



Prosiding Seminar Sains Antariksa

Homepage: <http://www.lapan.go.id>



KARBON MONOKSIDA (CO) DI MESOSFER- TERMOSFER INDONESIA SERTA PENGARUH *TOTAL* *SOLAR IRRADIANCE* (TSI)

(Mesospheric-Termospheric Carbon Monoxide Over Indonesia And Effect of
Total Solar Irradiance (TSI))

Novita Ambarsari dan Ninong Komala
Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA),
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
e-mail: novita.ambarsari@lapan.go.id, novitaambar@yahoo.com

ABSTRAK

Riwayat Artikel:

Diterima: 19-11-2015
Direvisi: 16-10-2016
Disetujui: 19-10-2016
Diterbitkan: 24-10-2016

Kata Kunci : CO, total solar irradiance, MLS AURA, SORCE

Keywords: CO, total solar irradiance, MLS AURA, SORCE

Variabilitas karbon monoksida (CO) hasil pengukuran instrument *Microwave Limb Sounder* (MLS) satelit AURA tahun 2005-2012 telah dianalisis pada penelitian ini khususnya untuk lapisan mesosfer-termosfer di Indonesia. Variasi CO di mesosfer-termosfer yaitu dari ketinggian 50 km hingga ketinggian sekitar 91 km atau pada tekanan 0,68 hPa hingga 0,001 hPa dianalisis secara profil vertikal bulanan, musiman, time series terhadap ketinggian, serta time series pada tekanan 0,005 hPa (83 km) dan 0,001 hPa (91 km). CO di mesosfer-termosfer sensitive terhadap radiasi matahari karena dihasilkan dari reaksi fotolisis karbon dioksida (CO₂). Untuk melihat pengaruh radiasi matahari terhadap variasi CO di mesosfer-termosfer, hasil analisis CO kemudian dibandingkan dengan variasi *Total Solar Irradiance* (TSI) dari satelit *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE). Konsentrasi CO mencapai maksimum pada ketinggian 0,001 hPa atau 91 km di lapisan termosfer mencapai nilai 45 ppmv. Pola tahunan CO pada 0,001 (91 km) hPa tahun 2005-2012 menunjukkan adanya dua nilai maksimum yaitu pada bulan April mencapai 50 ppmv dan Oktober mencapai 55 ppmv serta satu nilai minimum yaitu pada bulan Juni atau Juli dengan nilai antara 20-35 ppmv. Time series rata-rata bulanan CO pada 0,001 (91 km) hPa tahun 2005-2012 memiliki pola yang sama dengan rata-rata bulanan TSI yang menurun sejak akhir 2006 hingga awal 2010 kemudian meningkat kembali dan mencapai maksimum pada bulan Oktober 2011. Plot tahunan CO dan TSI bulan Desember dan Juli tahun 2005-2012 juga menunjukkan pola yang sama. Begitu juga dengan nilai korelasi CO dengan TSI untuk bulan Desember sebesar 0,96 dan bulan Juli sebesar 0,57 yang menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara kedua parameter tersebut.

ABSTRACT

Variability of carbon monoxide (CO) measurement results from instrument *Microwave Limb Sounder* (MLS) satellite AURA years 2005 to 2012 have

been analyzed in this study, especially for the mesosphere-thermosphere layer in Indonesia. CO variations in the mesosphere-thermosphere is of a height of 50 km to a height of about 91 km or at pressures of 0.68 hPa up to 0.001 hPa were analyzed with monthly vertical profiles, seasonal, time series of heights, as well as time series at a pressure of 0.005 hPa (83 km) and 0,001 hPa (91 km). CO in the mesosphere-thermosphere sensitive to solar radiation because it is produced from the photolysis reaction of carbon dioxide (CO₂). To see the effect of solar radiation to variations in the mesosphere-thermosphere CO, CO analysis results are then compared with the variation of Total Solar Irradiance (TSI) of the satellite Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). CO concentration reaches a maximum at an altitude of 0,001 hPa or 91 km in the thermosphere reaches a value of 45 ppmv. The annual pattern of CO at 0,001 hPa (91 km) from years 2005 to 2012 showed that the two maximum value in April reached 50 ppmv and 55 ppmv and October reached the minimum value that is in June or July with a value between 20-35 ppmv. Time series monthly average CO at 0,001 hPa years 2005 to 2012 have the same pattern with a monthly average of TSI declining since late 2006 until early 2010 and then increased again and reached a maximum in October 2011. The annual plot CO and TSI December and July of 2005-2012 also showed the same pattern. As well as the correlation value CO with TSI for December by 0.96 and in July of 0.57 which indicates a strong correlation between these two parameters.

