

PROFIL VERTIKAL ASAM NITRAT (HNO_3) DI STRATOSFER INDONESIA BERBASIS SATELIT

Novita Ambarsari

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN

Pos-el : novitaambar@yahoo.com, novita.ambarsari@lapan.go.id

Abstract

This research studied the vertical profile of nitric acid (HNO_3) in the stratosphere, the pattern of relationship with nitrous oxide (N_2O), and the effect on ozone in Indonesia using data from sensors measuring the Microwave Limb Sounder (MLS) AURA satellite for the years 2005-2014. The results showed the highest concentration of HNO_3 at an altitude of about 25-30 km to 5 ppbv in June-July-August. Scatter plot $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ and $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ showed a pattern consistent inverse relationship and that are influenced by altitude. It also reinforced the correlation coefficient $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ and $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ varying by elevation. At 21 km, $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ negatively correlated with a correlation coefficient of 0.9, while $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ were positively correlated with a correlation coefficient of 0.84. At 26 km shows the same correlation with a correlation coefficient of 0.94 for $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ and only 0.54 for $\text{HNO}_3:\text{O}_3$. At 32 km both showed a negative correlation with the respective value of about 0.8.

Keywords : vertical profile, nitric acid, ozone, MLS, AURA.

Abstrak

Penelitian ini mempelajari mengenai profil vertikal asam nitrat (HNO_3) di stratosfer, pola hubungannya dengan *nitrous oxide* (N_2O), serta pengaruhnya terhadap ozon di Indonesia menggunakan data hasil pengukuran sensor *Microwave Limb Sounder* (MLS) satelit AURA untuk tahun 2005-2014. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi HNO_3 tertinggi pada ketinggian sekitar 25-30 km mencapai 5 ppbv pada bulan Juni-Juli-Agustus. *Scatter plot* $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ dan $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ menunjukkan pola hubungan berkebalikan maupun sejalan yang dipengaruhi oleh ketinggian. Hal ini juga diperkuat dengan nilai koefisien korelasi $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ dan $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ yang bervariasi pada beberapa ketinggian. Pada 21 km, $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ berkorelasi negatif dengan nilai koefisien korelasi 0,9 sedangkan $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ berkorelasi positif dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,84. Pada 26 km menunjukkan korelasi yang sama dengan nilai koefisien korelasi 0,94 untuk $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ dan hanya 0,54 untuk $\text{HNO}_3:\text{O}_3$. Pada 32 km keduanya menunjukkan korelasi negatif dengan nilai masing-masing sekitar 0,8.

Kata Kunci : profil vertikal, asam nitrat, ozon, MLS, AURA

1. PENDAHULUAN

Asam nitrat (HNO_3) merupakan komponen utama dari total nitrogen reaktif yang biasa ditulis NO_y ($\text{NO}_y = \text{NO}_x + \text{produk oksidasi}$, $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) yang berperan dalam reaksi katalisis penguraian ozon, sehingga HNO_3 terlibat secara langsung dalam mengontrol konsentrasi ozon di stratosfer.^{1,2,3,4} Pembentukan HNO_3 diperkirakan menjadi jalur yang mengurangi konsentrasi NO dan NO_2 di stratosfer sehingga berdampak pada reaksi kimia yang melibatkan NO_x dalam proses penguraian ozon.^{1,5} Di wilayah kutub, terbentuknya HNO_3 di awan-awan stratosfer menyebabkan proses denitrifikasi di stratosfer bawah akibatnya terjadi aktivasi spesies klorin yang menyebabkan terjadinya *spring time ozone hole*.¹ HNO_3 adalah reservoir yang juga merupakan jalur *sink* untuk senyawa NO_x baik di troposfer maupun stratosfer dan menjadi komponen yang dapat dipelajari untuk memahami proses kimia yang terjadi di atmosfer.^{6,7} HNO_3 terbentuk dari reaksi antara NO_2 dan OH dan terurai terutama akibat proses fotolisis dan reaksi dengan radikal OH .^{1,3} Waktu hidup

HNO₃ bervariasi dari sekitar satu bulan di stratosfer bawah hingga hanya sekitar satu jam di stratosfer atas.¹

Selain itu, HNO₃ juga berkontribusi terhadap terjadinya hujan asam di troposfer. HNO₃ dalam jumlah banyak dominan terjadi di stratosfer di wilayah kutub dan hanya sedikit yang ada di troposfer. HNO₃ di troposfer berperan dalam proses *sink* senyawa NO_x, perannya sebagai reservoir dalam terjadinya transport polusi udara dalam skala *long range*. Nitrat aerosol yang juga terbentuk dari asam nitrat di troposfer juga sangat penting pengaruhnya terhadap iklim.⁶

