

# **VARIASI TRACE GASES SELAMA 10 TAHUN DAN PENCAMPURAN DI SEKITAR LAPISAN TROPOPAUSE DI INDONESIA BERBASIS SATELIT (TRACE GASES VARIATION FOR 10 YEARS AND MIXING AROUND THE TROPOPAUSE LAYERS IN INDONESIA BASED ON SATELLITE)**

**Novita Ambarsari<sup>1</sup>, Ninong Komala, Fanny Aditya Putri**  
Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer  
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Dr. Djunjunan 133 Bandung 40173 Indonesia  
<sup>1</sup>e-mail: novitaambar@yahoo.com, novita.ambarsari@lapan.go.id

## **ABSTRACT**

Measurement of trace gases (CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, H<sub>2</sub>O, and HNO<sub>3</sub>) and temperatures around upper troposphere/lower stratosphere (UT/LS) or rather around Tropical Tropopause Layer (TTL) in Indonesia by using Microwave Limb Sounder (MLS) instrument board on Satellite AURA for 2005-2014 period to make variations of these gases over the 10 years around TTL allows to be studied more deeply. TTL becomes the main route entry of chemical compounds and aerosols originating in the troposphere into the stratosphere. The composition of minor gases in the TTL is very important because it affects the global radiation budget. Analysis of vertical profiles of these gases in the TTL was done to determine the suitability of the concept of TTL which starts from the upper troposphere to the lower stratosphere. Other method are the time series diagram of the altitude (height versus time series cross section) which shows the annual and interannual variations in vertical profiles of these gases in the TTL and the possible influence of the dynamics of the atmosphere. The results showed correlation of these gases with ozone showed most of the air in the stratosphere is experiencing mixing in the TTL. In addition, changes in concentration and temperature values in the TTL have been calculated using the trends of each parameter and it is known that the parameters of HCl, CH<sub>3</sub>Cl, and temperature show respective decreases of -0.036 ppmv, -0.024 ppmv, and -0.456 K. As for other parameters such as ozone, CO, H<sub>2</sub>O, and HNO<sub>3</sub> showed an increase of respectively 0.0036 ppmv, 0.0096 ppmv, 0.108 ppmv, and 0.06 ppmv.

Keywords: *trace gases, tropopause, TTL, MLS, AURA*

## ABSTRAK

Pengukuran *trace gases* (CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>) dan temperatur di sekitar lapisan troposfer atas/stratosfer bawah (UT/LS) atau tepatnya di sekitar *Tropical Tropopause Layer* (TTL) di Indonesia menggunakan instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) pada Satelit AURA periode 2005-2014 menjadikan variasi gas-gas tersebut selama 10 tahun di sekitar TTL memungkinkan untuk dikaji lebih dalam. TTL menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber di troposfer ke stratosfer. Komposisi gas-gas minor di TTL sangat penting karena mempengaruhi *budget* radiasi global. Analisis profil vertikal gas-gas tersebut di TTL dilakukan untuk mengetahui kesesuaian konsep TTL yang dimulai dari lapisan troposfer atas hingga ke stratosfer bawah. Metode lainnya adalah dengan diagram *time series* terhadap ketinggian (*time series versus height cross section*) yang menunjukkan variasi tahunan maupun antar tahunan profil vertikal gas-gas tersebut di TTL serta kemungkinan adanya pengaruh dari proses dinamika atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan korelasi gas-gas tersebut dengan ozon menunjukkan adanya sebagian udara di stratosfer yang mengalami pencampuran di wilayah TTL. Selain itu, perubahan nilai konsentrasi dan temperatur di TTL telah dihitung menggunakan *trend* masing-masing parameter dan diketahui bahwa parameter HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan temperatur menunjukkan penurunan masing-masing sebesar -0,036 ppmv, -0,024 ppmv, dan -0,456 K. Adapun parameter lain seperti ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan adanya peningkatan masing-masing sebesar 0,0036 ppmv, 0,0096 ppmv, 0,108 ppmv, dan 0,06 ppmv.

Kata kunci: *gas minor, tropopause, TTL, MLS, AURA*

### 1 PENDAHULUAN

Lapisan tropopause di wilayah tropis telah digambarkan sebagai lapisan transisi antara troposfer dan stratosfer di daerah tropis. Lapisan ini lebih sedikit terhubung ke *Planetary Boundary Layer* (PBL) dibandingkan dengan daerah troposfer bawah tetapi tidak dominan dipengaruhi oleh radiasi matahari seperti halnya di stratosfer. Batas wilayah *Tropical Tropopause Layer* (TTL) telah ditentukan dari beberapa aspek diantaranya proses konveksi dan struktur termal atmosfer. Daerah dengan fenomena konveksi *overshoot* pada ketinggian 17-19 km menjadi nilai batas atas lapisan TTL dan wilayah dengan *buoyancy* netral (14 km) menjadi batas bawahnya (Marcy et al., 2007). Kriteria lainnya adalah batas atas TTL berada pada ketinggian 17-19 km saat terjadi *Cold Point Temperature* (CPT) atau saat temperatur mencapai titik terendah dan batas bawahnya adalah level dimana terjadinya *lapse rate minimum* (10-12 km) (Marcy et al., 2007).

TTL sebagai lapisan batas antara troposfer dan stratosfer diketahui memiliki karakteristik kedua lapisan yaitu troposfer atas dan stratosfer bawah (*Upper Troposphere/Lower Stratosphere*). TTL juga diketahui dikontrol oleh berbagai proses diantaranya interaksi transpor konveksi, gelombang konvektif, radiasi, mikrofisika awan, dan sirkulasi stratosfer skala luas (*large scale*) (Henz, 2010). TTL juga menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber di troposfer ke stratosfer. Konveksi tinggi menjadi kunci utama proses yang mempengaruhi komposisi kimia di troposfer dan stratosfer di wilayah tropis karena dapat membawa emisi dari troposfer di PBL. Karakteristik TTL juga sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis dan musim. Variabilitas ini mungkin berhubungan dengan sampel massa udara (bersih atau terpolusi), proses yang terjadi hingga massa udara tersebut mencapai TTL, konveksi tinggi, transpor radiatif, dan proses kimia yang

melibatkan massa udara tersebut (Marecal et al., 2011).

Rasio campuran (*mixing ratio*) beberapa gas minor (*trace gases*) di TTL menunjukkan variasi yang unik (Konopka et al., 2010; Fueglistaler et al., 2009; Ploeger et al., 2012). Komposisi gas-gas minor di TTL sangat penting karena mempengaruhi *budget* radiasi global. Pengaruh gas-gas minor terhadap temperatur menjadikan rasio campuran gas-gas minor di TTL juga berpengaruh terhadap uap air di stratosfer serta proses kimia yang menyertainya dengan implikasinya terhadap radiasi global. Oleh karena itu, untuk memahami perubahan sistem iklim, penting untuk mempelajari proses yang mengontrol komposisi gas-gas minor di TTL (Ploeger et al., 2012).

Pemahaman mengenai proses yang mempengaruhi komposisi kimia, mikrofisika, dan transpor di troposfer atas-stratosfer bawah di wilayah tropis (TTL) penting untuk menentukan proses transpor dan pencampuran gas-gas minor masuk ke stratosfer yang akan mempengaruhi ozon dan uap air di stratosfer. Oleh karena itu, penelitian mengenai komposisi gas minor di TTL penting dilakukan karena masuknya gas minor ke stratosfer ditentukan oleh jumlah gas minor yang mampu melewati TTL, waktu hidup gas-gas minor di TTL sebelum mengalami transpor *upward* serta proses lainnya yang berpotensi mengubah konsentrasi gas-gas tersebut (proses kimia, mikrofisika, dan pencampuran dari lokasi lain). Selain itu, penelitian mengenai komposisi kimia di TTL juga penting karena beberapa gas minor seperti H<sub>2</sub>O, ozon, dan CO<sub>2</sub> berkontribusi terhadap perubahan radiasi dan iklim, juga komposisi kimia di TTL berperan sebagai sumber pembentukan partikel yang berpengaruh terhadap aerosol di stratosfer (Abalos et al., 2013).

