

Pengaruh Fenomena *El Nino Southern Oscillation (ENSO)* Terhadap Peningkatan Ozon Troposferik di Indonesia

Fatimah Dinan Qonitan

Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional Bandung

Email: fdinan@itenas.ac.id

ABSTRAK

Ozon troposferik merupakan polutan sekunder yang bersifat racun bagi manusia. Beberapa penelitian menemukan terjadinya peningkatan konsentrasi ozon di troposfer selama periode El Nino pada tahun 1997/1998 dan 2006 di Indonesia. Studi ini berisi kajian dan sintesis berbagai literatur ilmiah untuk mengetahui aspek-aspek yang mempengaruhi peningkatan konsentrasi ozon troposferik di periode tersebut. Peningkatan ozon rata-rata diketahui dengan membandingkan konsentrasi latar belakang total ozon pada tahun-tahun normal dengan periode El Nino 1997/1998 dan 2006. Peningkatan ozon terutama terjadi di musim kering pada periode El Nino, ketika terjadi penurunan tingkat presipitasi yang signifikan dan kebakaran hutan besar di Indonesia. Pada El-Nino 1997/1998 terjadi anomali positif konsentrasi ozon troposferik sebesar 10-20 DU, sedangkan pada El-Nino 2006 sebesar 10-15 DU. Peristiwa kebakaran hutan ini mengemisikan prekursor pembentuk ozon (O_3) dalam jumlah besar, diantaranya adalah karbon monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x).

Kata kunci: El Nino, ENSO, Indonesia, Kebakaran, Tropospheric Ozone

ABSTRACT

Tropospheric ozone is a secondary pollutant that is toxic to humans. Several studies have found an increase in ozone concentration in the troposphere during periods of 1997/1998 and 2006 El Nino in Indonesia. This study intends to review and synthesize earlier research to determine important aspects affecting increase of tropospheric ozone concentration during those period. Average tropospheric ozone increase was estimated by subtracting the background concentration of total ozone during the normal years on 1997/1998 and 2006 El Nino periods. Significant increase tropospheric ozone mostly occurred in the dry season during the El Nino periods when the precipitation decreased significantly and extensive forest fire occurred frequently in Indonesia. During the 1997/1998 El-Nino, there is positive anomaly of tropospheric ozone by 10-20 DU, and 10-15 DU in 2006 El Nino. Forest fires event emit large numbers of ozone (O_3)-forming precursors, such as carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x).

Keywords: El Nino, ENSO, Forest Fire, Indonesia, Tropospheric Ozone

1. PENDAHULUAN

El Nino Southern Oscillation (ENSO) adalah mode gabungan lautan-atmosfer dari variabilitas tahunan yang terjadi sistem bumi (Nassar *et al.*, 2009). Selama fase positif ENSO, yaitu El Nino, suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperatures*, SST) pada Samudera Pasifik di daerah ekuator lebih tinggi daripada kondisi normal. Sedangkan pada fase negatif ENSO, yaitu La Nina terjadi penurunan SST dibandingkan dengan kondisi normal (Nassar *et al.*, 2009). Pada periode El Nino, proses dinamis yang terjadi merupakan kebalikan daripada yang terjadi pada periode La-Nina (Chandra *et al.*, 2009).

El Nino memiliki pengaruh kuat umumnya pada daerah pesisir pantai dan area tropis pada Pasifik Barat. Di daerah Pasifik Barat, terjadi penurunan curah hujan dan kelembaban selama periode El Nino (Sudo dan Takahashi, 2001). Efek paling parah dari peristiwa ini dialami di Indonesia, yang dapat menyebabkan perubahan besar pada komposisi kimia atmosfer (Nassar *et al.*, 2009). Tercatat dua periode El Nino yang dibarengi dengan peristiwa kebakaran hutan besar di Indonesia, yaitu pada 1997/1998 El Nino (Fujiwara *et al.*, 1999; Chan *et al.*, 2001; Chandra *et al.*, 2002) dan 2006 El Nino (Nassar *et al.*, 2009; Chandra *et al.*, 2009; Kita *et al.*, 2009).