Penelitian mengenai profil vertikal HNO₃ menggunakan berbagai instrumen baik di permukaan maupun menggunakan satelit telah banyak dilakukan. Profil vertikal HNO₃ dari instrumen HIRDLS satelit AURA dilakukan oleh Kinnison¹, penelitian mengenai HNO₃ di stratosfer dengan instrumen *Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding* (MIPAS) pada satelit ENVISAT telah dilakukan oleh Orsolini⁷, kemudian penelitian mengenai distribusi global HNO₃ menggunakan instrumen IASI/METOP telah dilakukan oleh Wespes⁶. Secara umum hasil berbagai penelitian tersebut menunjukkan konsentrasi maksimum HNO₃ terjadi pada ketinggian sekitar 20-30 km dengan variasi musiman yang berbeda tergantung lokasi penelitian. Untuk mempelajari kaitan HNO₃ dengan ozon telah dilakukan juga penelitian mengenai korelasi stratosfer HNO₃ dan ozon yang dilakukan oleh Popp², menggunakan instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) satelit AURA dan instrumen ACE-FTS. Hasil penelitian tersebut menunjukkan korelasi sangat baik di lapisan stratosfer bawah.

Berdasarkan beberapa literatur tersebut, pada penelitian ini dipelajari profil vertikal HNO₃ di stratosfer Indonesia serta keterkaitannya dengan NO_y yang direpresentasikan dengan N₂O serta ozon menggunakan data-data hasil pengukuran sensor MLS AURA untuk wilayah Indonesia pada periode penelitian tahun 2005-2014.

2. METODE PENELITIAN

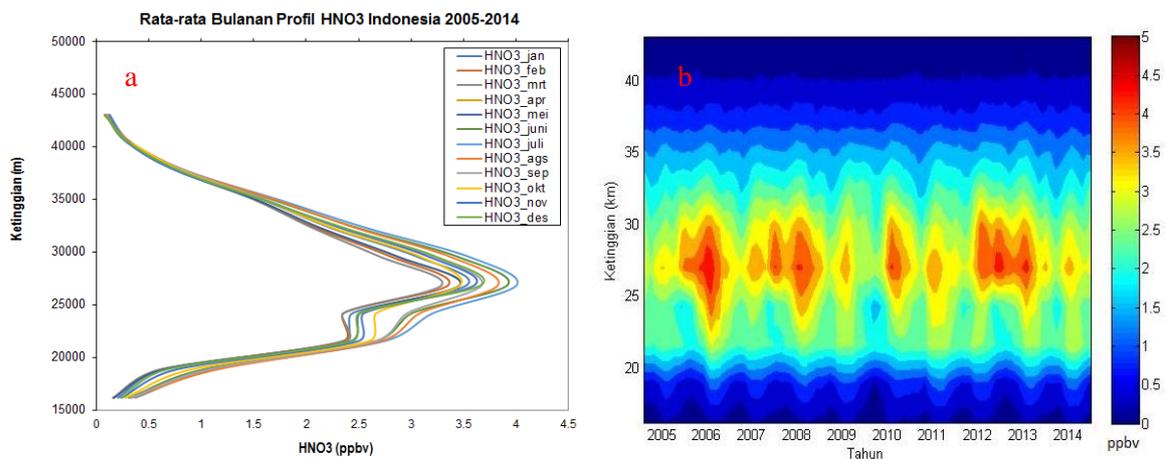
Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data profil vertikal harian HNO₃, N₂O, dan ozon hasil pengukuran sensor MLS AURA untuk wilayah Indonesia selama tahun 2005-2014. Sensor MLS AURA memiliki kemampuan untuk mengukur parameter kimia atmosfer termasuk HNO₃, N₂O, dan ozon dengan cakupan wilayah global dan dengan resolusi data yang cukup baik yaitu resolusi vertikal 3 km dan spasial 200 km.⁸

MLS melakukan pengukuran komposisi atmosfer, temperatur, kelembapan dan awan es yang dibutuhkan untuk mengetahui kestabilan lapisan ozon, memprediksi perubahan iklim dan variabilitasnya, serta mengembangkan pemahaman mengenai kualitas udara. MLS mengobservasi radiasi termal pada gelombang mikro yang diemisikan bumi, merekam data dari permukaan hingga 90 km setiap 25 detik. Pengukuran oleh MLS dilakukan secara global pada siang dan malam hari.⁹

