

PROFIL VERTIKAL KARBON MONOKSIDA (CO) DAN BROMIN MONOKSIDA (BR_O) DI LAPISAN STRATOSFER DI INDONESIA HASIL OBSERVASI SENSOR MLS/AURA

VERTICAL PROFILE OF STRATOSPHERIC CARBON MONOXIDE (CO) AND BROMINE MONOXIDE (BR_O) OVER INDONESIA BASED ON MLS/AURA OBSERVATION

Novita Ambarsari*, Niñong Komala, Asri Indrawati

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

Jl Dr Djundjunaan No 133 Bandung 40173*

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

ABSTRACT

Research on the composition of the atmosphere of Indonesia (CO and BrO) in the stratosphere using data from the Microwave Limb Sounder (MLS) instrument measurements on AURA satellite has been done. Study area in this study include the territory of Indonesia (6 °N - 11 °S and 95 °E - 145 °E). The data used include daily data CO and BrO vertical profile from 2005 to 2013. The daily data of vertical profiles of CO and BrO averaged across Indonesia in the form of area average daily yield of CO and BrO profile. Monthly variation of the height to CO and BrO, monthly and seasonal variations in the vertical profiles of CO and BrO, the trend of concentration on some pressure, in the stratosphere has been done. The results showed the characteristics of CO in the stratosphere is characterized by a decrease in concentration of up to a minimum at a pressure of about 31 to 21 hPa or at an altitude of 23-25 km. BrO characteristics showed high concentrations in the middle stratosphere (14 hPa) and decreased to a pressure of 2 hPa. Trend CO concentration in the stratosphere showed an increase in 2006 then declined and remained constant until 2013. Trend BrO concentrations in some altitude in the stratosphere indicate a pattern similar to a drastic decline occurred in April 2006 and July 2007.

Keywords: CO, BrO, stratosphere, MLS, AURA

ABSTRAK

Penelitian mengenai komposisi atmosfer Indonesia (CO dan BrO) di lapisan *stratosfer* menggunakan data hasil pengukuran instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) satelit AURA telah dilakukan. Wilayah kajian dalam penelitian ini meliputi wilayah Indonesia (6°LU – 11° LS dan 95°BT – 145°BT). Data yang digunakan meliputi data harian profil vertikal CO dan BrO dari tahun 2005 hingga 2013. Data harian profil vertikal CO dan BrO seluruh Indonesia dirata-ratakan dalam bentuk *area average* menghasilkan satu profil harian CO dan BrO. Variasi bulanan terhadap ketinggian untuk CO dan BrO, variasi bulanan dan musiman profil vertikal CO dan BrO, trend konsentrasi pada beberapa tekanan, pada lapisan stratosfer telah dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan karakteristik CO pada lapisan stratosfer ditandai dengan adanya penurunan konsentrasi hingga mencapai minimum pada tekanan sekitar 31 hingga 21 hPa atau pada ketinggian 23-25 km. Karakteristik BrO menunjukkan konsentrasi tinggi di stratosfer tengah (14 hPa) dan menurun hingga tekanan 2 hPa. Trend konsentrasi CO di stratosfer menunjukkan adanya peningkatan di tahun 2006 kemudian menurun dan cenderung konstan hingga tahun 2013. Trend konsentrasi BrO di beberapa ketinggian di stratosfer menunjukkan adanya pola yang mirip dengan penurunan drastis terjadi pada April 2006 dan Juli 2007.

Kata kunci: *CO, BrO, stratosfer, MLS, AURA*

PENDAHULUAN

Distribusi karbon monoksida (CO) di stratosfer telah banyak dilakukan untuk mengetahui proses dinamika dan transport gas-gas telusur (*trace gases*) di atmosfer. Hal ini dikarenakan waktu hidup secara fotokimia untuk CO diprediksi paling tidak sama dengan skala waktu dari sebagian besar proses dinamika di atmosfer. Pengukuran CO menjadi sangat penting untuk