Penelitian mengenai komposisi gas minor di TTL telah banyak dilakukan peneliti-peneliti internasional selama lebih dari satu dekade terakhir diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Marcy et al. (2007) dan Marecal et al. (2011). Kedua penelitian tersebut membuktikan bahwa profil vertikal gas minor sesuai dengan konsep TTL yang menunjukkan perbedaan di troposfer atas hingga stratosfer bawah serta kombinasi dari profil vertikal dan korelasi dengan ozon (kurva "L") menunjukkan adanya sejumlah gas dari stratosfer dan troposfer yang mengalami pencampuran di TTL. Penelitian mengenai gas-gas minor di TTL Indonesia khususnya ozon dan karbon monoksida (CO) sebelumnya juga telah dilakukan oleh Ambarsari dan Komala (2014) yang menganalisis profil vertikal ozon dan CO di sekitar TTL di Indonesia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya lapisan transisi yang ditunjukkan dengan menurunnya konsentrasi ozon dan CO pada ketinggian sekitar TTL serta adanya pencampuran udara stratosfer dan troposfer di TTL yang tampak pada hasil *scatter plot* CO dan ozon di troposfer atas, TTL, dan stratosfer bawah.

Penelitian ini bertujuan untuk melengkapi penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dengan mengkaji variasi gas-gas minor lainnya di TTL yaitu asam klorida (HCl), ozon (O<sub>3</sub>), asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), metil klorida (CH<sub>3</sub>Cl), karbon monoksida (CO), uap air (H<sub>2</sub>O) serta parameter fisik yaitu temperatur. Data komposisi gas-gas minor dan temperatur tersebut diperoleh dari hasil observasi sensor *Microwave Limb Sounders* (MLS) pada satelit AURA. Periode penelitian ini adalah selama 10 tahun yaitu tahun 2005 hingga 2014 dengan wilayah kajian meliputi Indonesia (94° – 146° BT, 12° LS – 12° LU).

## 2 DATA DAN METODE

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data harian profil vertikal dalam *Volume Mixing Ratio* (VMR) gas-gas minor meliputi CO, O<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, HCl dan temperatur hasil pengukuran sensor MLS satelit AURA tahun 2005-2014 untuk wilayah Indonesia ([www.mirador.gsfc.nasa.gov](http://www.mirador.gsfc.nasa.gov)). MLS mengamati radiasi termal pada gelombang mikro yang dipancarkan Bumi dan merekam data dari permukaan hingga ketinggian 90 km. MLS mengukur emisi termal dari pita spektrum yang luas pada frekuensi 118, 190, 240, 640, dan 2250 GHz yang diukur secara kontinyu menggunakan 7 penerima gelombang mikro. Resolusi data MLS adalah sebesar 3 km untuk resolusi vertikal dan 200 km untuk resolusi horizontal (<http://mls.jpl.nasa.gov/eos/instrument.php>). Resolusi horisontal ini menghasilkan cakupan wilayah observasi MLS meliputi 82 °LS hingga 82 °LU. MLS mengukur profil vertikal pada 3500 lokasi di dunia setiap 24 jam (Ahmad et al., 2006).

Instrumen MLS dilengkapi dengan empat jenis radiometer yang dioperasikan pada temperatur ambien pada lima daerah spektrum yang mampu mendeteksi spektrum O<sub>2</sub> termasuk mengukur temperatur dan tekanan, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub> di troposfer atas, CO, HCl, ClO, BrO, HO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, dan OH (Waters et al., 2006). Validasi data hasil pengukuran MLS AURA telah banyak dilakukan di antaranya penelitian yang dilakukan oleh Yan et al. (2016) yang melakukan validasi data ozon, uap air, dan temperatur dari MLS AURA dengan data *ozonesonde* di wilayah Tibet. Hasil analisis statistik menunjukkan korelasi yang cukup baik antara MLS dengan *ozonesonde* untuk data ozon, uap air, dan temperatur di sekitar lapisan tropopause dengan koefisien korelasi >0.5 (Yan et al., 2016). Selain itu Komala et al. (2013) juga telah melakukan

validasi data profil vertikal ozon dan temperatur dari MLS dengan data dari instrumen *ozonesonde* di Kototabang tahun 2007 dan 2008 yang memberikan nilai korelasi yang sangat baik dengan  $r=0,9999$  (Komala et al., 2013). Validasi konsentrasi uap air dari MLS AURA dengan data hasil pengukuran *Cryogenic Frost point Hygrometer* (CFH) di Biak Indonesia juga telah dilakukan oleh Vomel et al. (2007), yang menunjukkan perbedaan nilai sebesar 5-25 % dengan koefisien korelasi bervariasi antara 0,7 hingga 0,85 tergantung level tekanan atau ketinggian. Validasi untuk *trace gases* lainnya hasil pengukuran MLS AURA dan pengukuran insitu di Indonesia belum pernah dilakukan karena keterbatasan instrumen pengukuran insitu yang mengukur senyawa CO, HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan HNO<sub>3</sub>.

Adapun tahapan pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini diawali dengan ekstraksi data profil vertikal komposisi kimia dari MLS AURA dalam format *Hierarchical Data Format-5* (HDF-5) untuk memperoleh nilai VMR masing-masing komponen kimia, lintang, bujur, dan tekanan (hPa) yang kemudian dikonversi menjadi ketinggian (km). Proses konversi tekanan (hPa) menjadi ketinggian (km) dilakukan dengan menggunakan nilai *Geopotential Height* (GPH) dari data MLS AURA yang memuat data tekanan atmosfer (hPa) untuk setiap level ketinggian. Lapisan tropopause pada tekanan 100 hPa menunjukkan nilai rata-rata GPH diantara 16-17 km untuk wilayah Indonesia.

Tahapan berikutnya adalah melakukan perata-rataan data untuk wilayah Indonesia (*area average*) untuk memperoleh satu nilai profil vertikal rata-rata Indonesia untuk masing-masing gas setiap harinya. Perata-rataan ini merupakan metode yang banyak dilakukan untuk menganalisis profil vertikal atmosfer di suatu wilayah yang luas, seperti pada penelitian Ploeger et

al. (2011) yang menganalisis profil vertikal ozon dan uap air di TTL khususnya profil vertikal rata-rata di wilayah tropis pada lintang  $20^{\circ}$  LU –  $20^{\circ}$  LS. Selain itu, penelitian oleh Fujiwara et al. (2010) juga mengenai profil vertikal uap air rata-rata di wilayah tropis di sekitar stratosfer bawah dengan area penelitian mencakup  $15^{\circ}$  LS –  $30^{\circ}$  LU dan  $90^{\circ}$  BT –  $90^{\circ}$  BB. Penelitian mengenai profil vertikal komposisi kimia dengan meratakan untuk wilayah tertentu juga dilakukan diantaranya oleh (Qian et al., 2014), (Liu et al., 2010), dan (Abalos et al., 2013).

Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, profil vertikal ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan temperatur di beberapa wilayah di Indonesia ternyata tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan hanya sekitar 1 % hingga 10 % untuk masing-masing senyawa tergantung level tekanan atau ketinggian, dan perbedaan yang jauh lebih kecil terjadi di lapisan tropopause hingga troposfer (Ambarsari dan Komala, 2010). Penelitian untuk variasi *trace gases* lainnya di Indonesia belum dilakukan secara menyeluruh sehingga metode perataan area (*area average*) ini dipilih untuk dapat memberikan gambaran secara umum profil vertikal *trace gases* di tropopause Indonesia.