Data profil vertikal harian HNO₃, N₂O, dan ozon dari MLS dalam format *Hierarchical Data Format* (HDF) diekstrak untuk memperoleh parameter lintang, bujur, tekanan (hPa) kemudian dikonversi menjadi ketinggian (km), dan konsentrasi HNO₃, N₂O, dan ozon (ppbv). Kemudian dirata-ratakan untuk area Indonesia (*area average*) menghasilkan satu profil vertikal harian untuk seluruh Indonesia. Selanjutnya dilakukan perata-rataan bulanan dan musiman untuk memperoleh variasinya. MLS mampu mengukur konsentrasi HNO₃, N₂O, dan ozon dari troposfer atas hingga termosfer bawah (91 km). Analisis difokuskan pada profil vertikal HNO₃, N₂O, dan ozon dari ketinggian 16 km hingga 43 km atau dari lapisan sekitar *tropopause* hingga stratosfer. Untuk melihat hubungan HNO₃ dan ozon dan HNO₃ dan N₂O dibuat *scatter plot* pada setiap ketinggian dari 16 km hingga 43 km serta korelasi HNO₃:O₃ dan HNO₃:N₂O.

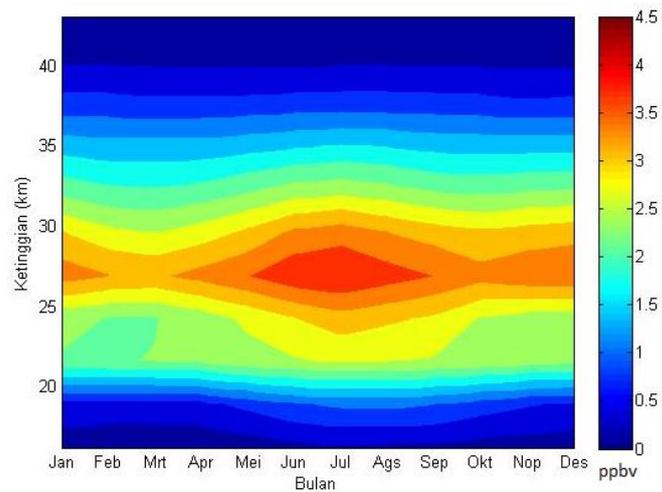
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil vertikal rata-rata bulanan untuk HNO_3 di stratosfer Indonesia ditunjukkan pada Gambar 1. Profil vertikal HNO_3 pada Gambar 1 merupakan profil rata-rata bulanan dan rata-rata profil vertikal HNO_3 di seluruh wilayah Indonesia ($12^\circ\text{LU} - 12^\circ\text{LS}$, $95^\circ\text{BT} - 145^\circ\text{BT}$). Profil vertikal HNO_3 seperti tampak pada Gambar 1(a) menunjukkan konsentrasi HNO_3 di stratosfer berkisar antara 0,1 ppbv hingga 4 ppbv dan mencapai maksimum pada ketinggian antara 25-30 km dengan konsentrasi mencapai 4 ppbv terjadi pada bulan Juli. Pada Gambar 1(b) *time series* HNO_3 sebagai fungsi ketinggian terlihat adanya pola antar tahunan konsentrasi maksimum HNO_3 yaitu pada tahun 2006, 2008, 2010, dan 2012. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Fiorucci⁵, yang mempelajari distribusi vertikal HNO_3 dan O_3 di stratosfer di wilayah Greenland menunjukkan maksimum konsentrasi HNO_3 terjadi pada ketinggian sekitar 20-25 km dengan konsentrasi mencapai 10 ppbv. Adanya perbedaan ketinggian saat konsentrasi HNO_3 mencapai maksimum serta nilai konsentrasinya akibat pengaruh perbedaan lokasi atau pengaruh perbedaan lintang. Di wilayah tropis, konsentrasi HNO_3 lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi di wilayah kutub yang disebabkan adanya sirkulasi global yang membawa massa udara dari wilayah tropis ke wilayah kutub.⁵ Pada Gambar 1(a) tampak adanya penurunan konsentrasi HNO_3 pada ketinggian sekitar 20-25 km yang diperkirakan terjadi akibat adanya proses denitrifikasi atau penghilangan senyawa NO_y melalui pembentukan awan-awan stratosfer. Penurunan konsentrasi NO_y sebagai sumber terbentuknya HNO_3 menyebabkan menurunnya konsentrasi HNO_3 .¹⁰