membantu memahami sirkulasi mesosfer global serta pergerakan vertikal di stratosfer dan mesosfer.¹ Seperti halnya CO, Bromin Monoksida (BrO) juga memiliki peran penting di stratosfer, karena berkontribusi dalam proses penguraian ozon melalui siklus katalitik halogen dengan potensi menguraikan ozon lebih besar dibandingkan dengan senyawa lainnya yang mengandung klorin.² Di stratosfer atas, BrO

merupakan senyawa dominan yang berkontribusi terhadap jumlah bromin inorganik yang ada di stratosfer. Peranan penting CO dan BrO di stratosfer sehingga sangat penting juga untuk mengetahui karakteristik kedua senyawa tersebut di stratosfer adalah menjadi latar belakang dari penelitian ini. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik CO dan BrO di stratosfer di Indonesia berdasarkan variabel waktu (bulanan, musiman, trend), dan variabel ketinggian (vertikal).

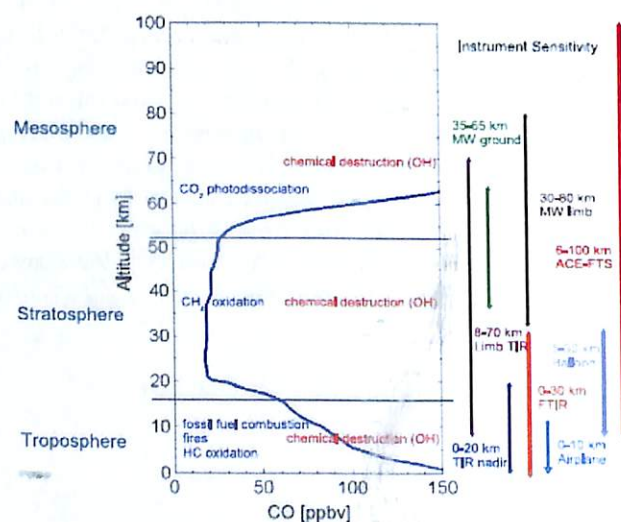
Bromin Monoksida (BrO) merupakan salah satu senyawa yang tergolong pada bromine inorganik ($Br_y = Br + BrO + BrONO_2 + HOBr + HBr + BrCl + 2Br_2$) yang berperan penting di stratosfer karena menyebabkan penguraian molekul ozon. BrO secara signifikan dapat mempengaruhi komposisi kimia di stratosfer dan berkontribusi terhadap penguraian ozon melalui reaksi dengan NO_2 , ClO, HO_2 , dan O. Walaupun jumlah bromin inorganik di stratosfer hanya sedikit dibandingkan dengan jumlah klorin, tetapi kemampuan senyawa ini dalam menguraikan ozon atau disebut *Ozone Depletion Potential* (ODP) lebih besar dibandingkan dengan senyawa yang mengandung klorin, sehingga efek penguraian ozon oleh bromin inorganik lebih dominan yaitu sekitar 25 % untuk wilayah kutub, dan 50 % untuk wilayah lintang menengah melalui siklus BrO/ClO.³

Sumber bromin di stratosfer berasal dari alam maupun antropogenik. Akibat peningkatan emisi antropogenik senyawa sumber yang mengandung bromine, telah terjadi peningkatan jumlah Bromin di atmosfer dari 10 ppt (*part per trillion*) pada tahun 1970 menjadi 20 ppt pada tahun 2000.⁴ Sumber utama bromine di stratosfer adalah berasal dari metil bromide (CH_3Br), halon, terutama halon-1211 ($CBrClF_2$), halon-1301 ($CBrF_3$), dan halon-2402 ($CBrF_2CBrF_2$), juga bromoklorometan (CH_2BrCl), dan dibromometan (CH_2Br_2). Metil bromide menjadi senyawa yang paling dominan menghasilkan bromine di stratosfer yaitu sebesar 50 % dibandingkan dengan senyawa-senyawa sumber yang lain.⁴