Selanjutnya adalah pemilihan data pada ketinggian sekitar TTL. Pada penelitian ini analisis difokuskan pada ketinggian 13 - 22 km yaitu dari lapisan troposfer atas hingga stratosfer bawah yang dapat mencakup kondisi di lapisan tropopause serta profil vertikal yang menggambarkan adanya transpor senyawa kimia melewati TTL. Kemudian dilakukan perataan bulanan, musiman, analisis diagram *time series-ketinggian*, analisis variasi *trace gases* pada level ketinggian TTL dan *scatter plot* antara gas-gas tersebut dengan ozon sebagai senyawa penanda stratosfer (*stratospheric tracer*). Data yang digunakan

untuk membuat *scatter plot* ini adalah data profil vertikal *trace gases* dan ozon pada ketinggian 10-20 km yang mewakili lapisan troposfer atas, tropopause, dan stratosfer bawah yang dapat menunjukkan profil pencampuran udara secara vertikal senyawa *trace gases* di troposfer atas dengan senyawa di stratosfer bawah di sekitar lapisan TTL (Marcy et al., 2007; Marecal et al., 2011). Untuk mengetahui perubahan konsentrasi *trace gases* dan temperatur di TTL Indonesia dibuat *trend* selama 10 tahun pengukuran kemudian dihitung berdasarkan persamaan garis (*trend line*) nilai perubahan konsentrasi yang terjadi.

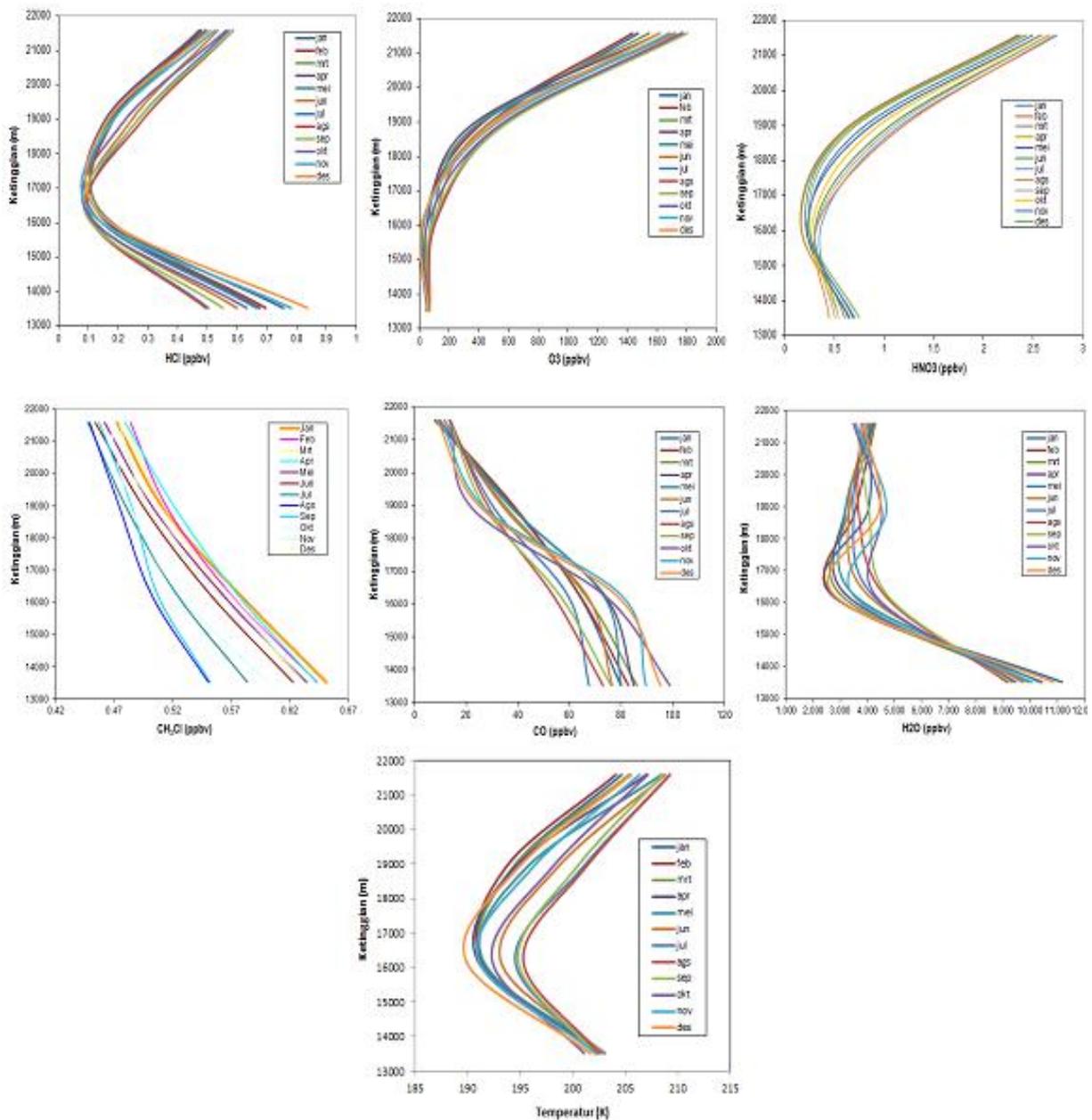
### 3 HASIL DAN ANALISIS

Profil vertikal HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan dengan jelas adanya lapisan transisi pada ketinggian sekitar 16-17 km atau tekanan 100 hPa yang diperkirakan sebagai lapisan TTL di Indonesia seperti diperlihatkan pada Gambar 3-1. Hal ini ditunjukkan dengan konsentrasi ketiga senyawa tersebut mencapai nilai terendah (minimum) pada ketinggian 16-17 km. Penentuan ketinggian pada 16-17 km untuk lapisan tropopause telah dijelaskan pada bagian metodologi.

HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> merupakan *stratospheric tracer* atau senyawa yang dominan ada di stratosfer ditunjukkan dengan profil vertikal ketiga senyawa tersebut yang mengalami peningkatan konsentrasi di atas TTL (Gambar 3-1). Sumber antropogenik HCl di permukaan yang dapat terbawa hingga ke TTL sangat sedikit hampir dapat diabaikan karena sebagian besar HCl di troposfer mengalami pembersihan melalui proses deposisi basah. Keberadaan HCl di TTL berasal dari stratosfer (Marcy et al., 2007; Kim et al., 2008). Hal ini berbeda dengan profil vertikal HCl di sekitar TTL di Indonesia seperti pada Gambar 3-1. Konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia pada ketinggian 13 km cukup

tinggi sekitar 0,5 hingga 0,9 ppbv, kemudian menurun hingga di lapisan TTL pada ketinggian sekitar 16,5 km dengan konsentrasi HCl hanya sekitar 0,1 ppbv. Di atas TTL hingga stratosfer bawah pada ketinggian 22 km, konsentrasi HCl meningkat kembali mencapai 0,5 hingga 0,6 ppbv. Konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia cukup tinggi diperkirakan karena sumber HCl di troposfer terutama dari proses deklorinasi aerosol garam laut dengan

senyawa asam seperti  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Kim et al., 2008). Wilayah Indonesia yang dikelilingi lautan diperkirakan menjadi alasan konsentrasi HCl di troposfer atas di Indonesia cukup tinggi. Peningkatan konsentrasi HCl di atas TTL hingga ke stratosfer bawah diperkirakan karena adanya pencampuran udara stratosfer di TTL (Konopka et al., 2010; Marcy et al., 2007) yang ditunjukkan juga oleh peningkatan konsentrasi ozon mencapai 1800 ppbv di stratosfer