1. Pendahuluan

Karbon monoksida (CO) di atmosfer merupakan spesi kunci karena berperan dalam proses kimia dan dinamika atmosfer. Di troposfer, CO dihasilkan terutama dari pembakaran bahan bakar fosil. CO di troposfer berperan sebagai polutan sekaligus spesi pembentuk (prekursor) ozon dan gas rumah kaca CO₂ (Worden et al., 2013). Waktu hidup CO di troposfer yang berkisar selama 2 bulan menjadikan CO sangat tepat digunakan sebagai objek telusur (tracer) untuk karakterisasi sumber emisi serta pergerakan polutan di atmosfer (Funke et al., 2009). Di stratosfer, CO dihasilkan dari oksidasi metana. CO mengalami penguraian terutama karena bereaksi dengan radikal hidroksi (OH) di atmosfer. Lain halnya dengan di lapisan stratosfer, di mesosfer dan termosfer, di atas 50 km, CO dihasilkan dari proses fotolisis karbon dioksida (CO₂) yang menjadi sumber utama CO dengan konsentrasi mencapai 300 ppbv pada 50 km dan antara 5-20 ppmv pada ketinggian 80 km (Clerbaux et al., 2005).

Proses fotolisis CO₂ di mesosfer dan termosfer untuk menghasilkan CO sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari (Lee et al., 2013). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui variabilitas karbon

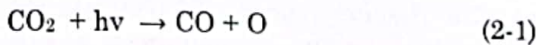
monoksida di mesosfer-termosfer Indonesia serta pengaruh dari radiasi matahari selama tahun 2005-2013. Sensor *Microwave Limb Sounder* (MLS) pada satelit AURA milik NASA memiliki kemampuan untuk mengukur profil vertikal komposisi kimia atmosfer termasuk CO hingga ketinggian mencapai 90 km (termosfer) sehingga memungkinkan untuk digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, untuk melihat pengaruh radiasi matahari, dilakukan analisis perbandingan dengan variasi nilai *Total Solar Irradiance* (TSI) sebagai proksi dari nilai radiasi matahari dari satelit *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE).

2. Tinjauan Pustaka

Profil vertikal CO di atmosfer tengah dan atas telah banyak diteliti terutama untuk mempelajari proses dinamika dan transport komposisi kimia atmosfer. CO digunakan sebagai objek studi karena waktu hidup fotokimianya diperkirakan hampir sama dengan skala waktu berbagai proses dinamika atmosfer (Minschwaner et al., 2010). Penelitian yang dilakukan oleh Clerbaux et al. (2009) memuat distribusi global CO dari troposfer atas hingga ke termosfer (ketinggian 5 hingga 110 km) menggunakan satelit ACE-FTS. Hasilnya profil vertikal CO di mesosfer-

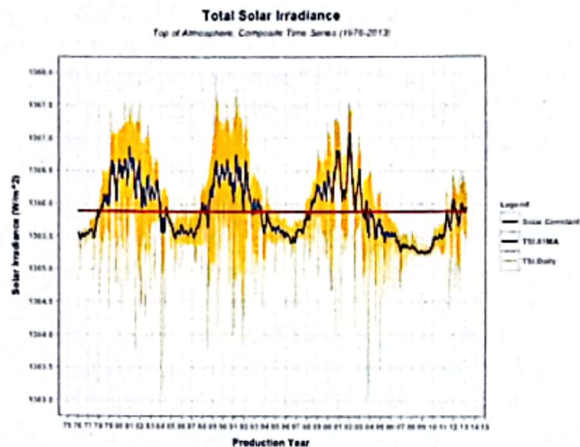
termosfer mencapai konsentrasi maksimum hingga 20 ppmv pada ketinggian 90 km. Penelitian profil vertikal CO di Indonesia khususnya di Bandung juga telah dilakukan oleh Ambarsari et al. (2010) menggunakan data CO dari MLS AURA. Hasil penelitian tersebut menunjukkan profil vertikal CO di mesosfer atas pada ketinggian sekitar 80 km mencapai 65 ppmv.

Sumber CO di mesosfer dan termosfer yang utama adalah dari reaksi fotolisis CO₂ oleh radiasi matahari kemudian mengalami transport ke mesosfer bawah dan stratosfer (Solomon et al., 1985). Reaksi fotolisis CO₂ oleh radiasi matahari diuraikan dalam reaksi (2-1).