Hasil penelitian Stachnik, dkk.² yang melakukan pengukuran rasio campuran BrO menggunakan wahana balon dengan sensor submilimeterwave radiometer di daerah New Mexico menunjukkan konsentrasi BrO di stratosfer pada ketinggian sekitar 34 km adalah 16 pptv. Selain itu, hasil penelitian lain yang dilakukan oleh Sioris, dkk.⁵ menggunakan data satelit Sciamachy yang menganalisis konsentrasi BrO secara latitudinal dan vertikal menunjukkan

konsentrasi BrO di daerah ekuator (lintang 0 derajat) adalah antara 20-22 pptv pada ketinggian sekitar 28 km.⁵

Karbon monoksida (CO) berperan penting pada siklus kimia di atmosfer dan merupakan salah satu senyawa kunci yang perlu diukur secara global pada ketinggian yang berbeda. Sumber emisi CO yang utama adalah dari proses pembakaran meliputi transportasi, pemanasan, aktivitas industri, dan pembakaran biomassa, juga dari sumber *biogenic* dan laut. CO juga diproduksi dari oksidasi metana dan non-metana hidrokarbon. Di permukaan, rasio volume campuran CO berkisar antara 50 ppbv untuk konsentrasi *background* hingga mencapai 700 ppbv di tempat dengan emisi yang tinggi. Penguraian CO yang utama di atmosfer akibat reaksi oksidasi oleh OH. Di lapisan atmosfer permukaan, dimana CO memiliki waktu hidup beberapa minggu hingga beberapa bulan sehingga pengukuran CO di permukaan memungkinkan untuk menyelidiki sumber emisi serta proses transport di atmosfer. Di troposfer atas, CO dapat ditransport melalui lapisan *tropical tropopause* kemudian sampai di stratosfer. Selain itu, sumber utama CO di stratosfer adalah dari hasil oksidasi metana menjadi CO_2 melalui reaksi dengan radikal OH.⁶ Profil vertikal CO hasil pengukuran ACE-FTS dan TES di wilayah Cina ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot skematik profil standar CO di atmosfer dengan beberapa sumber yang berbeda sebagai fungsi dari ketinggian hasil pengukuran instrument ACE-FTS (*The Atmospheric Chemistry Experiment*) di Cina yang dikompilasi dengan data TES (*Tropospheric Emission Spectrometer*) di wilayah sama untuk ketinggian di bawah 6 km.⁶

METODOLOGI

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data harian profil vertikal CO dan BrO hasil observasi instrumen *Microwave Limb Sounder* (MLS) pada satelit AURA yang dapat diperoleh dari website MIRADOR (www.mirador.gsfc.nasa.gov) dalam format HDF (*Hierarchical Data Format*) yang memuat data konsentrasi, lintang, bujur, dan ketinggian (*pressure*) dari tahun 2005 hingga 2013.⁷ Data dalam format HDF harus diekstrak, diolah, kemudian dianalisis. Wilayah kajian pada penelitian ini meliputi wilayah Indonesia ($6^{\circ}\text{LU} - 11^{\circ}\text{LS}$ dan $95^{\circ}\text{BT} - 145^{\circ}\text{BT}$). Data profil vertikal CO dan BrO di Indonesia dirata-ratakan menjadi satu profil vertikal CO dan BrO untuk seluruh wilayah Indonesia (*area average*). Analisis yang dilakukan meliputi analisis profil vertikal, variasi bulanan, musiman, variasi bulanan terhadap ketinggian, dan trend konsentrasi CO pada tekanan 100 hingga 1 hPa dan BrO pada 14 hPa hingga 2 hPa yang mewakili lapisan stratosfer.