Gambar 3-1: Profil vertikal rata-rata bulan *trace gases* di sekitar lapisan tropopause tropis atau TTL di Indonesia Tahun 2005-2014

bawah (Mebarki et al., 2010). Konsentrasi ozon di troposfer atas hingga sekitar TTL (ketinggian 13-17 km) sangat kecil sekitar 40-70 ppbv. Konsentrasi ozon meningkat setelah lapisan TTL pada 16-17 km hingga stratosfer bawah pada ketinggian 22 km konsentrasi ozon mencapai maksimum yaitu antara 1400-1800 ppbv. Hal ini menunjukkan terjadinya pencampuran udara stratosfer dimana konsentrasi ozon sangat tinggi dengan udara troposfer di lapisan TTL (Konopka et al., 2010; Tuck et al., 2008). Sumber ozon di troposfer yang berasal dari aktivitas antropogenik lebih kecil dibandingkan dengan produksi ozon di stratosfer yang berasal dari reaksi fotokimia. Sumber  $O_3$  di TTL sebagian berasal dari sumber di troposfer, dari proses produksi ozon, maupun dari transport udara stratosfer (Marcy et al., 2007).

Profil vertikal  $HNO_3$  menunjukkan pola yang hampir sama dengan profil vertikal ozon, yaitu pada ketinggian lebih rendah di daerah troposfer atas, konsentrasi  $HNO_3$  lebih kecil sekitar 0,5 ppbv kemudian menurun hingga di lapisan TTL. Di atas TTL konsentrasi  $HNO_3$  meningkat hingga ke stratosfer bawah atau ketinggian 22 km, yang konsisten dengan peningkatan konsentrasi  $O_3$  dan  $HCl$ . Konsentrasi  $HNO_3$  di stratosfer bawah mencapai 2,5 ppbv. Sumber  $HNO_3$  di troposfer berasal dari sumber lokal maupun regional seperti dari pembentukan petir.  $HNO_3$  yang dihasilkan di troposfer yang salah satu sumbernya adalah dari peristiwa kilat lebih kecil dibandingkan proses fotokimia di stratosfer yang menghasilkan  $HNO_3$ .  $HNO_3$  di TTL dipengaruhi dari sumber yang berasal dari atas TTL maupun dari bawah TTL (Marcy et al., 2007).

Berbeda dengan  $HCl$ ,  $O_3$ , dan  $HNO_3$  yang bersifat sebagai *stratospheric tracer*,  $CH_3Cl$ ,  $CO$ , dan  $H_2O$  bersifat sebagai *tropospheric tracer* yaitu senyawa yang dominan berasal dari sumber di

troposfer. Hal ini terlihat dari profil vertikal senyawa-senyawa tersebut pada Gambar 3-1 yang mengalami penurunan konsentrasi dari troposfer atas hingga ke stratosfer bawah (Marcy et al., 2007). Ketiga senyawa tersebut menunjukkan pola yang mengalami penurunan konsentrasi dari troposfer hingga ke stratosfer bawah dengan perubahan pola yang sangat kecil terjadi pada ketinggian 16-17 km. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan semakin berkurangnya pengaruh dari sumber di troposfer dengan semakin meningkatnya ketinggian.

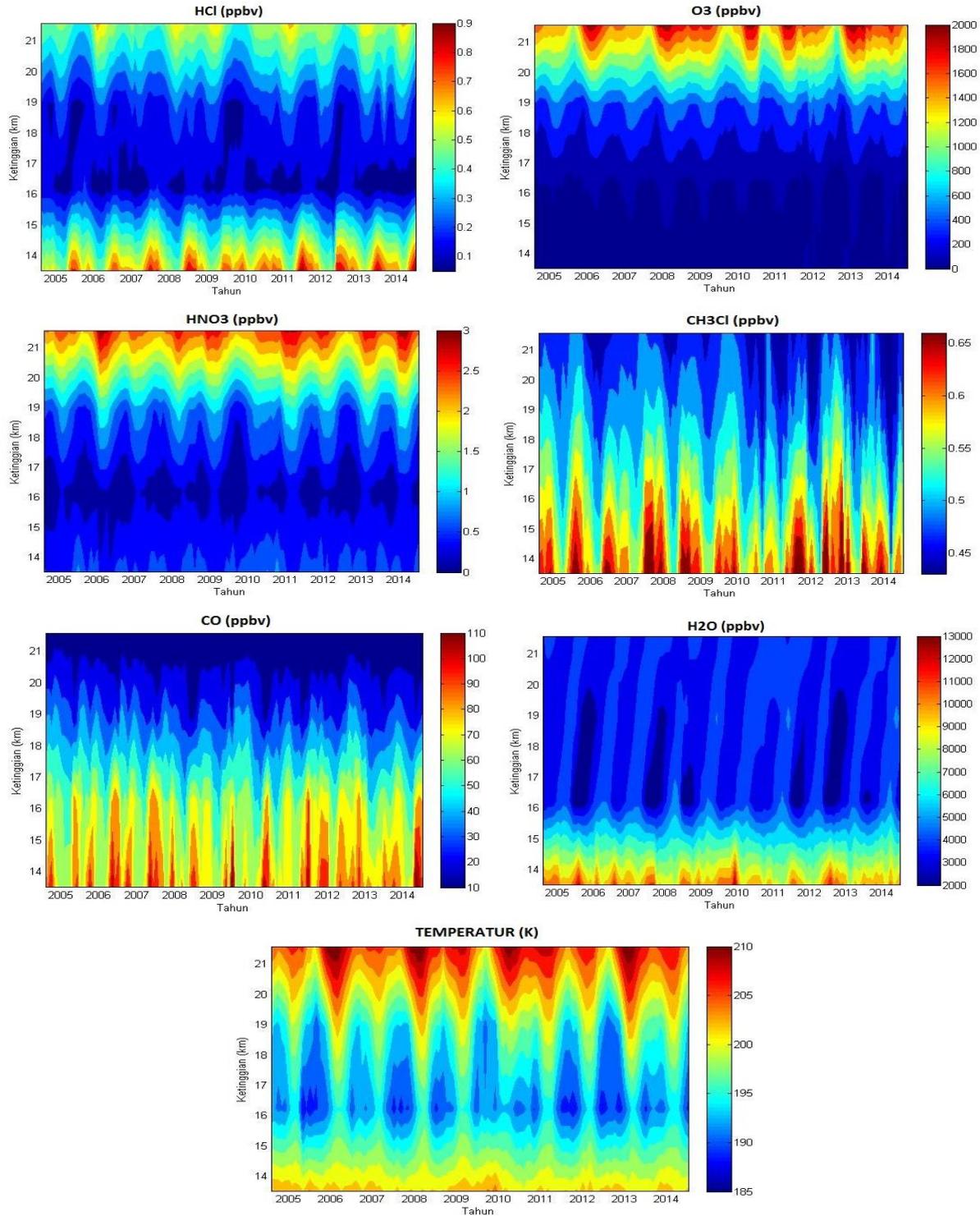
$CH_3Cl$ ,  $CO$ , dan  $H_2O$  sebagai *tropospheric tracer* dimana sumber di troposfer yang menghasilkan senyawa tersebut lebih dominan dibandingkan reaksi fotokimia yang terjadi di stratosfer bawah, sedangkan di TTL sebagai lapisan transisi sehingga variasi senyawa-senyawa tersebut dipengaruhi oleh konsentrasi di troposfer dan stratosfer.  $CO$  dan  $CH_3Cl$  di sekitar tropopause dikendalikan oleh beberapa proses di antaranya interaksi yang kompleks antara emisi di permukaan, konveksi, serta transport horizontal jarak jauh. Kedua senyawa ini merupakan penanda (*marker*) untuk kejadian polusi udara dari pembakaran biomassa yang dapat terangkat hingga ke lapisan troposfer atas-stratosfer bawah dengan cepat melalui proses konveksi atau proses lainnya (Santee et al., 2013).