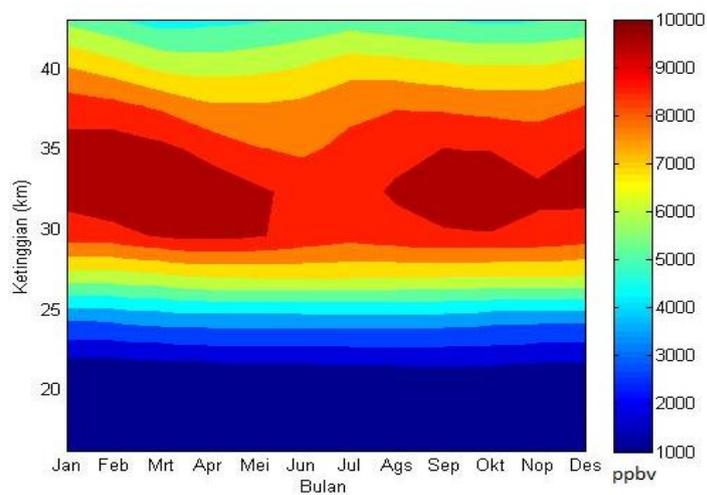


Gambar 1. Profil Vertikal Bulanan HNO_3 (a) Time series HNO_3 sebagai fungsi ketinggian (b)

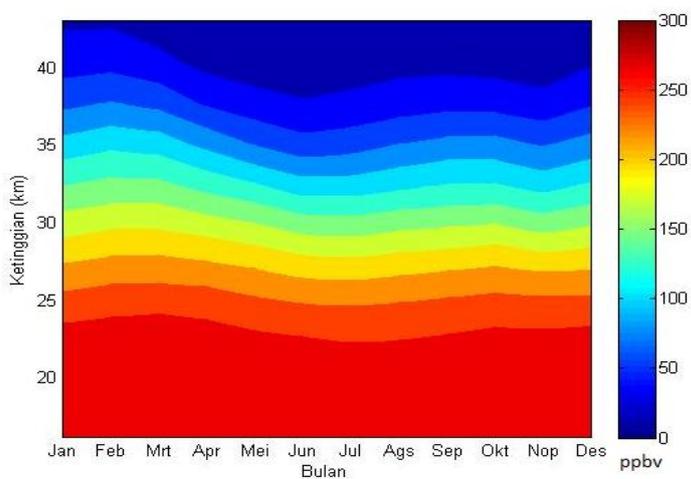
Variasi bulanan sebagai fungsi ketinggian untuk HNO_3 , O_3 , dan N_2O ditampilkan pada Gambar 2. Terlihat perbedaan yang jelas variasi bulanan di antara ketiga senyawa tersebut. Untuk HNO_3 , konsentrasi maksimum terjadi pada bulan Juni-Juli-Agustus pada ketinggian antara 25-30 km dengan konsentrasi mencapai 4,5 ppbv, sedangkan variasi minimum pada ketinggian tersebut terjadi pada bulan Februari-Maret dan Oktober dengan nilai 3 hingga 3,5 ppbv.