Di wilayah hutan tropis Kalimantan, Indonesia, pembakaran *peatland* seringkali dilakukan menjelang masa tanam untuk pembukaan lahan pertanian. Kekeringan selama periode El Nino ini menyebabkan kegiatan pembukaan lahan tersebut berbuah pada kebakaran besar-besaran di hutan-hutan tropis Indonesia selama Agustus-Oktober 1997 dan Oktober-November 2006. Beberapa studi yang mempelajari keterkaitan peristiwa ini dengan peningkatan ozon troposferik menyimpulkan bahwa, peristiwa kebakaran berperan dalam mengemisikan prekursor-prekursor O₃ yang menyebabkan produksi ozon secara fotokimia di troposfer (Fujiwara *et al.*, 1998).

Pada studi ini, akan dibahas mengenai peran prekursor pada reaksi fotokimia produksi Ozon troposferik dengan cara mensintesis berbagai hasil penelitian terkait tema ini. Peristiwa kebakaran hutan pada periode El Nino ini menyediakan kesempatan yang baik untuk mempelajari peran prekursor dalam mekanisme reaksi pembentukan Ozon troposferik, yang merupakan polutan bersifat toksik bagi manusia.

Selain itu, diketahui bahwa perubahan dinamika atmosfer pada periode El Nino juga berpengaruh pada peningkatan konsentrasi ozon troposferik (Chandra *et al.*, 1998). Beberapa penelitian terdahulu menyebutkan bahwa peristiwa El Nino dan La-Nina ini merupakan sumber utama dari variabilitas tahunan dan dekadal dari ozon troposferik (Ziemke *et al.*, 2003). Studi-studi pemodelan dan pemantauan kimia troposfer berkaitan dengan ENSO, yaitu Hauglustaine *et al.*, 1999; Sudo dan Takahashi, 2001; Chandra *et al.*, 2002 menyimpulkan peningkatan ozon troposferik pada periode El Nino dipengaruhi oleh kombinasi kebakaran hutan dan dinamika troposfer (Nassar *et al.*, 2009). Oleh karena itu, studi ini juga akan membahas mengenai pengaruh dinamika atmosfer seperti *downward motion*, *surpressed convection*, dan *kekeringan*. Periode El Nino 1997/1998 dan 2006 merupakan periode ENSO terkuat pada abadnya yang berlangsung bersamaan dengan fase positif *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan memiliki skala dampak yang besar, sehingga sangat baik untuk digunakan mempelajari hubungan konsentrasi ozon troposferik dengan variabilitas kondisi atmosfer.

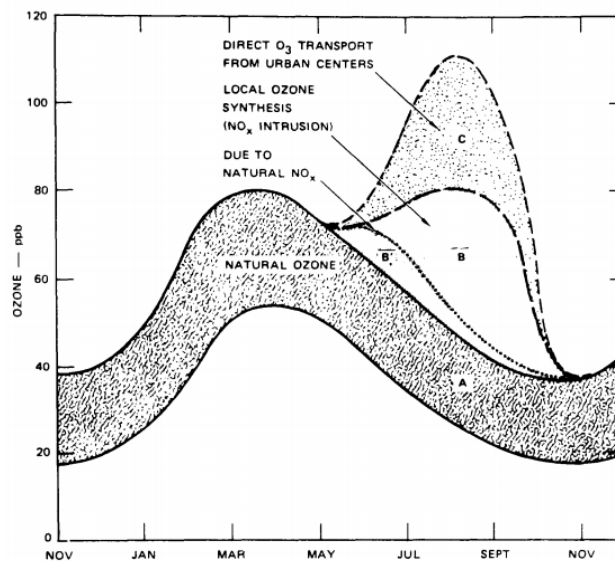
2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam studi ini adalah studi literatur terhadap beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan tema “Pengaruh ENSO terhadap Peningkatan Ozon Troposferik di Indonesia.” Pada studi ini dilakukan *narrative review* dan sintesis terhadap hasil-hasil penelitian dari berbagai jenis sumber literatur, diantaranya adalah buku, jurnal ilmiah, publikasi, dan artikel ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Ozon Troposferik

Secara alamiah, troposfer yang bersih memiliki kandungan latar belakang Ozon sebesar 20 – 80 ppb (Seinfeld, 1986). Skema ideal variasi ozon bulanan pada lokasi terpencil (udara bersih) tercantum pada Gambar 3.1. Variabilitas natural ini dipengaruhi oleh proses kimia di troposfer dan transport ozon dari stratosfer ke troposfer. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.1, dapat terjadi penambahan konsentrasi ozon dari kondisi naturalnya, yaitu berasal dari sintesis ozon melalui proses kimia yang menyerupai smog fotokimia dan dari transport ozon langsung dari daerah urban (Seinfeld, 1986).