Profil vertikal  $H_2O$  menunjukkan penurunan konsentrasi dari troposfer atas dan terlihat juga penurunan konsentrasi yang lebih besar terjadi di lapisan TTL pada ketinggian 16 km (Gambar 3-1). Penurunan jumlah  $H_2O$  di TTL disebabkan oleh mekanisme dehidrasi fisik. Saat udara troposfer yang membawa uap air mencapai TTL, terjadi proses dehidrasi akibat penurunan temperatur yang ekstrim di TTL (CPT) (Marcy et al., 2007; Koishi and Shiotani, 2012).

Plot *time series* terhadap ketinggian untuk *trace gases* di Indonesia di sekitar lapisan tropopause selama 10 tahun

pengamatan ditunjukkan pada Gambar 3-2. Seperti pola yang ditunjukkan pada Gambar 3-1 yaitu adanya lapisan transisi yang terlihat jelas pada ketinggian 16-17 km untuk senyawa HCl, O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O,

dan temperatur sedangkan untuk senyawa CH<sub>3</sub>Cl dan CO adanya penurunan konsentrasi yang sangat kecil yaitu sekitar 0,1 ppbv untuk CH<sub>3</sub>Cl dan 20 ppbv untuk CO terjadi pada ketinggian 16 km.

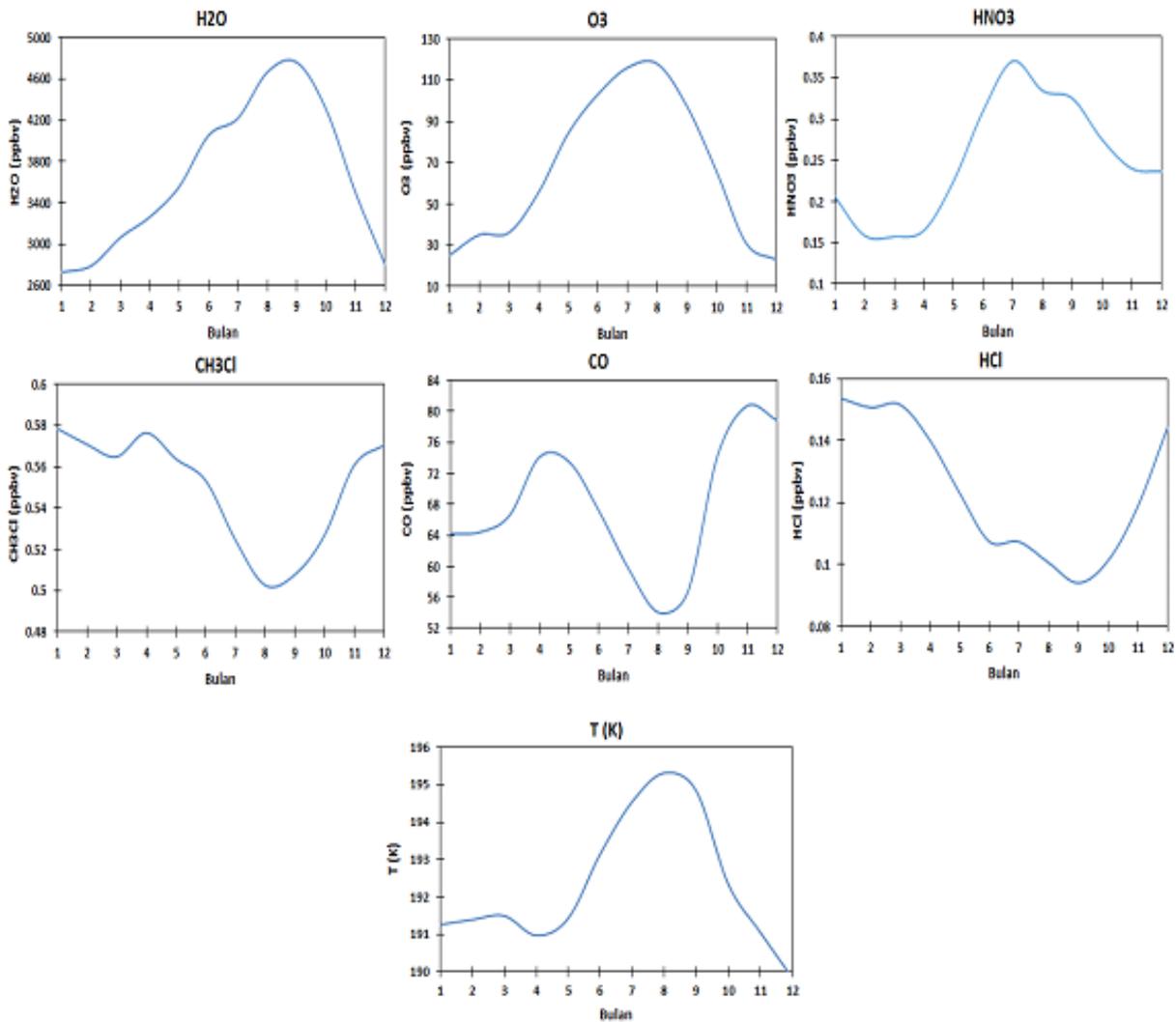


Gambar 3-2: Plot time series-ketinggian trace gases di lapisan Upper Toposphere Lower Stratosphere (UTLS) atau sekitar TTL di Indonesia tahun 2005-2014

Dari Gambar 3-2 juga dapat terlihat adanya variasi antar tahunan untuk senyawa-senyawa tersebut. Kehadiran senyawa-senyawa ini di TTL sangat dipengaruhi oleh transport dari sumber antropogenik di troposfer melalui proses konveksi serta adanya pencampuran dengan udara dari stratosfer (Livesey et al., 2008). *Time series* H<sub>2</sub>O menunjukkan adanya anomali penurunan konsentrasi H<sub>2</sub>O pada ketinggian sekitar 16 km atau pada lapisan TTL pada akhir tahun 2005, 2007, 2008, 2011, dan 2012 yang sejalan dengan pola penurunan temperatur pada ketinggian dan waktu yang sama.

Hal ini diperkirakan karena temperatur yang dingin pada lapisan TTL sehingga jumlah uap air yang dapat mencapai TTL menurun atau disebut juga dengan istilah dehidrasi di TTL seperti yang telah dijelaskan sebelumnya (Koishi and Shiotani, 2012).