(a) HNO₃



(b) O₃



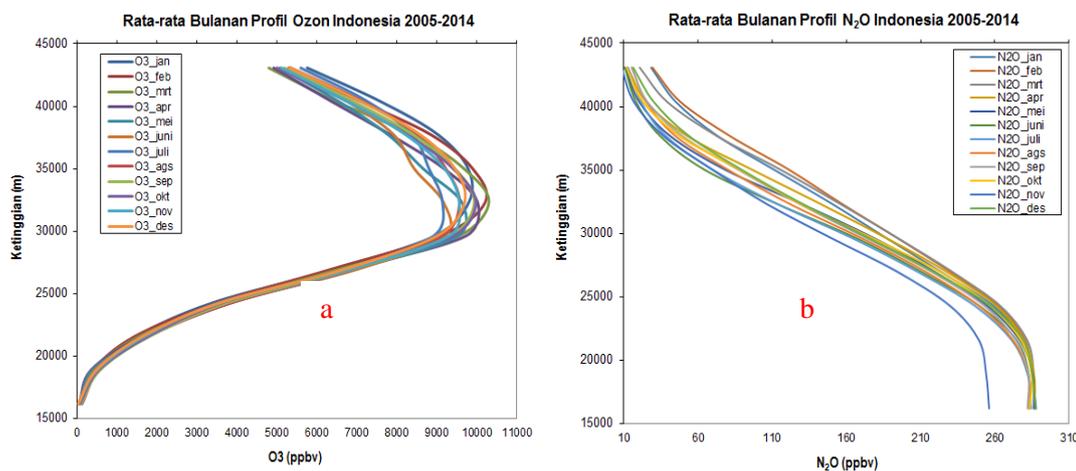
(c) N₂O

Gambar 2. Variasi Bulanan sebagai Fungsi Ketinggian (a) HNO₃ (b) O₃ dan (c) N₂O

Variasi bulanan HNO_3 di stratosfer yang mencapai maksimum pada bulan Juni-Juli-Agustus kemungkinan berkaitan dengan variasi temperatur. Pada bulan Juni-Juli-Agustus, temperatur di stratosfer mengalami nilai terendah akibat siklus matahari yang berada pada posisi terjauh dari ekuator atau disebut juga *solistice* yang terjadi pada bulan Juni dan Desember.¹¹ Temperatur stratosfer yang rendah mengakibatkan terbentuknya awan-awan stratosfer yang mengakumulasi konsentrasi HNO_3 .¹² Pada bulan Februari-Maret dan September-Oktober, konsentrasi HNO_3 mencapai minimum karena temperatur stratosfer yang tinggi disebabkan posisi ekuator yang berada pada jarak terdekat dengan matahari atau disebut juga *equinox* yang terjadi pada bulan Maret dan September.¹³

Hal yang berbeda untuk ozon yang mengalami konsentrasi maksimum dua kali yaitu pada bulan Januari-Februari-Maret dan bulan September-Oktober pada ketinggian antara 30 hingga 35 km dengan konsentrasi mencapai 10000 ppbv atau 10 ppmv. Variasi minimum pada ketinggian tersebut sebaliknya terjadi pada bulan Juni-Juli-Agustus dengan konsentrasi antara 8000 hingga 9000 ppbv atau 8 hingga 9 ppmv. Proses pembentukan ozon di stratosfer yang dominan berasal dari reaksi fotokimia menjadikan radiasi matahari berperan sangat penting. Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, pada bulan Juni-Juli-Agustus, matahari berada pada posisi yang terjauh dari ekuator sehingga mengakibatkan penurunan konsentrasi ozon.¹¹

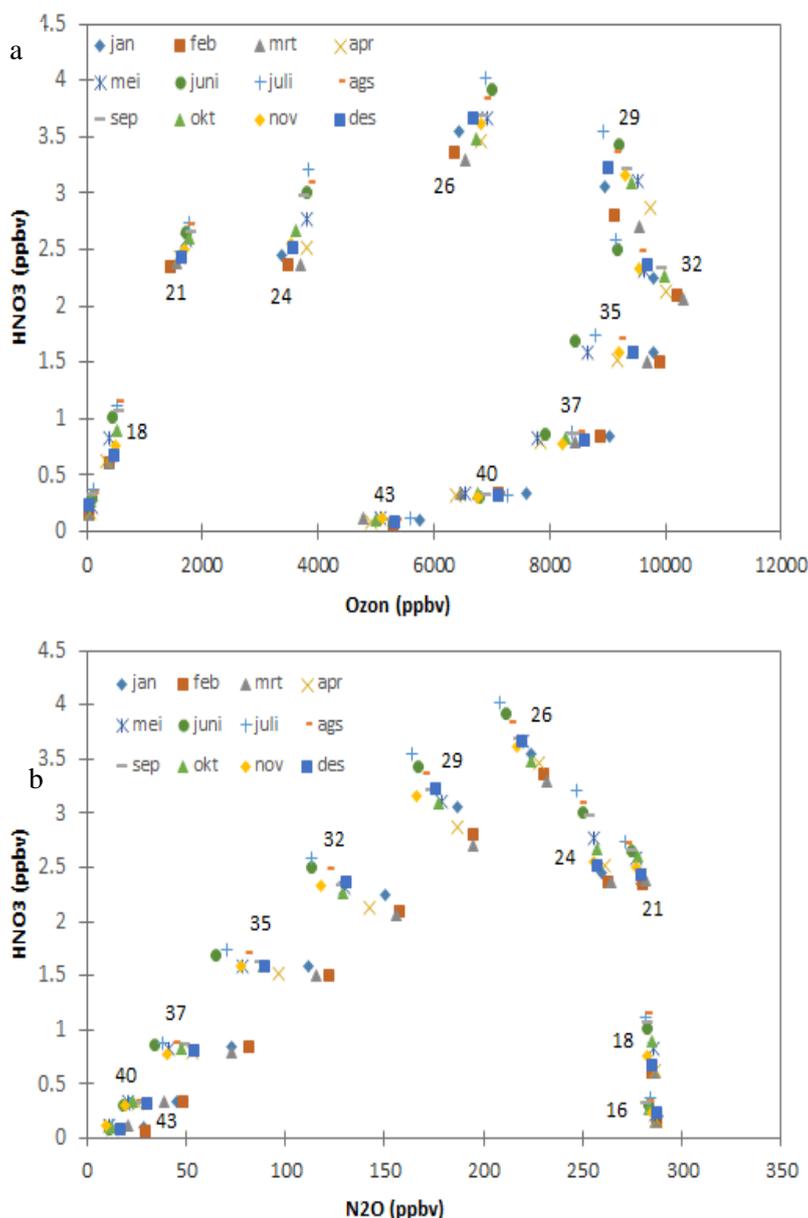
Variasi yang berbeda juga ditunjukkan oleh N_2O yang mengalami maksimum konsentrasi pada lapisan stratosfer bawah hingga ketinggian sekitar 20 km dengan konsentrasi 300 ppbv dan terus menurun hingga ke stratosfer atas. N_2O yang sumbernya lebih banyak di permukaan menjadi penyebab menurunnya konsentrasi N_2O seiring meningkatnya ketinggian di stratosfer. Pola yang sama juga ditunjukkan pada gambar profil vertikal rata-rata bulanan ozon dan N_2O (Gambar 3) terlihat profil maksimum ozon terjadi pada ketinggian antara 30-35 km dengan konsentrasi mencapai 10.000 ppbv dan profil vertikal N_2O yang mengalami konsentrasi tinggi di ketinggian antara 16 hingga 20 km sebesar 250 hingga 300 ppbv.