Gambar 1. Skema ideal variasi ozon pada lokasi terpencil
(Sumber: Singh *et al.*, 1978 dalam Ludwig & Martinez, 1979)

Di troposfer, ozon memegang peran penting dalam mengontrol komposisi kimia dan kualitas udara. Reaksi kimia fotolisis ozon pada 300 nm terjadi seperti Reaksi (1) yang diikuti dengan reaksi singlet tereksitasi ($O(^1D)$) dengan air pada Reaksi (2) membentuk 2 hidroksil radikal (Seinfeld, 1988; Logan, 1985).



Hidroksil radikal yang diproduksi tersebut berperan penting dalam reaksi *sink* berbagai spesi di atmosfer, yaitu CO, CH₄, NO₂, dan Halokarbon (Logan, 1985).

3.2 Kimia O₃, NO_x, dan CO di Troposfer

Ozon merupakan polutan udara sekunder yang penting, karena memiliki dampak pada iklim dan kesehatan. Peristiwa kematian dalam jangka pendek, iritasi paru-paru, bronkitis, emfisema, dan asma telah ditemukan berkaitan dengan paparan terhadap ozon dalam konsentrasi tinggi (Jaffe & Widger, 2012).

Ozon terbentuk (*source*) dari interaksi Nitrogen Oksida (NO_x = NO + NO₂) dan Non-methane organics carbons (NMOCs) dalam kondisi terdapat sinar matahari (Jaffe & Widger, 2012). Pada kondisi terdapat matahari, NO₂ akan terfotolisis menjadi NO pada Reaksi (2). Kemudian, ozon tereksitasi O(³P) mengalami Reaksi (3) yaitu pemadaman (*quenching*) dengan spesi inert M, yang dapat berupa O₂, N₂, atau H₂O (Logan, 1985). Setelah terbentuk, O₃ bereaksi dengan NO untuk menghasilkan NO₂ pada Reaksi (4).

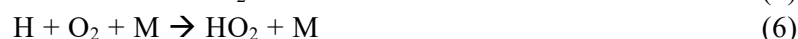


Ozon terbentuk (*source*) melalui Reaksi (2), (3) dan disisihkan (*sink*) melalui fotolisis pada Reaksi (1') dan reaksi dengan NO pada (4). Ozon yang disihkan pada (4) akan terbentuk kembali melalui Reaksi (2) yang diikuti dengan Reaksi (3).



Karena reaksi yang bersifat siklik ini, maka perlu didefinisikan spesi-spesi yang berperan dalam proses *source/sink* ozon dapat dikelompokkan dalam kelompok odd oxygen – yaitu O₃, O(¹D), O(³P), dan NO₂. Konsentrasi O₃ di troposfer tidak hanya dicapai melalui mekanisme reaksi (1)-(4) saja, tetapi terjadi pula melalui reaksi dengan spesi mengandung karbon (Seinfeld, 1988).

Spesi mengandung karbon yang paling sederhana adalah CO, yang juga diemisikan dari pembakaran biomassa (Seinfeld, 1988). Hidroksil radikal yang dihasilkan dari fotolisis ozon pada Reaksi (2) akan bereaksi dengan CO di troposfer (5). Atom hidrogen pada (5) akan bereaksi dengan cepat dengan O₂ untuk membentuk hidroperoksil radikal HO₂ (6). Reaksi dengan CO ini dapat dipersingkat dalam persamaan Reaksi (7).



Pembahasan di atas telah menjelaskan mengenai mekanisme *sink/source* O₃ di troposfer. Selain itu, reaksi di atas juga menjelaskan bahwa CO dan NO_x merupakan prekursor yang berperan penting dalam mekanisme tersebut.