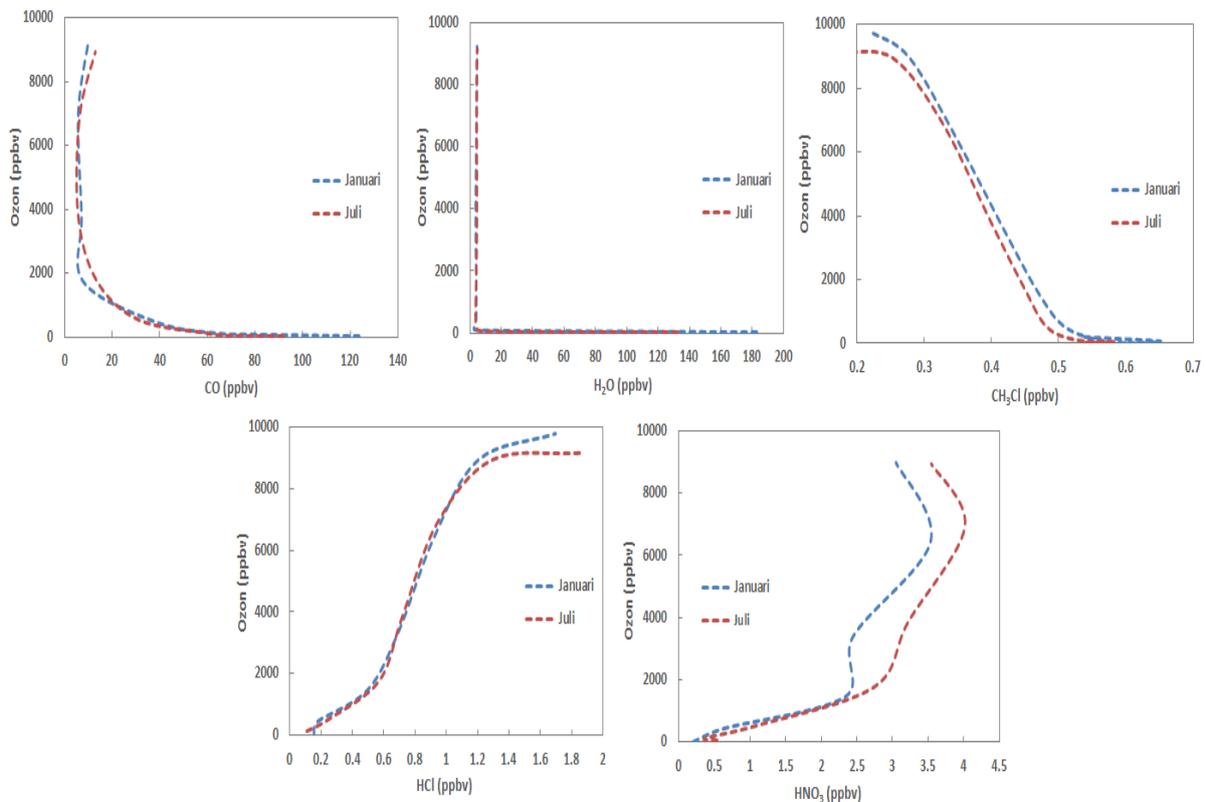
Variasi rata-rata bulanan *trace gases* di lapisan tropopause Indonesia (ketinggian 17 km atau pada tekanan 100 hPa) di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 3-3. Variasi bulanan masing-masing senyawa di lapisan TTL menunjukkan karakter yang berbeda.



Gambar 3-3: Variasi bulanan rata-rata *trace gases* dan temperatur di lapisan TTL pada tekanan 100 hPa di Indonesia tahun 2005-2014

Tampak pada Gambar 3-3 untuk ozon, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> di lapisan TTL menunjukkan pola tahunan yang sama yaitu mencapai maksimum pada sekitar bulan Juli-Agustus. Begitu juga dengan temperatur. Hal yang berlawanan terjadi pada senyawa CH<sub>3</sub>Cl, CO, dan HCl. Ketiga senyawa tersebut justru mencapai minimum pada sekitar bulan Agustus-September dan mengalami dua nilai maksimum yaitu pada sekitar bulan Maret-April dan Oktober-November-Desember. Perbedaan pola ini diperkirakan dipengaruhi oleh banyak faktor di antaranya adalah variasi temperatur di tropopause, sumber senyawa-senyawa tersebut di troposfer, proses *upwelling* dan sirkulasi Brewer-Dobson, kopling antara sirkulasi vertikal dan aliran konvektif, dan pencampuran udara antara stratosfer-troposfer (Ploeger et al., 2012; Stolarski et al., 2014).

*Scatter plot* antara *trace gases* dengan ozon sebagai *stratospheric tracer* karena sifatnya yang dominan berada di lapisan stratosfer, pada ketinggian troposfer atas (UT)-stratosfer bawah (LS) yaitu pada ketinggian sekitar 10 km hingga 20 km ditunjukkan pada Gambar 3-4 untuk Januari dan Juli. *Scatter plot* ini dibuat untuk mengetahui terjadinya pencampuran udara di sekitar UT/LS. *Plot tracer-tracer* umum digunakan untuk mempelajari adanya transisi karakter senyawa kimia dari troposfer ke stratosfer salah satunya dengan plot *tracer-tracer* di stratosfer seperti yang dilakukan Jurkat et al. (2014). Beberapa studi menggunakan CO sebagai penanda (*tracer*) di troposfer dan ozon sebagai penanda di stratosfer (Marcy et al., 2007). Pada penelitian ini dibuat plot *tracer-tracer* di troposfer-stratosfer seperti CO-O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O-O<sub>3</sub>, dan CH<sub>3</sub>Cl-O<sub>3</sub> juga *tracer-tracer* stratosfer seperti HCl-O<sub>3</sub> dan HNO<sub>3</sub>-O<sub>3</sub>.



Gambar 3-4: *Scatter plot trace gases* (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) terhadap ozon pada ketinggian di troposfer atas (10 km) hingga stratosfer bawah (20 km) untuk bulan Januari dan Juli 2005-2014

Pendekatan *plot* korelasi ini menunjukkan adanya pencampuran udara troposfer-stratosfer di TTL, bila *plot* membentuk suatu *smooth line* atau huruf “L” yang tidak tegas dan sebaliknya. *Scatter plot* tersebut dapat juga dilihat sebagai profil vertikal konsentrasi *tracer* troposfer-stratosfer dari ketinggian 10 km hingga 20 km yang mencakup tropopause. *Scatter plot* berbentuk huruf “L” yang tegas menunjukkan perubahan nilai konsentrasi *trace gases* yang signifikan dari troposfer atas ke stratosfer bawah yang juga menunjukkan tidak adanya pencampuran udara dari troposfer-stratosfer. *Tracer* yang ada di troposfer tidak mengalami transport ke stratosfer sehingga huruf “L” yang tegas menggambarkan karakter *tracer* troposfer tetap di troposfer dan karakter *tracer* di stratosfer sebagai *tracer* yang memang dihasilkan di stratosfer. *Scatter plot tropospheric tracer-stratospheric tracer* ini dapat menggambarkan adanya pencampuran udara vertikal dan perubahan karakteristik senyawa kimia di troposfer yang mengalami transport ke stratosfer melalui lapisan TTL sehingga memiliki karakteristik senyawa stratosfer setelah senyawa tersebut berada di stratosfer (Marcy et al., 2007; Marecal et al., 2011). Hal ini tampak jelas pada *plot* CO-O<sub>3</sub> di TTL Indonesia seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Ambarsari dan Komala, 2014). Hal yang