Gambar 3. Profil Vertikal Bulanan (a) O_3 dan (b) N_2O di Stratosfer Indonesia

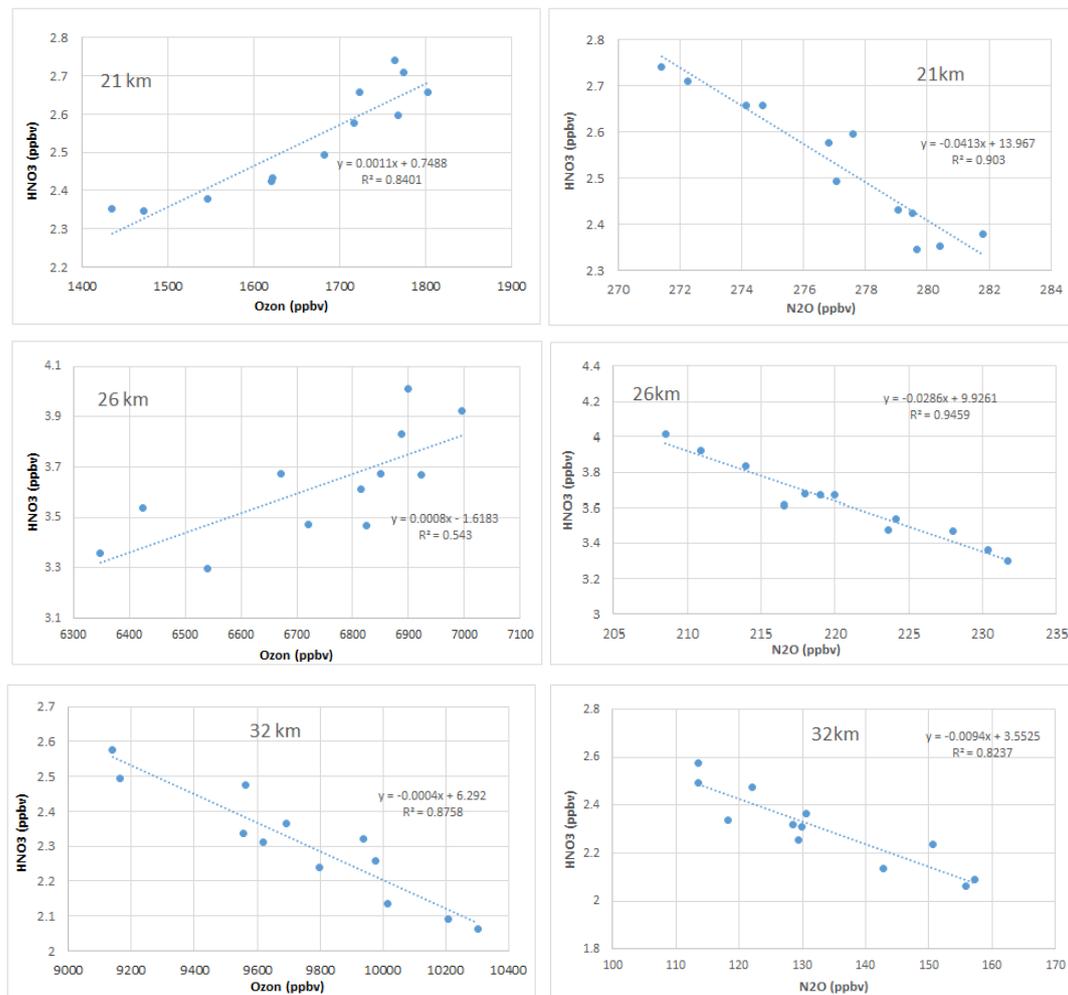
Untuk mengetahui pola hubungan HNO_3 terhadap ozon dan N_2O pada setiap ketinggian, telah dibuat *scatter plot* antara $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ dan $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ seperti ditampilkan pada Gambar 4. Pola hubungan yang berbeda terlihat pada gambar untuk $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ terdapat hubungan yang sejalan yang dipengaruhi oleh ketinggian. Di stratosfer bawah, pada ketinggian 16 km hingga 29 km terlihat peningkatan HNO_3 sejalan dengan peningkatan konsentrasi ozon tetapi di stratosfer tengah hingga atas pada ketinggian 32 km hingga 43 km terlihat bahwa penurunan konsentrasi HNO_3 sejalan