3.3 Kebakaran Hutan pada Periode El Nino 1997/1998 dan 2006

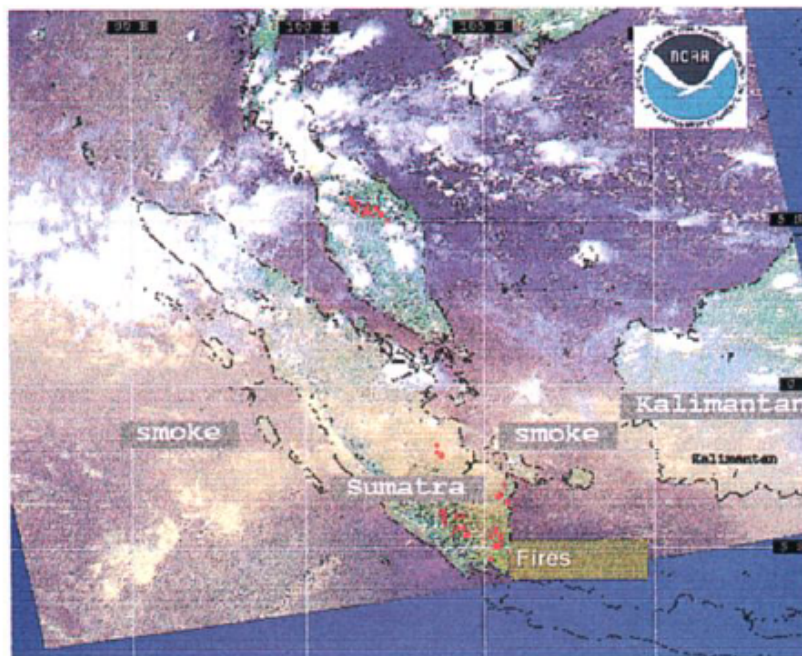
Suatu periode El Nino ditandai dengan terjadinya kenaikan suhu permukaan laut (SST). Kejadian ini disertai dengan perubahan pada arus laut dan angin permukaan, yang menyebabkan penurunan konveksi atmosfer dan kelembaban di Indonesia (Ekuator) dan Pasifik Timur dan penurunan di Pasifik Barat (Nassar *et al.*, 2009). Di wilayah hutan tropis Kalimantan, Indonesia, pembakaran *peatland*

seringkali dilakukan menjelang masa tanam untuk pembukaan lahan pertanian. Penurunan konveksi pada periode El Nino menyebabkan perubahan pada tingkat presipitasi, yang berujung pada bencana kekeringan di daerah ekuator dan Pasifik Timur. Kekeringan ini menyebabkan distribusi pembakaran biomassa, dan laju keterbakaran biomassa menjadi lebih tinggi dari kondisi normal (Nassar *et al.*, 2009), sehingga kegiatan pembukaan lahan tersebut berbuah pada kebakaran besar-besaran di hutan-hutan tropis Indonesia selama Agustus-Desember 1997 (Fujiwara *et al.*, 1999) dan Oktober-November 2006 (Chandra *et al.*, 2009). Sejak tahun 1997, tahun 2006 adalah pertama kalinya periode El Nino berlangsung bersamaan dengan fase positif *Indian Ocean Dipole* (IOD). Fase positif IOD ini menguatkan dampak El Nino (Nassar *et al.*, 2009).

Periode El Nino 1997/1998 termasuk pada kategori sangat kuat (Chandra *et al.*, 2009). Pada periode ini terjadi kekeringan yang berdampak pada kebakaran besar di hutan-hutan tropis Sumatra dan Kalimantan seluas 45,600 km² (Chandra *et al.*, 2001). Sebuah studi oleh Chan *et al.* (2001) menemukan bahwa terjadi 2600 kebakaran pada 7-14 Oktober 1997, dan lebih dari 700 kebakaran dari 25 November-1 Desember 1997. Walaupun api aktif ditemukan di Sumatera dan Kalimantan, titik panas (*hot spots*) juga ditemukan di Malaysia peninsula dan wilayah Indo-China pada sub benua Asia Tenggara. Asap tersbar di hampir seluruh Asia Tenggara, hingga Cina selatan (Chan *et al.*, 2001).