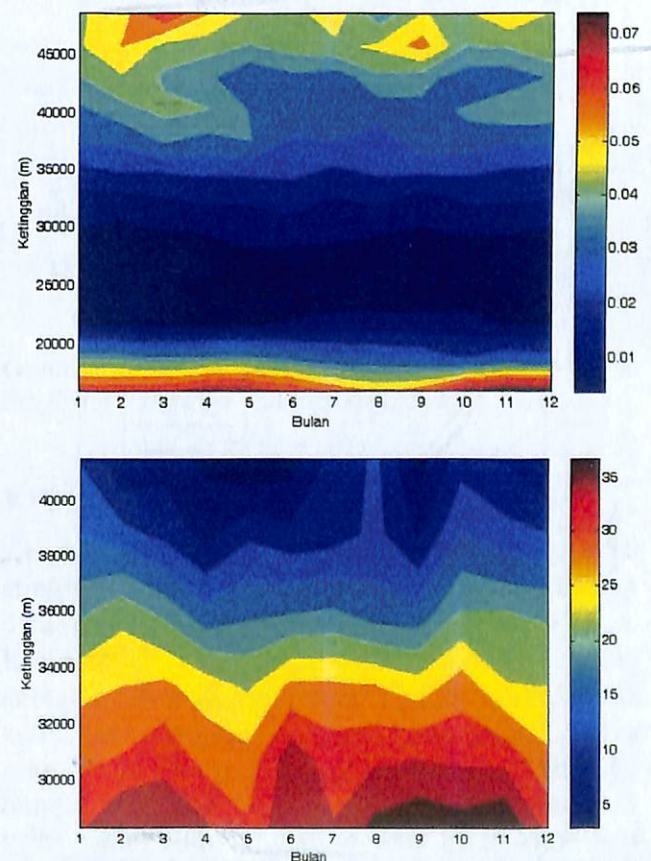
HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi rata-rata bulan konsentrasi CO dan BrO terhadap ketinggian (Gambar 2) tampak distribusi CO secara vertikal (Gambar 2 atas) menunjukkan konsentrasi CO tinggi di stratosfer bawah kemudian menurun dan mencapai minimum pada ketinggian 25 km dengan konsentrasi hanya sekitar 0,01 ppmv kemudian meningkat kembali hingga mencapai maksimum di stratosfer atas yaitu ketinggian sekitar 48 km dengan konsentrasi mencapai 0,06 ppmv atau 60 ppbv. Hal ini diprediksi disebabkan oleh reaksi penguraian CO oleh molekul OH paling efektif terjadi pada ketinggian 25 km selain itu juga diakibatkan oleh lemahnya difusivitas vertikal.⁸ Bulan Juli-September menunjukkan adanya penurunan konsentrasi CO baik di stratosfer bawah (ketinggian ~20 km) diperkirakan bulan-bulan tersebut adalah bulan saat musim kemarau sehingga proses konvektif yang menjadi salah satu jalur transport emisi CO dari permukaan ke stratosfer berkurang, akibatnya konsentrasi CO di stratosfer bawah menjadi lebih rendah dibandingkan dengan bulan-bulan lainnya.⁹

Berbeda dengan variasi bulanan BrO terhadap ketinggian (Gambar 2 bawah) yang menunjukkan konsentrasi BrO sangat tinggi pada ketinggian 28 km hingga sekitar 32 km dengan konsentrasi mencapai 35 pptv (*part per trillion volume*) atau 35000 ppbv (*part per billion volume*). Konsentrasi BrO kemudian turun seiring dengan

meningkatnya ketinggian. Data konsentrasi BrO yang dapat digunakan untuk penelitian dibatasi hanya pada ketinggian 10 hPa (sekitar 30 km) hingga 3,2 hPa (sekitar 40 km), sedangkan data pada ketinggian yang lain tidak dianjurkan untuk digunakan.¹⁰

Variasi musiman profil CO dan BrO di stratosfer Indonesia ditunjukkan pada Gambar 3. Variasi musiman profil vertikal CO di stratosfer (Gambar 3 atas) menunjukkan konsentrasi CO pada ketinggian 18 km di bulan JJA saat musim kemarau, lebih rendah dibandingkan bulan-bulan lainnya, yaitu sebesar 0,602 ppmv. Konsentrasi CO di ketinggian 18 km pada bulan MAM mencapai maksimum dengan konsentrasi 0.711 ppmv.