Berdasarkan persamaan reaksi (2-1) intensitas reaksi fotolisis CO₂ untuk menghasilkan CO sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari. Penelitian yang mengaitkan variabilitas CO di mesosfer dengan siklus matahari telah dilakukan oleh Lee et al. (2013). Penelitian tersebut juga menggunakan data CO dari MLS AURA dan data TSI (Total Solar Irradiance) dari satelit *SORCE* untuk kondisi global dari lintang 80 LS hingga 80 LU. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya variasi zonal konsentrasi CO yang sangat tinggi di wilayah Kutub Utara (80 LU) pada bulan Desember dan di Kutub Selatan (80 LS) pada bulan Juli mencapai 10 ppmv, juga adanya pengaruh dari radiasi matahari yang terlihat dari variasi temporal maupun korelasi yang baik antara CO dengan TSI pada ketinggian sekitar 80 km. Penelitian Lee et al. (2013) tersebut dijadikan rujukan utama dalam penelitian ini untuk melihat bagaimana pengaruh radiasi matahari terhadap variabilitas CO di mesosfer-termosfer di Indonesia (6 LU – 11 LS, 95 BT – 145 BT).

Total Solar Irradiance (TSI) merupakan jumlah radiasi elektromagnetik matahari per unit area yang sampai ke puncak atmosfer Bumi atau *top of the Atmosphere* (TOA). Konstanta matahari atau solar constant merupakan rata-rata dari nilai TSI (Horn, 2015).



Gambar 2-1. Time series nilai TSI dan konstanta matahari (Horn, 2015).

3. Data dan Metode

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data profil vertikal harian CO hasil pengukuran sensor MLS AURA untuk wilayah Indonesia selama tahun 2005-2013. Data radiasi matahari yang digunakan adalah data harian *Total Solar Irradiance* (TSI) global dalam satuan W/m² dari satelit *SORCE* (*Solar Radiation and Climate Experiment*) untuk rentang waktu penelitian yang sama. Satelit *SORCE* milik NASA memiliki kemampuan untuk mengukur radiasi matahari yang masuk dalam x-ray, ultraviolet, sinar tampak, dan total radiasi yang masuk (TSI) (Colorado University, 2015). Sensor MLS AURA memiliki kemampuan untuk mengukur parameter kimia atmosfer termasuk CO cakupan wilayah global dan dengan resolusi data yang cukup baik yaitu resolusi vertikal 3 km dan spasial 200 km (Ahmad et al., 2006).

Data profil vertikal harian CO dari MLS dalam format HDF (*Hierarchical Data Format*) diekstrak untuk memperoleh parameter lintang, bujur, tekanan (hPa) kemudian dikonversi menjadi ketinggian (km), dan konsentrasi CO (ppmv). Kemudian dirata-ratakan untuk area Indonesia (*area average*) menghasilkan satu profil vertikal harian untuk seluruh Indonesia. Selanjutnya dilakukan perta-rataan bulanan dan musiman untuk memperoleh variasinya. Data profil vertikal CO mengukur konsentrasi CO dari troposfer atas hingga termosfer bawah (91 km). Analisis difokuskan pada profil vertikal CO dari ketinggian 50 km hingga 91 km atau dari lapisan mesosfer hingga ke termosfer bawah. Data TSI harian juga dirata-ratakan menjadi

data rata-rata bulanan untuk memudahkan analisis.

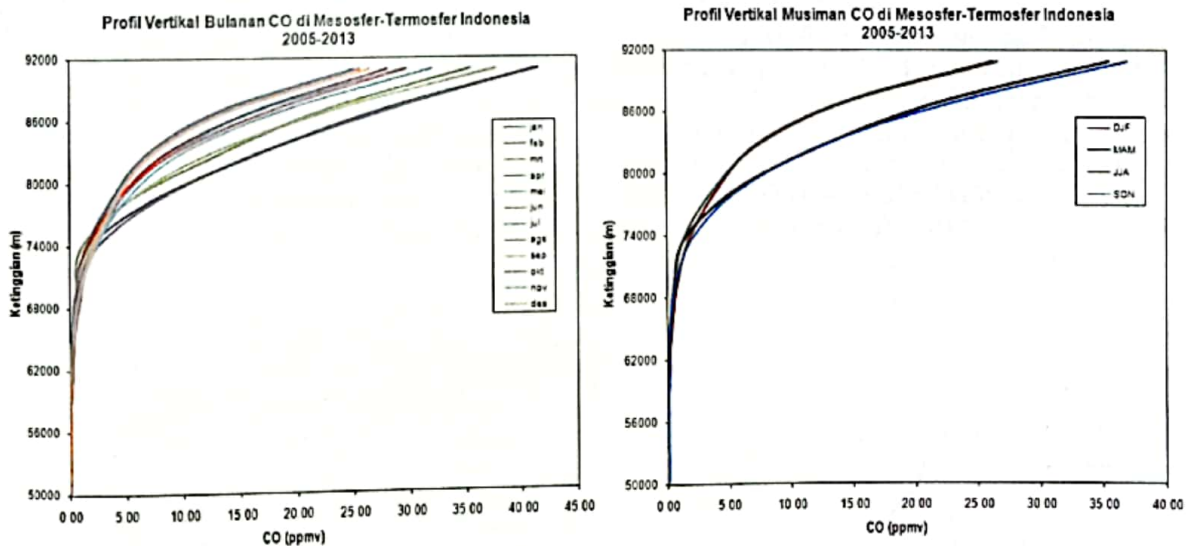
Untuk melihat pengaruh dari radiasi matahari pada variasi konsentrasi CO di lapisan mesosfer-termosfer, dilakukan perbandingan analisis time series (variasi bulanan dan tahunan), plot pada bulan Desember dan Juli pada ketinggian 83 km (mesosfer atas) dan 91 km (termosfer bawah), serta korelasi CO dengan TSI.