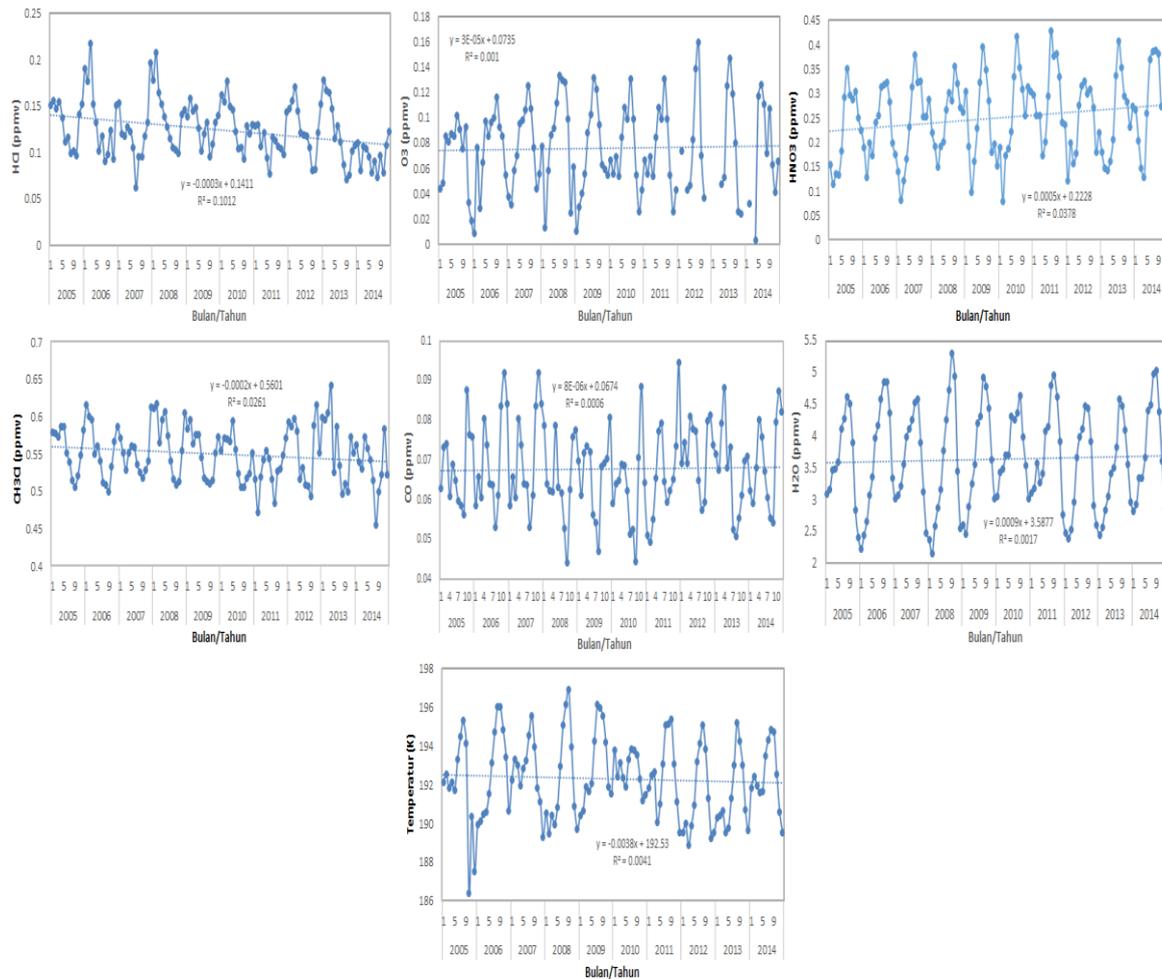
mirip tampak pada *plot* CH<sub>3</sub>Cl-O<sub>3</sub>, HCl-O<sub>3</sub> dan HNO<sub>3</sub>-O<sub>3</sub> (kecuali H<sub>2</sub>O-O<sub>3</sub>, tampak grafik berbentuk huruf “L” tegas) yang menunjukkan adanya pencampuran udara troposfer-stratosfer juga stratosfer-troposfer di lapisan UT/LS di Indonesia.

Walaupun lapisan-lapisan lain di atmosfer memungkinkan untuk terjadi pencampuran senyawa kimia, tetapi karena TTL menjadi jalur utama masuknya senyawa-senyawa kimia dan aerosol yang bersumber sangat besar di troposfer ke stratosfer melalui proses konveksi, maka pencampuran di lapisan TTL menentukan variasi komposisi kimia di lapisan atmosfer lainnya yang lebih tinggi (Marecal et al., 2011).

Perubahan konsentrasi *trace gases* di TTL Indonesia pada tekanan 100 hPa ditunjukkan melalui *trend* masing-masing *trace gases* dan temperatur pada Gambar 3-5. Beberapa parameter menunjukkan penurunan konsentrasi di TTL seperti HCl, CH<sub>3</sub>Cl, dan temperatur. Sedangkan parameter lainnya seperti ozon, CO, H<sub>2</sub>O, dan HNO<sub>3</sub> menunjukkan adanya *trend* peningkatan konsentrasi selama rentang pengukuran. Perubahan konsentrasi *trace gases* dan temperatur di TTL sangat kecil selama 10 tahun pengukuran yang ditampilkan pada Tabel 3-1. H<sub>2</sub>O menunjukkan peningkatan terbesar di TTL yaitu 0,108 ppmv sedangkan temperatur di tropopause mengalami penurunan cukup signifikan yaitu mencapai -0,456 K.

Tabel 3-1: PERUBAHAN KONSENTRASI TRACE GASES (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) DI LAPISAN TTL PADA TEKANAN 100 hPa DI INDONESIA TAHUN 2005-2014

Parameter	Persamaan garis	Perubahan konsentrasi (ppmv)/10 tahun
ozon	$y = 3E-05x + 0.0735$	0.0036
CO	$y = 8E-06x + 0.0674$	0.00096
CH <sub>3</sub> Cl	$y = -0.0002x + 0.5601$	-0.024
HCl	$y = -0.0003x + 0.1411$	-0.036
HNO <sub>3</sub>	$y = 0.0005x + 0.2228$	0.06
H <sub>2</sub> O	$y = 0.0009x + 3.5877$	0.108
T	$y = -0.0038x + 192.53$	-0.456



Gambar 3-5: *Trend trace gases (CO, H<sub>2</sub>O, CH<sub>3</sub>Cl, HCl, dan HNO<sub>3</sub>) di lapisan TTL pada tekanan 100 hPa di Indonesia tahun 2005-2014*

**KESIMPULAN**

Variasi *trace gases* di sekitar *tropopause* tropis di Indonesia menunjukkan dengan jelas adanya lapisan transisi dari pola profil vertikal bulanan rata-rata selama 10 tahun pada ketinggian sekitar 16-17 km yang diidentifikasi sebagai lapisan *tropopause* di Indonesia. HCl, O<sub>3</sub>, dan HNO<sub>3</sub> yang bersifat sebagai *stratospheric tracer* menunjukkan peningkatan konsentrasi di atas TTL, sedangkan CH<sub>3</sub>Cl, CO, dan H<sub>2</sub>O yang bersifat sebagai *tropospheric tracer* menunjukkan penurunan konsentrasi di atas TTL. Profil vertikal-*time series* selama 10 tahun juga menunjukkan adanya pola tahunan dan antar tahunan yang spesifik untuk masing-masing senyawa di lapisan TTL.

Perbedaan pola variasi bulanan di lapisan TTL menunjukkan karakteristik yang berlawanan antara *tropospheric tracer* dan *stratospheric tracer*. *Scatter plot* hubungan gas dengan sifat *tropospheric tracer-stratospheric tracer* di lapisan troposfer, TTL, dan stratosfer menunjukkan adanya pencampuran udara dari stratosfer bawah dan troposfer atas di sekitar lapisan *tropopause* tropis di Indonesia. Perubahan konsentrasi *trace gases* di TTL Indonesia selama 10 tahun sangat kecil. Beberapa parameter menunjukkan peningkatan konsentrasi seperti H<sub>2</sub>O yang meningkat paling signifikan yaitu sebesar 0,108 ppmv, sedangkan temperatur menunjukkan penurunan yang paling signifikan yaitu sebesar -0,456 K.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penyedia data komposisi kimia atmosfer hasil pengukuran satelit Aqua dan Aura milik NASA yang dapat diakses dengan mudah melalui fasilitas website MIRADOR maupun GIOVANNI.