Fenomena El Nino 2006 termasuk pada kategori *moderate* (Nassar *et al.*, 2009), namun fenomena ini tetap menyebabkan kekeringan mulai pertengahan-September hingga pertengahan-November, yang menyebabkan kebakaran hutan di selatan Kalimantan. Pada pertengahan-November, kebakaran berkurang cepat karena turunnya hujan dengan intensitas tinggi (Nassar *et al.*, 2009).

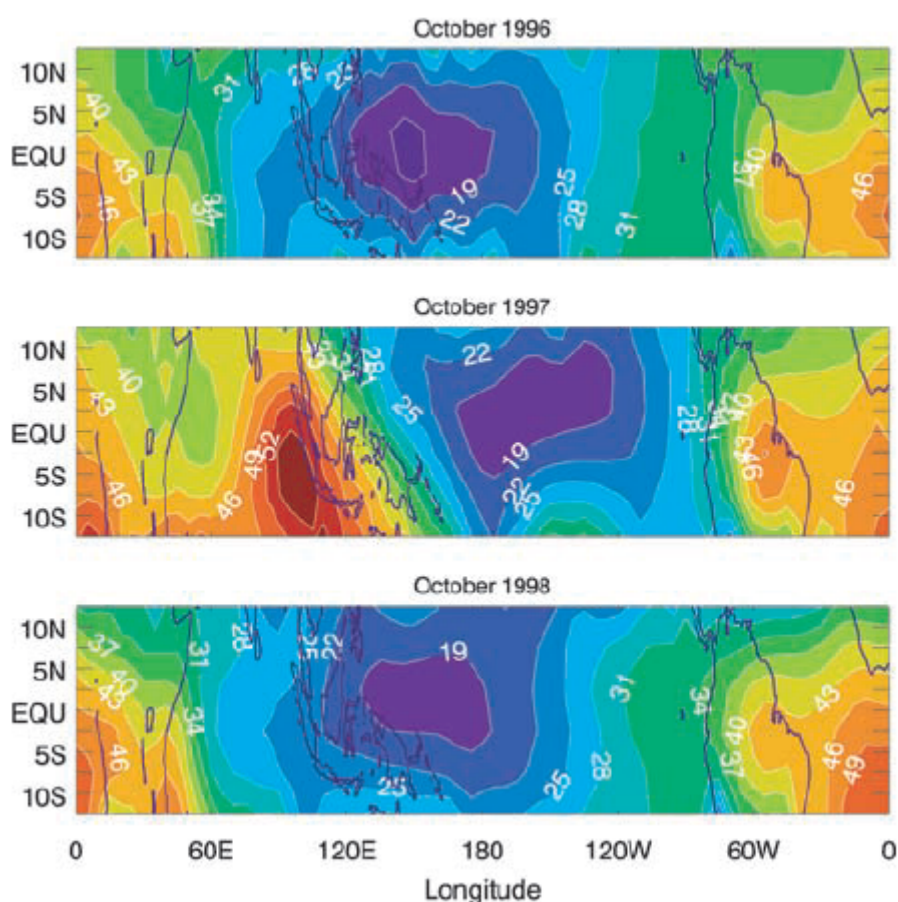
Sebagai contoh, Gambar 3.2 menunjukkan titik-titik kebakaran yang terpantau oleh NOAA pada 14 Oktober 1997, tercatat 1400 kebakaran terjadi pada hari tersebut.



Gambar 2. Lokasi kebakaran pada 14 Oktober 1997. Titik merah menunjukkan lokasi kebakaran, warna kuning menunjukkan persebaran asap, warna putih adalah awan.
(Sumber : NOAA, 1997 dalam Chan *et al.*, 2001)