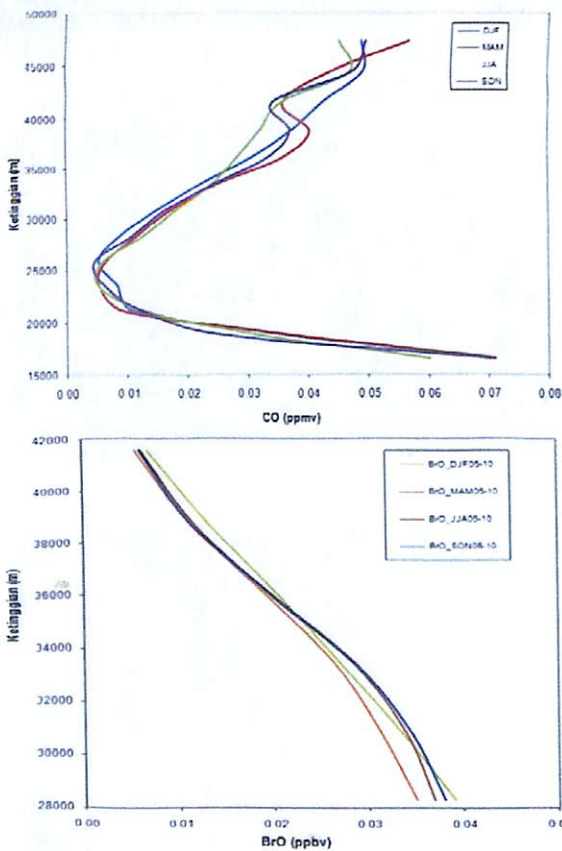


Gambar 2. Variasi Rata-rata Bulanan terhadap Ketinggian untuk CO (ppmv) (atas) tahun 2005-2013 dan BrO (pptv) (bawah) tahun 2005-2010 di Stratosfer.

Variasi musiman profil vertikal CO juga menunjukkan adanya penurunan konsentrasi hingga mencapai terendah pada ketinggian sekitar 25 km dengan konsentrasi rata-rata hanya sekitar 0,005 ppmv atau 5 ppbv. Variasi musiman profil vertikal BrO menunjukkan konsentrasi BrO maksimum pada ketinggian 28 km pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF) dengan konsentrasi 0,04 ppbv dan terendah pada bulan

Maret-April Mei (MAM) dengan konsentrasi 0,035 ppbv.

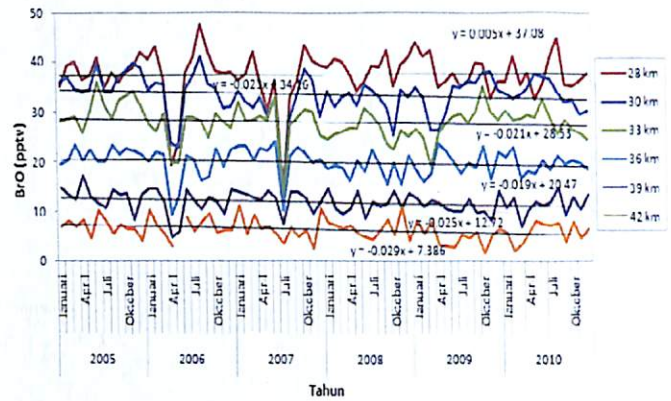
Trend konsentrasi BrO di beberapa ketinggian di lapisan stratosfer ditunjukkan pada Gambar 4. Pada ketinggian 28 km atau sekitar stratosfer tengah, konsentrasi BrO cenderung konstan dengan sedikit sekali peningkatan ditunjukkan dengan persamaan garis $y=0,005x + 37,08$. Sedangkan pada ketinggian-ketinggian lain di atasnya, yaitu dari ketinggian 30 km hingga 42 km, konsentrasi BrO menunjukkan penurunan yang dapat dilihat dari nilai persamaan garis yang menunjukkan koefisien x bernilai negatif.