4. Pembahasan

Profil vertikal bulanan dan musiman CO di mesosfer-termosfer Indonesia ditunjukkan pada Gambar 4-1 yang menunjukkan konsentrasi CO sangat rendah di mesosfer bawah kemudian meningkat di mesosfer atas dan mencapai maksimum di termosfer dengan konsentrasi mencapai 40 ppmv untuk variasi bulanan dan 35 ppmv untuk variasi musiman. Variasi musiman CO menunjukkan konsentrasi maksimum pada bulan SON (September-Oktober-November) saat terjadi peralihan musim dari musim kemarau ke musim hujan di Indonesia dan pada bulan

MAM (Maret-April-Mei) saat peralihan musim hujan ke musim kemarau. Hal ini kemungkinan disebabkan pada sekitar bulan September-Oktober dan Maret-April, posisi matahari dekat dengan ekuator yang mengakibatkan intensitas radiasi matahari sangat tinggi sehingga reaksi fotolisis CO₂ menjadi CO berjalan sangat cepat yang mengakibatkan peningkatan konsentrasi CO di bulan-bulan tersebut (Funke et al., 2009).

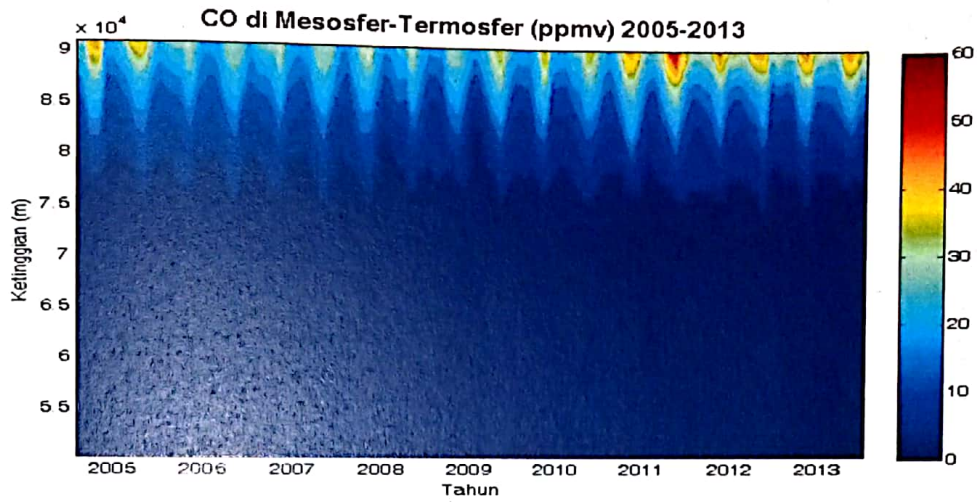
Profil vertikal CO dalam bentuk time series rata-rata bulan terhadap ketinggian ditunjukkan pada Gambar 4-2 yang menunjukkan dengan lebih jelas konsentrasi CO rendah di mesosfer dari ketinggian 50 km hingga 75 km kemudian menunjukkan peningkatan di mesosfer atas mulai dari ketinggian 80 km hingga ke termosfer pada ketinggian 91 km dengan konsentrasi mencapai 60 ppmv. Variasi tahunan CO pada mesosfer atas dan termosfer juga lebih jelas terlihat dengan peningkatan konsentrasi terjadi pada tahun 2011 hingga 2013. Peningkatan ini kemungkinan berkaitan dengan siklus 11 tahunan matahari yang dimulai kembali pada tahun 2011 (Horn, 2015).



Gambar 4-1. Profil vertikal CO bulanan dan musiman di mesosfer-termosfer di Indonesia tahun 2005-2013.