3.4 Peningkatan Konsentrasi Ozon Troposferik di Indonesia pada Periode El Nino 1997/1998 dan 2006

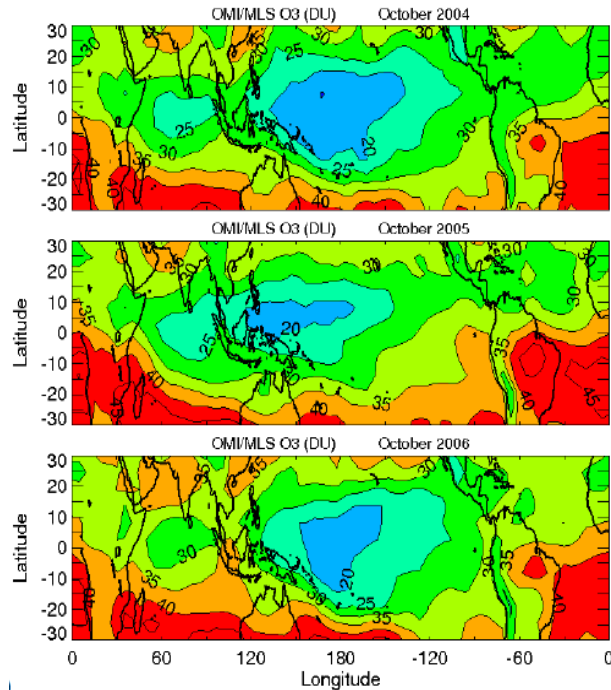
Berbagai studi telah menemukan terjadinya anomali kadar ozon di troposfer pada periode El Nino. Pada daerah Pasifik Timur dan Ekuator, termasuk Indonesia, terjadi peningkatan O_3 troposferik selama periode El Nino, begitu pula pada El Nino 1997/1998 dan 2006. Pada El Nino 1997/1998, anomali positif pada *tropospheric column ozone* (TCO) sebesar 10-20 Dobson Unit (DU; 1 DU = 2.69×10^{20} molekul/m²) terukur pada wilayah tropis Pasifik Timur dan Indonesia dengan metode *Ozone soundings* (Fujiwara *et al.*, 1999) dan metode berbasis satelit (Ziemke and Chandra, 1999) dimana anomali pada Pasifik Timur adalah negatif 4-8 DU dibandingkan dengan periode ENSO sebelumnya. Gambar 3.3 menunjukkan perubahan konsentrasi ozon di troposfer pada tahun normal (1996), El Nino sangat kuat (1997), dan El Nino kuat (1998). Konsentrasi ozon troposferik di wilayah Indonesia pada tahun 1997 secara signifikan lebih tinggi daripada tahun sebelumnya dan sesudahnya (Chandra *et al.*, 2001).



Gambar 3. *Tropospheric column ozone* yang diukur dari TOMS CCD pada Oktober 1996 (panel atas), Oktober 1997 (panel tengah), and Oktober 1998 (panel bawah).

Sumber : Chandra *et al.*, 2001

Sedangkan, Gambar 4 menunjukkan perubahan konsentrasi ozon di troposfer yang diukur dari OMI/MLS pada periode El Nino 2006. Peningkatan *mixing ratio* O_3 lebih besar pada Oktober 2006, dibandingkan dengan tahun sebelum dan sesudahnya (Chandra *et al.*, 2009).



Gambar 4. Tropospheric column ozone yang diukur dari OMI/MLS pada Oktober 2004 (panel atas), Oktober 2005 (panel tengah), and Oktober 2006 (panel bawah).

Sumber : Chandra *et al.*, 2009

Peningkatan ozon troposferik pada periode El Nino ini dipengaruhi oleh kombinasi kebakaran hutan dan dinamika troposfer (Nassar *et al.*, 2009). Berikut akan dijelaskan mengenai pengaruh masing-masing faktor tersebut.

Pengaruh Kebakaran Hutan

Logan *et al* (2008) mempelajari efek El Nino 2006 terhadap profil troposfer dari CO, O₃, and H₂O dari *Tropospheric Emission Spectrometer* (TES) yang dipasang pada satelit Aura. Hasil studi tersebut dapat diamati pada Tabel 1, yaitu terdapat anomali pada Tropospheric Column Ozone (TCO) di wilayah Indonesia pada periode El Nino 2006.