Gambar 3. Profil Vertikal Rata-rata Musiman untuk CO tahun 2005-2013 (atas) dan BrO tahun 2005-2010 (bawah) di Stratosfer Indonesia

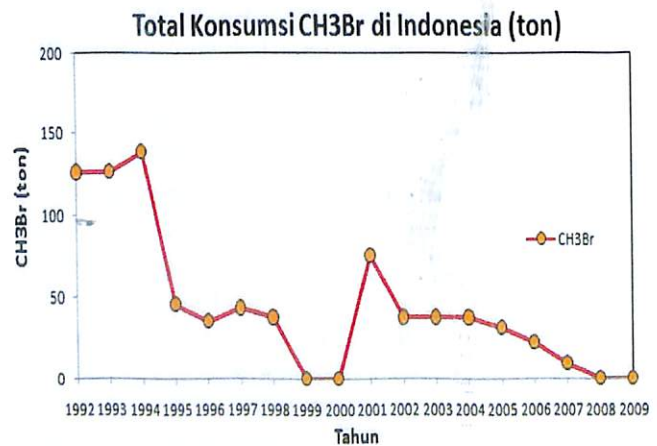
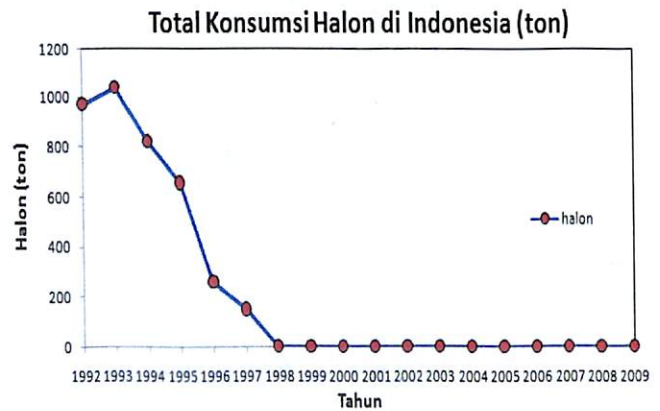
Hal ini diperkirakan disebabkan pada ketinggian yang lebih rendah, konsentrasi BrO masih dipengaruhi oleh kontribusi dari sumber yang ada di troposfer saat ini. Hal ini sesuai dengan pernyataan Sioris, dkk (2006) bahwa lebih dari 50 % bromine di stratosfer berasal dari sumber yang berada di troposfer.⁵ Berbeda dengan BrO yang terdapat di stratosfer atas yang merupakan sisa BrO yang masuk ke stratosfer di waktu-waktu sebelumnya. Seiring dengan pembatasan penggunaan senyawa sumber yang

menghasilkan BrO, terjadi penurunan konsentrasi BrO di stratosfer yang lebih tinggi.



Gambar 4. Trend Konsentrasi BrO di Stratosfer Indonesia Tahun 2005-2010.

Penggunaan senyawa halon dan metil bromide (CH_3Br) sebagai sumber dari BrO di stratosfer di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 5. Pada Gambar 5 tampak penurunan penggunaan Halon dan metil bromida di Indonesia terutama sejak tahun 1998 akibat pelarangan yang disepakati pada Protokol Montreal pada tahun 1987.¹¹ Jadwal penghapusan Halon dan Metil Bromida ditampilkan pada Tabel 1.



Gambar 5. Trend Penggunaan Halon sebagai Sumber Senyawa Bromin di Stratosfer Indonesia.¹²