## DAFTAR RUJUKAN

- Abalos, M., W.J. Randels, D. E. Kinnison, and E. Serrano, 2013. *Quantifying Tracer Transport in the Tropical Lower Stratosphere using WACCM*, Atmos. Chem. Phys., 13, 10591-10607, doi: 10.5194/acp-13-10591-2013.
- Ahmad, S. P., J. W. Waters, J. E. Johnson, I. V. Gerasimov, G. G. Leptoukh, and S. J. Kempler, 2006. *Atmospheric Composition Data Products from the EOS Aura MLS*, Proc. Amer. Meteorological Soc. Eighth Conf. on Atmospheric Chemistry, Atlanta, Georgia, 2006 Jan 28 - Feb 3.
- Ambarsari N., dan N. Komala, 2010. *Karakteristik Profil Vertikal Ozon, CO, Uap Air, dan Temperatur di Bandung dan Watukosek Berbasis Sensor MLS Satelit Aura*, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2010: Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim. Serpong 15 Nopember 2010.
- Ambarsari N., dan N. Komala, 2014. *Profil Vertikal Ozon dan CO pada Lapisan Tropopause Tropikal di Indonesia Hasil Observasi MLS/AURA*, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa 2014. Bandung 25 November 2014.
- Fueglistaler, S., A. E. Dessler, T. J. Dunkerton, I. Folkins, Q. Fu, and P. W. Mote, 2009. *Tropical Tropopause Layer*, Reviews of Geophysics, 47, RG1004, 1-31.
- Henz, D., 2010. *A Modelling Study of the Tropical Tropopause Layer*, Thesis University of Wisconsin-Madison.
- Jurkat, T., C. Voigt, S. Kaufmann, A. Zahn, M. Sprenger, P. Hoor, H. Bozem, S. Muller, A. Dornbrack, H. Schlager, H. Bonisch, and A. Engel, 2014. *A Quantitative Analysis of Stratospheric HCl, HNO<sub>3</sub>, and O<sub>3</sub> in the Tropopause Region Near the Subtropical Jet*, Geophys. Res. Lett., 41, 3315-3321, doi: 10.1002/2013GL059159.
- Kim, S., L. G. Huey, R. E. Stickel, R. B. Pierce, G. Chen, M. A. Avery, J. E. Dibb, G. S. Diskin, G. W. Sachse, C. S. McNaughton, A. D. Clarke, B. E. Anderson, and D. R. Blake, 2008. *Airborne Measurement of HCl from the Marine Boundary Layer to the Lower Stratosphere Over the North Pacific Ocean during INTEX-B*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 8, 3563-3595.
- Koishi, K., and M. Shiotani, 2012. *Water Vapour and Ozone Variations in the Tropical Tropopause Layer during the Central Equatorial Pacific Experiment Campaign*, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90(3), 403-416.
- Komala, N., N. Ambarsari, dan D. Y. Risdianto, 2013. *Analisis Profil Ozon Mixing Ratio dan Suhu di Sumatera berbasis data MLS dan insitu*, Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer-Antariksa. Serpong 22 Nopember 2011.
- Konopka, P., J. U. Groob, G. Gunther, F. Ploeger, R. Pommrich, and N. Livesey, 2010. *Annual Cycle of Ozone at and Above the Tropical Tropopause: Observations Versus Simulation with the Chemical Langrangian Model of the Stratosphere (CLaMS)*, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 10, 121-132.
- Liu, J., J. A. Logan, D. B. A. Jones, N. J. Livesey, I. Magretskaja, C. Carouge, and P. Nedelec, 2010. *Analysis of CO in the Tropical Troposphere using AURA Satellite Data and Geos-Chem Model: Insight into Transport Characteristics of the Geos Meteorological Products*, Atmos. Chem. Phys., 10, 12207-12232.
- Livesey, N. J., M. J. Filipiak, L. Froidevaux, W. G. Read, A. Lambert, M. L. Santee, J. H. Jiang, H. C. Pumphrey, J. W. Waters, and R. E. Cofield, 2008. *Validation of Aura Microwave Limb Sounder O<sub>3</sub> and CO observation in the Upper Troposphere*

- and Lower Stratosphere, *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-15.
- Marcy, T.P., P. J. Popp, R. S. Gao, D. W. Fahey, and E. A. Ray, 2007. *Measurement of Trace Gases in The Tropical Tropopause Layer*, *Atmospheric Environment*, 41, 7253-7261.
- Marecal, V., G. Krysztofiak, Y. Mebarki, V. Catoire, and F. Lott, 2011. *Impact of Deep Convection on the Tropical Tropopause Layer Composition in Equatorial Brazil*, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 16147-16183.
- Mebarki, Y., V. Catoire, N. Huret, G. Berthet, C. Robert, and G. Poulet, 2010. *More Evidence for Very Short Lived Substance Contribution to Stratospheric Chlorine inferred from HCl Balloon-Borne in situ Measurement in the Tropics*, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 397-409.
- Microwave Limb Sounder, <http://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>.
- MIRADOR, [www.mirador.gsfc.nasa.gov](http://www.mirador.gsfc.nasa.gov).
- Ploeger, F., P. Konopka, P. Muller, S. Fueglistaler, T. Schmidt, J.C. Manners, J. U. Groob, G. Gunther, P. M. Forster, and M. Riese, 2012. *Horizontal Transport Affecting Trace Gas Seasonality in the Tropical Tropopause Layer*, *Journal of Geophysical Research Letter*, 17, 1-16.
- Ploeger, F., S. Fueglistaler, J. U. Groob, G. Gunther, P. Konopka, Y. S. Liu, R. Muller, F. Ravegnani, C. Schiller, A. Ulanovski, and M. Riese, 2011. *Insight from Ozone and Water Vapour on Transport in the Tropical Tropopause Layer (TTL)*, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 407-409.
- Qian, L., S. Hua-Feng, S. Ai-Mei, B. Jian-Chun, and L. Da-Ren, 2014. *Distribution and Variation of Carbon Monoxide in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere*, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(3), 218-223.
- Santee, M. L., N. J. Livesey, G. L. Manney, A. Lambert, and W. G. Read, 2013. *Methyl Chloride from the Aura Microwave Limb Sounder: First Global Climatology and Assessment of Variability in the Upper Troposphere and Stratosphere*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 13532-13560.
- Stolarski, R. S., D. W. Waugh, L. Wang, L. D. Oman, A. R. Douglass, and P. A. Newman, 2014. *Seasonal Variation of Ozone in the Tropical Lower Stratosphere: Southern Tropics are Different from Northern Tropics*, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 119, doi:10.1002/2013JD 021294.
- Tuck, A. F., D. J. Donaldson, M. H. Hitchman, E. C. Richard, H. Tervahattu, V. Vaida, and J. C. Wilson, 2008. *On Geoengineering with Sulphate Aerosols in the Tropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere*, *Climatic Change*, 90, 315-331.
- Vomel, H., J. E. Barnes, R. N. Forno, M. Fujiwara, F. Hasebe, S. Iwasaki, R. Kivi, N. Komala, E. Kyro, T. Leblanc, B. Morel, S. Y. Ogino, W. G. Read, S. Ryan, S. Saraspriya, H. El Kirk, M. Shiotani, J. V. Canossa, and D. N. Whiteman, 2007. *Validation of Aura Microwave Limb Sounder Water Vapour by Balloon Borne Cryogenic Frost point Hygrometer Measurement*, *J. Geophys. Res.*, 112.
- Waters J.W., L. Froidevaux, and R. S. Harwood, 2006. *The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on The Aura Satellite*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, No. 5.
- Yan, X., S. J. Wright, X. Zheng, J. N. Livesey, H. Vomel, and X. Zhou, 2016. *Validation of Aura MLS Retrievals of Temperature, Water Vapour, and Ozone in the Upper Troposphere and Lower-Middle Stratosphere Over Tibetan Plateau During Boreal Summer*, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 3547-3556.