dengan penurunan konsentrasi ozon. Hal ini kemungkinan disebabkan kedua senyawa tersebut memiliki karakteristik yang hampir sama yang diproduksi dan terurai lebih banyak di wilayah ketinggian tersebut. Hal yang berbeda ditemui pada *scatter plot* $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ yang justru menunjukkan pola yang berkebalikan dengan *scatter plot* $\text{HNO}_3:\text{O}_3$. Pada *scatter plot* $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ pada ketinggian 16 km hingga 26 km konsentrasi HNO_3 meningkat yang seiring dengan menurunnya konsentrasi N_2O . Kemudian pada ketinggian 26 km hingga 43 km konsentrasi HNO_3 menurun seiring dengan menurunnya konsentrasi N_2O . Kemungkinan ada kaitan antara penurunan konsentrasi N_2O yang berperan sebagai sumber meningkatnya konsentrasi HNO_3 pada ketinggian 16 hingga 26 km dengan konsentrasi maksimum HNO_3 terjadi pada ketinggian antara 25 hingga 30 km. Akan tetapi, hal ini masih memerlukan penelitian lanjutan yang lebih mendalam.



Gambar 4. *Scatter plot* pada setiap ketinggian dari 16 km hingga 43 km di stratosfer (a) $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ dan (b) $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$. Angka pada gambar menunjukkan ketinggian.

Korelasi $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ dan $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ pada beberapa ketinggian ditampilkan pada Gambar 5. Korelasi tersebut dibuat dari konsentrasi rata-rata bulanan dari Januari hingga Desember pada tiga ketinggian yang berbeda yang dipilih karena memiliki nilai koefisien korelasi yang paling baik di antara ketinggian-ketinggian lainnya dengan nilai $> 0,5$. Berdasarkan Gambar 5 terlihat adanya korelasi yang berbeda yang dipengaruhi oleh ketinggian. Pada lapisan stratosfer bawah, ketinggian 21 km, $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ berkorelasi positif dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,84 sedangkan $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ berkorelasi negatif dengan nilai koefisien korelasi sebesar 0,9. Hal yang sama terjadi pada ketinggian 26 km dengan koefisien korelasi masing-masing sebesar 0,54 dan 0,94. Hal yang berbeda ditunjukkan pada ketinggian 32 km, korelasi $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ dan $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ sama-sama berkorelasi negatif dengan nilai koefisien korelasi masing-masing 0,87 dan 0,82.