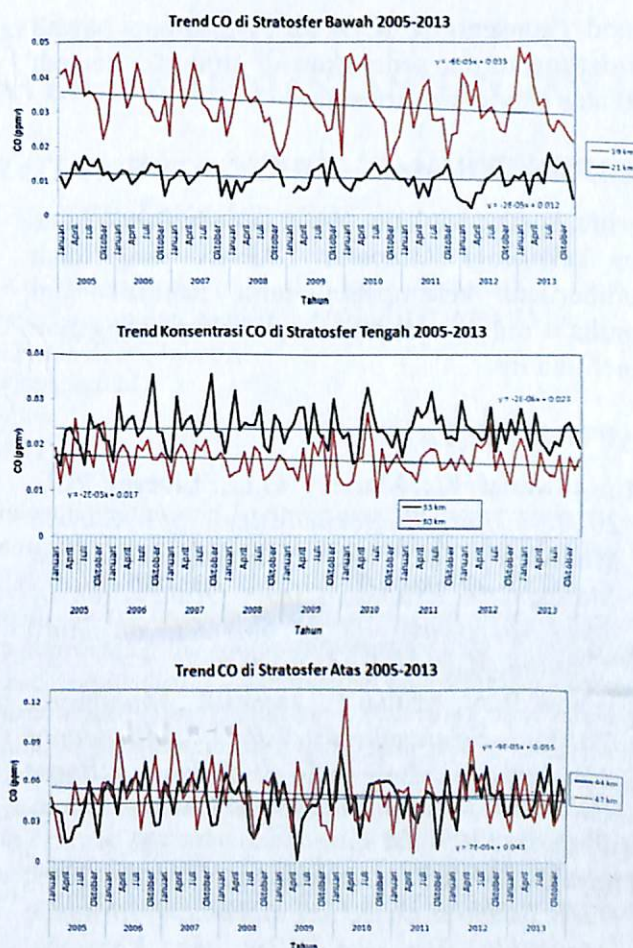
Tabel 1. Jadwal Penghapusan Beberapa Jenis Bahan Perusak Ozon di Indonesia termasuk Halon dan Metil Bromida (CH_3Br).¹²

Bahan perusak ozon	Jadwal penghapusan
CFC	2007
Halon	1998
CTC	2007
TCA	2007
Metil Bromida	2015
Hidrokloroflorokarbon	2040

Trend konsentrasi CO di stratosfer bawah, tengah, dan atas ditunjukkan pada Gambar 6. Konsentrasi CO pada ketinggian 19 km yaitu di stratosfer bawah menunjukkan nilai yang lebih tinggi yaitu mencapai 0,05 ppmv dibandingkan dengan konsentrasi CO pada ketinggian 21 km yang hanya sekitar 0,01 hingga 0,02 ppmv. Pengaruh dari troposfer masih dominan berkontribusi pada jumlah CO pada ketinggian 19 km, sedangkan pada ketinggian 21 km sumber CO dari troposfer mulai berkurang dan berganti menjadi CO yang dihasilkan dari oksidasi metana. Akibatnya konsentrasi CO lebih rendah.⁶ Trend yang menunjukkan adanya penurunan kemungkinan berkaitan dengan menurunnya emisi CO di permukaan, walaupun hal ini masih perlu diselidiki lebih lanjut.

Konsentrasi CO di stratosfer tengah yaitu pada ketinggian 30 km dan 33 km menunjukkan nilai konsentrasi yang tidak terlalu berbeda hanya sekitar 0,01 hingga 0,035 ppmv. Hal ini diperkirakan karena sumber CO yang sama-sama berasal dari oksidasi metana. Seperti tampak pada Gambar 1, profil vertikal CO pada lapisan stratosfer tengah cenderung konstan dengan konsentrasi sekitar 20 ppbv atau 0,02 ppmv dan mulai meningkat di puncak stratosfer mendekati mesosfer. Tampak adanya kesesuaian dengan hasil penelitian ini. Berbeda dengan trend di stratosfer bawah, trend konsentrasi CO di stratosfer tengah cenderung konstan, begitu juga di stratosfer atas.

Konsentrasi CO di stratosfer atas terutama pada ketinggian 47 km menunjukkan peningkatan hingga mencapai nilai 0,12 ppmv. Hal ini juga sesuai dengan Gambar 2, kemungkinan disebabkan CO yang dihasilkan di lapisan mesosfer yang berasal dari disosiasi CO_2 sebagian kecil mengalami transport ke stratosfer atas sehingga konsentrasi CO lebih tinggi.⁶



Gambar 6. Trend Konsentrasi CO di Tiga Wilayah Stratosfer Indonesia Tahun 2005-2013