Pola variasi tahunan CO di mesosfer atas (83 km) dan termosfer bawah (91 km) ditunjukkan pada Gambar 4-3. Terdapat dua puncak maksimum konsentrasi CO di mesosfer dan termosfer yaitu pada bulan Maret-April

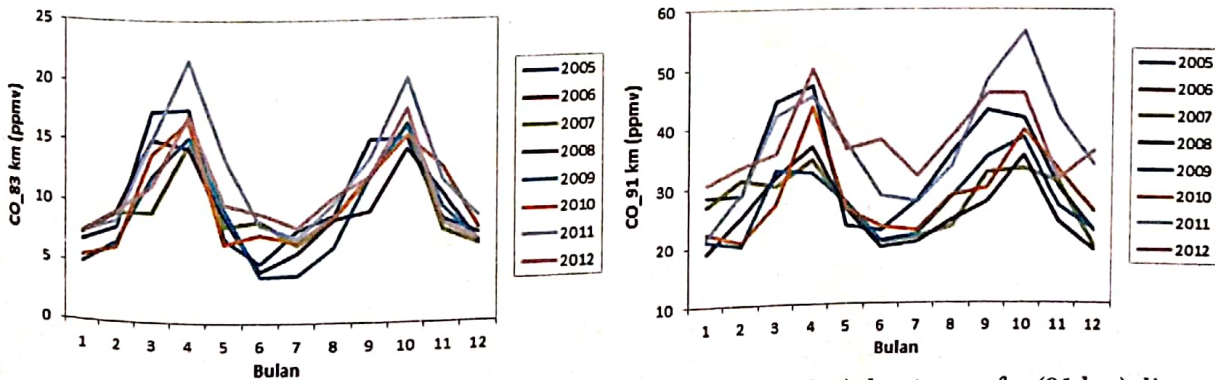
dan September-Oktober dan satu kondisi minimum yaitu pada bulan Juni-Juli. Seperti yang telah diulas sebelumnya bahwa puncak maksimum CO ini dipengaruhi oleh posisi dan intensitas matahari.



Gambar 4-2. Time series rata-rata bulanan konsentrasi CO terhadap ketinggian di mesosfer- termosfer di Indonesia tahun 2005-2013

Perbedaan rentang nilai konsentrasi CO di mesosfer dan termosfer yaitu antara 5-22 ppmv dan 20-55 ppmv. Konsentrasi CO sangat tinggi di termosfer karena sumber CO di mesosfer dan termosfer adalah dari reaksi fotolisis CO₂ yang dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari. Reaksi fotolisis CO₂ berjalan sangat efektif di

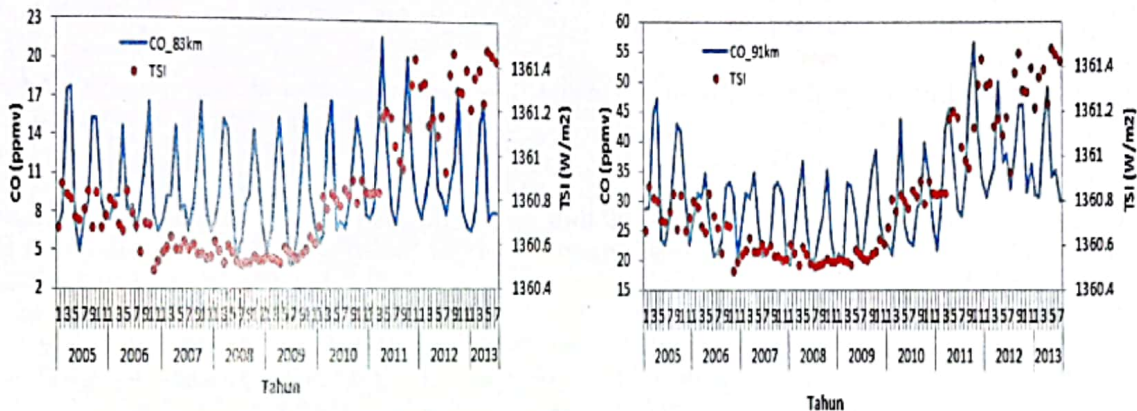
atmosfer atas (mesosfer-termosfer) juga minimalnya pengaruh dari perusakan oleh radikal OH dan waktu hidup CO di atmosfer atas yang lebih panjang dibandingkan di atmosfer bawah semakin meningkatkan konsentrasi CO (Lee et al., 2013; Velazco et al., 2007; Minschwaneer et al., 2010).



Gambar 4-3. Variasi tahunan konsentrasi CO di mesosfer atas (83 km) dan termosfer (91 km) di Indonesia tahun 2005-2012.