Gambar 5. Korelasi $\text{HNO}_3:\text{O}_3$ dan $\text{HNO}_3:\text{N}_2\text{O}$ pada beberapa ketinggian di stratosfer

4. KESIMPULAN

Profil vertikal HNO_3 di stratosfer Indonesia dari tahun 2005-2014 memiliki rentang konsentrasi dari 0,1 ppbv hingga 4,5 ppbv dan mencapai maksimum pada ketinggian antara 25-30 km pada bulan Juni-Juli-Agustus. Pola hubungan dan korelasi HNO_3 terhadap O_3 dan HNO_3 terhadap N_2O menunjukkan adanya keterkaitan dengan proses produksi maupun proses penguraian masing-masing senyawa tersebut yang dipengaruhi oleh ketinggian dengan nilai koefisien korelasi

cukup baik yaitu lebih besar dari 0,5. Perlu penelitian lanjutan mengenai interaksi HNO_3 dengan N_2O di stratosfer.

UCAPAN TERIMA KASIH.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penyedia data komposisi kimia atmosfer hasil pengukuran sensor MLS satelit Aura milik NASA yang dapat diakses dengan mudah melalui fasilitas website MIRADOR NASA, serta kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA) LAPAN yang telah memberikan fasilitas dan dukungan untuk penulis sehingga dapat mengikuti SNSA 2016 dan dapat menyelesaikan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Kinnison, D. E., J. E. Gille., J. Barnett ., C. Randall, 2008. Global Observation of HNO_3 from the High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLS): First Result. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-21.
- ²Popp, P. J., T. P. Marcy., R. S. Gao., L. A. Watts., D. W. Fahey, 2009. Stratospheric Correlation Between Nitric Acid and Ozone. *Journal of Geophysical Research*. 114. 1-10.
- ³Urban, J., M. Pommier., D. Murtagh., P. Eriksson., and P. Ricaud, 2009. Nitric Acid in the Stratosphere Based on Odin Observation from 2001 to 2009 – Part 1: A Global Climatology. *Atmos. Chem. Phys.* 9. 7031-7044.
- ⁴Santee, M. L., A. Lambert., W. G. Read., N. J. Livesey., R. E. Cofield, 2007. Validation of AURA Microwave Limb Sounder HNO_3 Measurement. *Journal of Geophysical Research*. 1-26, 2007.
- ⁵Fiorucci, I., G. Muscari., L. Froidevaux., M. L. Santee, 2013. Ground Based Stratospheric O_3 and HNO_3 Measurement at Thule, Greenland: an Intercomparison with AURA MLS Observations. *Atmos. Meas. Tech.* 6. 2441-2453.
- ⁶Wespes, C., D. Hurtmans., C. Clerbaux., M. L. Santee., R. V. Martin., P. F. Coheur, 2009. Global Distributions of Nitric Acid from IASI/MetOp Measurements. *Chem. Phys.* 9. 7949-7962.
- ⁷Orsolini, Y. J., 2005. An Upper Stratospheric Layer of Enhanced HNO_3 Following Exceptional Solar Storms. *Geophys. Res. Letters*. 32. 1-4.
- ⁸Ahmad, S. P., J. W. Waters., J. E. Johnson., I. V. Gerasimov., G. G. Leptoukh., & S. J. Kempler, 2006. *Atmospheric composition data products from the EOS Aura MLS*. Proc. Amer. Meteorological Soc. Eighth Conf. on Atmospheric Chemistry, Atlanta, Georgia.
- ⁹Jet Propulsion Laboratory., Microwave Limb Sounder (<http://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>, tanggal akses 1 April 2016).
- ¹⁰Urban, J., M. Pommier., D. Murtagh., P. Eriksson., P. Ricaud, 2007. *ODIN/SMR Limb Observations of Nitric Acid in the Stratosphere*. Proc. Envisat Symposium 2007.
- ¹¹Ambarsari, N., 2011. *Profil Vertikal Ozon, Dinitrogen Monoksida, dan Korelasinya dengan Temperatur di Bandung Berbasis Observasi Sensor MLS Satelit AURA*. Prosiding Seminar Nasional Fisika, LIPI. 553-560.
- ¹²Santee, M. L., 2004. Three Dimensional Structure and Evolution of Stratospheric HNO_3 based on UARS Microwave Limb Sounder Measurements. *Journal of Geophysical Research*. 109, 1-19.
- ¹³National Weather Services NOAA, 2016. *The Seasons, the Equinox, and the Solistices*. (<http://www.weather.gov/cle/Seasons>. Tanggal akses 3 Juni 2016).