KESIMPULAN

Karakteristik profil vertikal CO dan BrO di stratosfer Indonesia telah dikaji menggunakan data hasil observasi instrument MLS/ AURA. Konsentrasi CO tinggi di stratosfer bawah kemudian menurun dan mencapai minimum pada ketinggian 25 km dengan konsentrasi hanya sekitar 0,01 ppmv kemudian meningkat kembali hingga mencapai maksimum di stratosfer atas yaitu ketinggian sekitar 48 km mencapai 0,06 ppmv. Konsentrasi BrO sangat tinggi pada ketinggian 28 km hingga sekitar 32 km dengan konsentrasi mencapai 35 pptv. Konsentrasi BrO kemudian turun seiring dengan meningkatnya ketinggian. Variasi musiman profil vertikal CO di stratosfer menunjukkan konsentrasi CO pada ketinggian 18 km di bulan JJA saat musim kemarau, lebih rendah dibandingkan bulan-bulan lainnya, yaitu sebesar 0,602 ppmv. Variasi musiman profil vertikal BrO menunjukkan konsentrasi BrO maksimum pada ketinggian 28 km pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF) dengan konsentrasi 0,04 ppbv. Trend konsentrasi BrO di stratosfer tengah cenderung meningkat, sedangkan di stratosfer atas cenderung turun.

Trend konsentrasi CO di stratosfer bawah cenderung turun, sedangkan di stratosfer tengah dan atas cenderung konstan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN yang telah memberikan kesempatan serta fasilitas bagi penulis untuk dapat melakukan kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Minschwaner K., Manney G.L., Livesey N.J., 2010. *The Photochemistry of Carbon Monoxide in the Stratosphere and Mesosphere Evaluated from Observation by The Microwave Limb Sounder on Aura Satellite*, JGR. Vol. 15. P.1-9.
- ²Stachnik R.A., Millan L., Jarnot R., Monroe R., 2013. *Stratospheric BrO Abundance Measured by a Ballon Borne Submillimeterwave Radiometer*, Atmos. Chem. Phys. 3. 3307-3319.
- ³Theys N., Van Roozendaal M., Dils B., 2009. *First Satellite Detection of Volcanic Bromine Monoxide Emission After the Kasatochi Eruption*, Geophys.Res.Letter. 36. P.1-5.
- ⁴Sinnhuber B.M., Arlander D.W., Bovensman H., 2002. *Comparison of Measurement and Model Calculation of Stratospheric Bromine Monoxide*, Journal of Geophysical Research Letter, Vol. 107, P.1-18.
- ⁵Sioris C.E., Kovalenko L.J., McLinden C.A., 2006. *Latitudinal and Vertical Distribution of Bromine Monoxide in The Lower Stratosphere from Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography Lims Scattering Measurement*, Journal of Geophysical Research Letter, Vol. 111, P.1-25.
- ⁶Clerbaux C., George M., Turquety S., 2008. *CO Measurement from the ACE-FTS Satellite Instrument : Data Analysis and Validation Using Ground Based, Airborne, and Spaceborn Observation*, Atmos. Chem. Pyhs. 8. P. 2569-2594.
- ⁷MIRADOR NASA.
www.mirador.gsfc.nasa.gov.
- ⁸Dupuy E., Urban J., Ricaud P., 2004. *Strato-mesospheric measurements of carbon monoxide with the Odin Sub-Millimetre Radiometer: Retrieval and first results*, Geophys. Res. Letter. Vol. 31. P. 1-5.
- ⁹F. Fierli., E. Orlandi., K. S. Law., C. Cagnazzo., F. Cairo., C. Schiller., S. Borrmann., G. Di Donfrancesco., F. Ravegnani., and C. M. Volk., 2011. *Impact of deep convection in the tropical tropopause layer in West Africa: in-situ observations and mesoscale modeling*, Atmos. Chem. Phys., 11, 201–214.
- ¹⁰JPL., 2007. *Earth Observing System (EOS) Microwave Limb Sounder (MLS) Version 2.2 Level 2 Data Quality and Description Document*,
https://mls.jpl.nasa.gov/data/v2_data_quality_document.pdf.
- ¹¹Kementrian Lingkungan Hidup, 2004. *Brosur Program Perlindungan Lapisan Ozon dan Bahan-Bahan Perusak Ozon*.
- ¹²UNEP, 2010. *ODS and Related Chemicals, Ozone Report UNEP, UNEP Ozone Secretariat*,
http://ozone.unep.org/Data_Reporting/Data_Access/index.shtml