Pengaruh dari radiasi matahari terhadap variabilitas CO di mesosfer dan termosfer yang digambarkan dengan perbandingan variasi bulanan CO dengan nilai TSI ditunjukkan pada Gambar 4-4. Variasi bulanan CO di mesosfer atas (83 km) dan termosfer bawah (91 km) menunjukkan pola yang sejalan dengan variasi bulanan TSI. Terlihat nilai TSI menunjukkan penurunan dari tahun 2005 hingga tahun 2010 dengan nilai Antara 1360,4 hingga 1360,8 W/m² kembali meningkat pada tahun 2011 hingga 2013 dengan nilai TSI mencapai 1361,4. Variasi CO

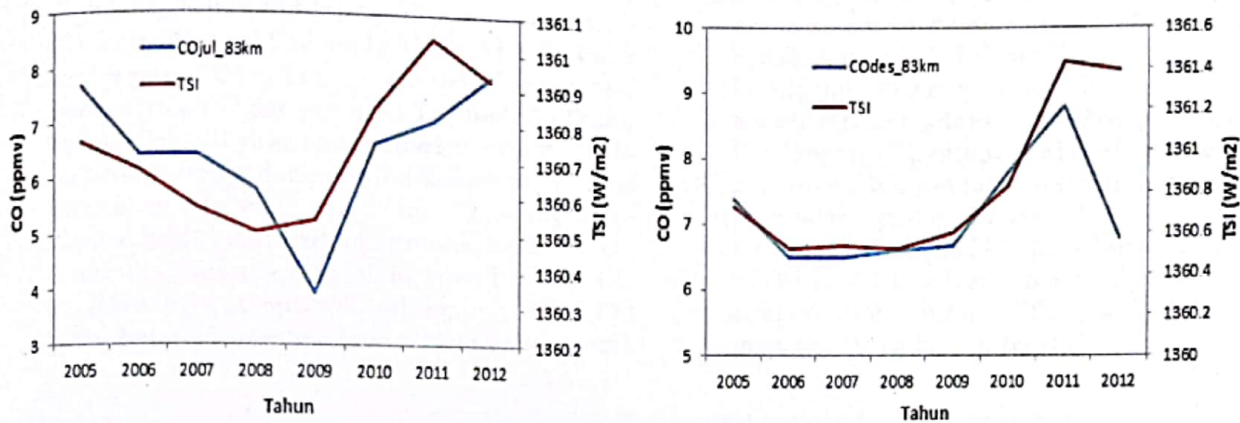
menunjukkan pola yang lebih mirip dengan TSI pada ketinggian di termosfer atas (91 km). Seperti yang sudah diulas sebelumnya, peningkatan nilai TSI di tahun 2011 berkaitan dengan dimulainya kembali siklus 11 tahunan matahari. Dengan meningkatnya radiasi matahari yang digambarkan dengan nilai TSI menyebabkan lebih banyak CO yang terbentuk dari reaksi fotolisis CO₂, akibatnya konsentrasi CO meningkat.



Gambar 4-4. Perbandingan rata-rata bulanan konsentrasi CO terhadap nilai TSI di mesosfer atas (83 km) dan di termosfer (91 km) di Indonesia tahun 2005-2013.

Perbandingan konsentrasi CO dan TSI pada bulan Juli saat terjadi musim dingin di belahan Bumi Utara atau musim kemarau di Indonesia dan pada bulan Desember saat terjadi musim dingin di belahan Bumi Selatan atau musim hujan di Indonesia di mesosfer (83 km) ditunjukkan pada Gambar 4-5. Variasi tahunan CO bulan Juli 2005-2012 dan CO bulan Desember 2005-2012 menunjukkan adanya pola yang sejalan dengan variasi TSI pada bulan yang

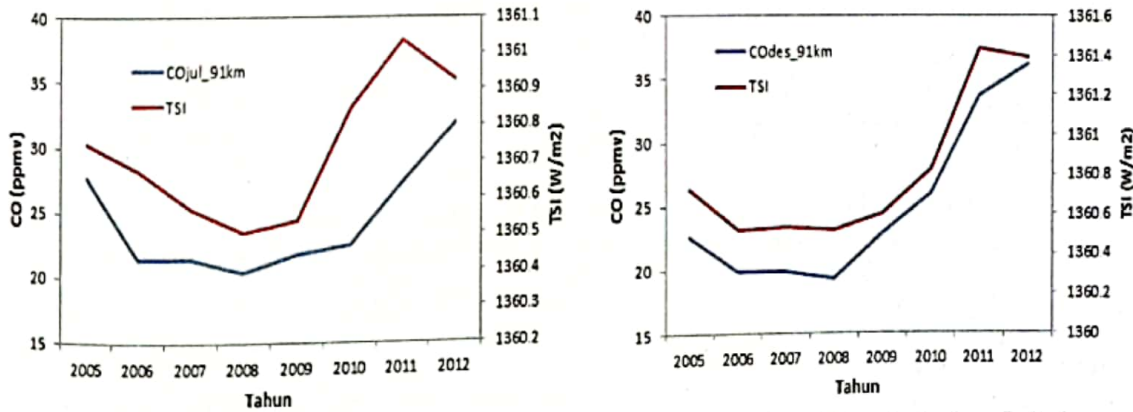
sama. Pada bulan Juli terjadi penurunan konsentrasi CO di tahun 2009 yang juga ditunjukkan dengan penurunan TSI di bulan Juli untuk tahun yang sama. Kesamaan pola juga ditunjukkan pada variasi CO mesosfer di bulan Desember dengan nilai TSI. Rentang konsentrasi CO mesosfer di bulan Desember lebih tinggi yaitu mencapai 9 ppmv dibandingkan konsentrasi CO di bulan Juli sebesar 8 ppmv.