Tabel 1. Emisi CO dan NO pada tahun 2006 dalam satuan terragram (Tg; 1 Tg=10¹² g)

| | CO (Tg) | | | NO (Tg) | | |
|------------|------------------------|--------------------|-------|------------------------|--------------------|-------|
| | Indonesia ¹ | Dunia ² | % | Indonesia ¹ | Dunia ² | % |
| Juli | 5.9 | 92 | 6.4% | 0.10 | 7.3 | 1.4% |
| Agustus | 16.6 | 103 | 16.1% | 0.29 | 7.4 | 3.9% |
| September* | 18.3 | 99 | 18.5% | 0.32 | 6.8 | 4.7% |
| Oktober* | 44.2 | 73 | 60.5% | 0.76 | 6.3 | 12.1% |
| November* | 6.3 | 79 | 8.0% | 0.11 | 6.3 | 1.7% |
| Desember | 0.2 | 103 | 0.2% | 0.00 | 6.1 | 0.0% |

Sumber: Logan *et al.*, 2008 dalam Chandra *et al.*, 2009

¹Emisi dari pembakaran biomassa (kebakaran hutan) saja.

²Emisi dari seluruh sumber, termasuk bahan bakar fosil, biofuel, dan biomass burning, kecuali biomass burning dari Indonesia

*Periode El Nino 2006

Tabel 1 menunjukkan bahwa peristiwa kebakaran hutan di Indonesia telah meningkatkan emisi CO sebanyak 18.3 Tg pada September 2006, 44.2 Tg pada Oktober 2006, dan 6.3 Tg pada November 2006, atau sebanyak total 69 Tg selama September-November 2006, yang merupakan 27% dari total emisi CO global. Sedangkan peningkatan emisi NO adalah sebanyak 0.32 Tg pada September 2006, 0.76 Tg pada Oktober 2006, dan 0.11 Tg pada November 2006, atau sebanyak total 1.19 Tg, yang merupakan 6.13% dari total emisi NO global. CO dan NO merupakan prekursor ozon, sehingga emisi CO dan NO besar-besaran dari peristiwa kebakaran ini berperan pada peningkatan konsentrasi ozon di troposfer secara global. Dapat diamati pada Tabel tersebut bahwa pada Oktober 2006, kontribusi emisi CO dan NO dari peristiwa kebakaran hutan di Indonesia terhadap konsentrasi CO dan NO global mencapai 60.5% dan 12.1%. CO dan NO sebagai prekursor ozon berperan pada mekanisme reaksi produksi ozon secara fotokimia.

Pengaruh kebakaran hutan di Indonesia selama El Nino 1997/1998 sudah dipelajari dengan GEOS-CHEM global model of chemistry and transport (Chandra *et al.*, 2002). Penelitian tersebut menyebutkan bahwa peningkatan TCO di Indonesia setengahnya disebabkan oleh kebakaran hutan, sedangkan setengah lainnya oleh dinamika atmosfer.

Peristiwa El Nino 2006 adalah peristiwa yang signifikan lebih lemah daripada El Nino 1997/1998. Anomali TCO berdasarkan alat ukur TES pada November 2006 adalah 11.1 DU, sedangkan hasil pengamatan dari alat ukur TOMS pada November 1997 menunjukkan anomali 14.4 DU (Chandra *et al.*, 2009). Logan *et al.* (2008) menyebutkan penyebab sebagian besar perubahan ini adalah perbedaan pada emisi CO dari kebakaran hutan di Indonesia, yaitu pada tahun 1997 sebesar 193 Tg dan 2006 sebesar 82 Tg.

Pengaruh Dinamika Troposfer

Sudo dan Takahashi (2001) mempelajari dampak meteorologis pada 1997/1998 El Nino pada distribusi ozon troposferik dengan mengabaikan pengaruh kebakaran hutan menggunakan suatu model kimia global, yaitu CHASER (*Chemical AGCM for Study of Atmospheric Environment and Radiative Forcing*). Faktor utama yang mempengaruhi perubahan konsentrasi ozon berdasarkan model tersebut adalah *downward/upward motions*, penurunan/peningkatan konveksi, dan perubahan uap air (H₂O). Pada periode El Nino, terjadi penurunan konveksi, downward motion, dan kekeringan (penurunan uap air) yang menyebabkan peningkatan konsentrasi O₃ di troposfer (Sudo dan Takahashi, 2001). Kondisi penurunan uap air ini juga mempengaruhi waktu tinggal prekursor ozon seperti NO_x (NO + NO₂) dan CO. Pada ketinggian < 8 km, peningkatan NO_x diakibatkan oleh perubahan efisiensi deposisi basah (*wet deposition*) HNO₃ karena perubahan laju presipitasi, dan penurunan penyisihan NO_x dengan hidroksil radikal (OH) karena penurunan kadar O₂ (Sudo dan Takahashi, 2001).

