Research*, 113 D24115, DOI:10.1029/2008JD010039, 2008.
- [9] E. Nishimoto, and S. Yoden, "Influence of the Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation on the Madden-Julian Oscillation during Austral Summer," *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74, 1105–1125, 2017.
- [10] Y. Kawatani, J.N. Lee, and K. Hamilton, "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, 2014.
- [11] J.C. Witte, M.R. Schoebert, A.R. Douglass, and A.M. Thompson, "The Quasi-biennial Oscillation and annual variations in tropical ozone from SHADOZ and HALOE," *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3929–3936, 2008.
- [12] N.J. Livesey, W.G. Reag, L. Foidevaux, A. Lambert, G.L. Manney, H.C. Pumphrey, M.L. Santee, M.J. Schwartz, S. Wang, R.E. Cofield, D.T. Cuddy, R.A. Fuller, R.F. Jarnot, J.H. Jiang, B.W. Knosp, P.C. Stek, P.A. Wagner, dan D.L. Wu, "EOS MLS version 3.3 and 3.4 Level 2 data quality and description document," *Tech. rep., Jet Propulsion Laboratory*, available from <http://mls.jpl.nasa.gov/>, 2013.
- [13] M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.K. Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino and G.L. Potter, "NCEP-DOE AMIIP-II Reanalysis (R-2)," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1631–1643, 2002.
- [14] A. Lambert, W.G. Read, N.J. Livesey, M.L. Santee, G.L. Manney, L. Froidevaux, D.L. Wu, M.J. Schwartz, H.C. Pumphrey, C. Jimenez, G.W. Nedoluha, R.E. Cofield, D.T. Cuddy, W.H. Daffer, B.J. Druin, R.A. Fuller, R.F. Jarnot, B.W. Knosp, H.M. Pickettm,... and W. Atlas, "Validation of the Aura Microwave Limb Sounder middle atmosphere water vapor and nitrous oxide measurements," *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2007JD008724, 2007.
- [15] N.J. Livesey, M.J. Filipiak, L. Froidevaux, W.G. Read, A. Lambert, M.L. Santee, J.H. Jiang, H.C. Pumphrey, J.W. Waters, R.E. Cofield, D.T. Cuddy, W.H. Daffer, B.J. Drouin, R.A. Fuller, R.F. Jarnot, Y.B. Jiang, B.W. Knosp, Q.B. Li, V.S. Perum, M.J. Schwartz,... and C.R. Webster, "Validation of Aura Microwave Limb Sounder O3 and CO observations in the upper troposphere and lower stratosphere," *Journal of Gephysical Research*, 113, D15S02, doi:10.1029/2007JD008805, 2008.
- [16] P.W. Mote, K.H. Rosenlof, M.E. McIntyre, E.S. Carrm J.C. Gille, J.R. Holton, J.S. Kinnnersley, H.C. Pumphrey, J.M. Russell, and J.W. Waters, "An Atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor," *Journal of Geophysical Research*, 101, 3989–4006, 1996.
- [17] S.M. Osprey, N. Butchart, J.R. Knight, A.A. Scaife, K. Hamilton, J.A. Anstey, V. Schenzinger, and C. Zhang, "An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillatio," *Science*, 353 (6306), 1424–1427, 2016.
- [18] Y. Kawatani, K. Hamilton, K. Sato, T.J. Dunkerton, S. Watanabe, K. Kikuchi, "ENSO Modulation of the QBO: Results from MIROC Models with and without Nonorographic Gravity Wave Parameterization", *J. Atmos. Sci.*, 76 (12), 3893–3917, 2019
- [19] M. Ern, F. Plogger, P. Preusse, J.C. Gille, L.J. Gray, S. Kalisch, M.G. Mlynckzak, J.M. Russell III, and M. Riese, "Interaction of gravity waves with the QBO: A satellite perspective," *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 119, 2329–2355, doi:10.1002/2013JD020731, 2014.
- [20] K.M. Grise, D.W.J. Thompson, and T. Birner, "A Global Survei of Static Stability in the Stratosphere and Upper Troposphere," *American Meteorological Society*, 23, 2275–2292, 2010
- [21] B.A. Scherllin-Pirscher, A.K. Steiner, G. Kirchengast, M. Schwarz, and S.S. Leory, "The power of vertical geolocation of atmospheric profiles from GNSS radio occultation," *Journal of Geophysics Research: Atmospheres*, 122, 1595–1616, doi:10.1002/2016JD025902, 2017.