Gambar 4-5. Perbandingan rata-rata konsentrasi CO terhadap nilai TSI pada bulan Juli dan Desember 2005-2012 di mesosfer atas (83 km) di Indonesia.

Variasi CO dan TSI di termosfer bawah (91 km) pada bulan Juli dan Desember tahun 2005-2012 ditunjukkan pada Gambar 4-6. Pola yang sama ditunjukkan antara variasi CO termosfer dengan variasi TSI di bulan Juli dan Desember dengan sedikit perbedaan pola yang terjadi pada bulan Juli tahun 2011. Peningkatan nilai TSI terjadi pada Juli 2011 kemudian menurun kembali, tetapi tidak demikian dengan konsentrasi CO yang terus meningkat hingga

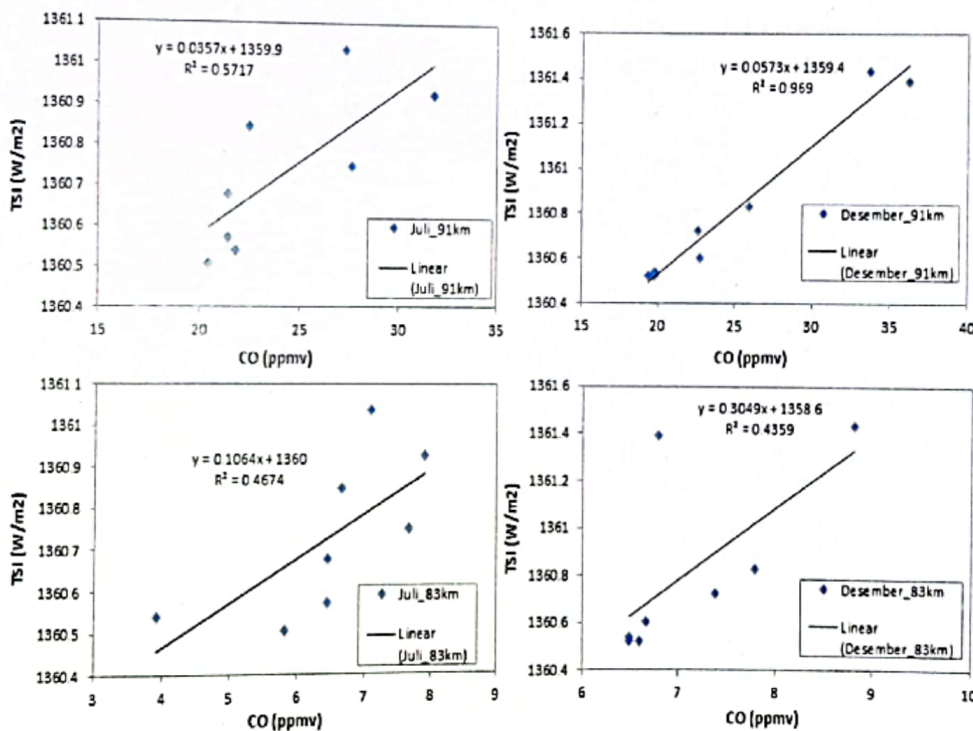
Juli 2012. Sama halnya dengan variasi CO pada bulan Desember 2012 yang meningkat tidak sejalan dengan menurunnya nilai TSI pada saat yang sama. Faktor lain yang menjadi penyebab perbedaan ini terjadi kemungkinan dari proses dinamika atmosfer tetapi untuk memastikan kemungkinan tersebut masih diperlukan penelitian lebih lanjut.



Gambar 4-6. Perbandingan rata-rata konsentrasi CO terhadap nilai TSI pada bulan Juli dan Desember 2005-2012 di termosfer (91 km) di Indonesia.