4. KESIMPULAN

Pada Periode El Nino 1997/1998 dan 2006, terjadi peningkatan konsentrasi ozon troposferik, misalnya pada bulan November, yaitu sebesar 14.4 DU pada November 1997 dan 11.1 DU pada November 2006. Fenomena El Nino menyebabkan kekeringan yang berkaitan dengan terjadinya kebakaran hutan besar di hutan-hutan tropis Indonesia pada Agustus-Desember 1997 dan Oktober-November 2006. Peningkatan ozon troposferik pada periode El Nino ini dipengaruhi oleh kombinasi kebakaran hutan dan dinamika troposfer. Kebakaran hutan berperan dalam mengemisikan prekursor ozon ke troposfer, yaitu CO dan NO_x. Emisi CO meningkat sebanyak 69 Tg selama September-November 2006, sedangkan peningkatan emisi NO adalah sebesar 1.19 Tg pada periode yang sama. Dinamika troposfer

yang berubah saat Periode El Nino menyebabkan peningkatan konsentrasi ozon di troposfer, diantaranya adalah *surpressed convection*, *downward motion*, dan penurunan kadar H₂O (kekeringan).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chan, C. Y., Chan, L. Y., Zheng, Y. G., Harris, J. M., Oltmans, S. J., & Christopher, S. (2001). Effects *pheric Chemistry and Physics*, 9(13), 4239-4249.
- [2] Chandra, S., Ziemke, J. R., Bhartia, P. K., & Martin, R. V. (2002). Tropical tropospheric ozone: Implications for dynamics and biomass burning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 107(D14), ACH-3.
- [3] Fujiwara, M., Kita, K., Kawakami, S., Ogawa, T., Komala, N., Saraspriya, S., & Suropto, A. (1999). Tropospheric ozone enhancements during the Indonesian forest fire events in 1994 and in 1997 as revealed by ground-based observations. *Geophysical Research Letters*, 26(16), 2417-2420.
- [4] Jaffe, Nicole L. Wigder. (2012). "Ozone production from wildfires: A critical review." *Atmospheric Environment*, 51, 1-10.
- [5] Kita, K., Fujiwara, M., & Kawakami, S. (2000). Total ozone increase associated with forest fires over the Indonesian region and its relation to the El Nino-Southern oscillation. *Atmospheric Environment*, 34(17), 2681-2690.
- [6] Logan, Jennifer A. (1985). "Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) 90.D6, 10463-10482.
- [7] Ludwig, F. L., and E. L. Martinez. (1979). Assessment of Vertical Distributions of Photochemical Pollutants and Meteorological Variables in the Vicinity of Urban Areas. US Environmental Protection Agency, Office of Air, Noise and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards, 1979.
- [8] Nassar, R., Logan, J. A., Megretskaia, I. A., Murray, L. T., Zhang, L., & Jones, D. (2009). Analysis of tropical tropospheric ozone, carbon monoxide, and water vapor during the 2006 El Niño using TES observations and the GEOS-Chem model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 114(D17).
- [9] Seinfeld, John H. (1986). "Atmospheric chemistry and physics of air pollution."
- [10] Sudo, Kengo, and Masaaki Takahashi. (2001). "Simulation of tropospheric ozone changes during 1997–1998 El Nino: Meteorological impact on tropospheric photochemistry." *Geophysical research letters*, 28, 21, 4091-4094.
- [11] Ziemke, J. R., and S. Chandra. (2003). "La Nina and El Nino—induced variabilities of ozone in the tropical lower atmosphere during 1970–2001." *Geophysical Research Letters*, 30, 3.
- [12] Ziemke, J. R. (2009). "Recent biomass burning in the tropics and related changes in tropospheric ozone." *Geophysical Research Letters*, 36, 15.