Scatter plot Antara konsentrasi CO dengan nilai TSI pada bulan Juli dan Desember di mesosfer atas (83 km) dan termosfer bawah (91 km) ditunjukkan pada Gambar 4-7. Pada ketinggian 91 km atau di termosfer, konsentrasi CO dengan nilai TSI menunjukkan korelasi positif yang sangat baik terutama pada bulan Desember dengan nilai koefisien korelasi mencapai 0,969. Hal ini kemungkinan disebabkan keseluruhan proses baik fisika, dinamika, mau kimia yang melibatkan CO berjalan sangat optimal sehingga variasi CO pada bulan Desember berkorelasi sangat baik

dengan variasi TSI. Begitu juga di bulan Juli, korelasi CO dengan TSI masih cukup baik dengan nilai koefisien korelasi 0,5717. Hal yang berbeda untuk korelasi CO dengan TSI pada ketinggian 83 km atau di mesosfer. Walaupun masih terlihat adanya korelasi positif Antara CO dengan TSI, tetapi nilai koefisien korelasi di mesosfer lebih rendah dibandingkan dengan di termosfer yaitu hanya 0,4359 di bulan Desember dan 0,4674 di bulan Juli. Adanya hubungan koerlasi positif menunjukkan peningkatan nilai TSI sejalan dengan meningkatnya konsentrasi CO.



Gambar 4-7. Scatter plot konsentrasi CO terhadap nilai TSI pada bulan Juli dan Desember 2005-2012 di termosfer (91 km) dan di mesosfer atas (83 km) di Indonesia.

5. Kesimpulan

Variasi CO di mesosfer dan termosfer menunjukkan konsentrasi maksimum CO terjadi di termosfer (91 km) mencapai 55 ppmv. Pengaruh dari radiasi matahari terlihat dari variasi musiman CO yang tinggi di bulan Maret-April-Mei (MAM) dan September-Oktober-November (SON) dan variasi bulanan CO yang meningkat pada bulan Maret-April dan September-Oktober saat posisi matahari dekat dengan ekuator. Pengaruh TSI terhadap konsentrasi CO di mesosfer-termosfer ditunjukkan dengan kesamaan pola time series yang meningkat di tahun 2011-2013 bersamaan dengan siklus 11 tahunan matahari. Kesamaan

pola variasi CO dan TSI di mesosfer dan termosfer di bulan Juli dan Desember tahun 2005-2012 juga menunjukkan adanya pengaruh TSI terhadap konsentrasi CO. Terdapat hubungan korelasi positif antara CO dan TSI di mesosfer dan termosfer dengan koefisien korelasi yang paling kuat terjadi di termosfer di bulan Desember sebesar 0,969. Korelasi positif menunjukkan peningkatan nilai TSI sejalan dengan peningkatan konsentrasi CO.

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 juga kepada penyedia data Total Solar Irradiance (TSI) dari hasil pengukuran satelit SORCE.

Rujukan

- Ahmad, S. P., Waters, J. W., Johnson, J. E., Gerasimov, I. V., Leptoukh, G. G., & Kempfer, S. J. (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 Komala, N. (2010). Karakteristik Profil Vertikal Ozon, CO, Uap Air, dan Temperatur di Bandung dan Watukosek Berbasis Sensor MLS Satelit AURA, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa, ISBN : 978-979-1458-40-5, 163-170.
- Collorado University. (2015). *SORCE : Solar Radiation and Climate Experiment*, <http://lasp.colorado.edu/home/sorcel>. Diunduh tanggal 17 November 2015.
- Horn, B. (2015). *Extraterrestrial Irradiance*, <http://bxhorn.com/extraterrestrial-irradiance/>, diunduh 10 November 2015.
- Clerbaux, C., Coheur, P. F., Hurtsman, D., Barret, B. (2005). Carbon Monoxide Distribution from ACE-FTS Solar Occultation Measurement, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 32, doi:10.1029/2005GL022394.
- Funke, B., Puertas, L. M., Comas, G. M., Stiller, P. G., Clarman, V. T., Hopfner, M. (2009). Carbon Monoxide Distribution from The Upper Troosphere to The Mesosphere Inferred from 4,7 um non-local Thermal Equilibrium Emission Measured by MIPAS on ENVISAT, *Atmos. Chem. Phys*, 9, 2387-2411.
- Lee, J. N., Wu, D. L., dan Ruzmaikin, A. (2013). Interannual Variation of MLS Carbon Monoxide Induced by Solar Cycle, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102, 99-104.
- Minschwanner, 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, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 15, P.1-9.
- Solomon, S., R. R. Garcia, J. J. Olivero, R. M. Bevilacqua, P. R. Schwartz, R. T. Clancy, and D. O. Muhleman. (1985). Photochemistry and transport of carbon monoxide in the middle atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1072-1083.
- Velazco, V., Wood, S. W., Sinnuber, M., Kramer, I., Jones, B. N. (2007). Annual Variation of Strato-Mesospheric Carbon Monoxide Measured by Ground-Based Fourier Transform Infrared Spectrometry, *Atmos. Chem. Phys*, 7, 1305-1312.
- Worden, M. H., Deeter, M. N., Frankenberg, C., George, M., Nichitu, F. (2013). Decadal Record of Satellite Carbon Monoxide Observation, *Atmos. Chem. Phys*, 13, 837-850.