

# EFEK RADIKAL HIDROXYL (OH) DAN NITRIC OXIDE (NO) DALAM REAKSI KIMIA OZON DI ATMOSFER

Novita Ambarsari

Pusat Sain dan Teknologi Atmosfer  
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jl. Dr. Djundjuna 133, Bandung 40173 Indonesia  
e-mail : novitaambar@yahoo.com

## RINGKASAN

Reaksi pembentukan dan penguraian ozon di atmosfer yaitu di troposfer dan stratosfer dipengaruhi oleh banyak faktor. Radikal OH dan NO menjadi senyawa kimia yang berperan penting dalam reaksi kimia ozon di stratosfer dan troposfer. Kedua senyawa radikal ini termasuk radikal bebas yang bersifat reaktif sehingga berperan sebagai agen perusak ozon di stratosfer, selain radikal klorin dan bromin serta reaksi fotolisis ozon oleh sinar UV. Radikal OH dan NO juga berperan dalam proses produksi dan penguraian ozon di troposfer karena dapat menghasilkan kembali  $\text{NO}_2$  yang meningkatkan proses produksi ozon di troposfer. Selain itu, faktor-faktor lain yang berpengaruh dalam reaksi kimia ozon di stratosfer adalah kelimpahan molekul oksigen, energi radiasi matahari, dan keberadaan radikal halogen terutama klorin dan bromin. Ozon di troposfer dipengaruhi juga oleh jumlah prekursor ozon, radiasi matahari, dan faktor meteorologi.

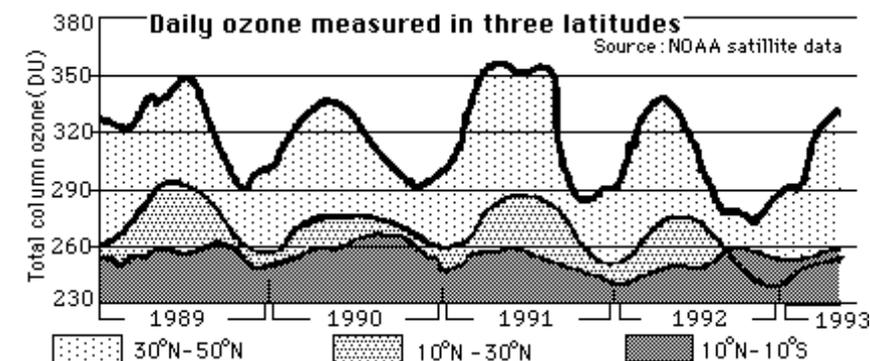
Kata kunci: Ozon, Radikal OH, Radikal NO

## 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Ozon merupakan komponen atmosfer yang memiliki peranan sangat penting. Distribusi ozon di atmosfer tidak homogen dengan konsentrasi ozon terbesar terdapat pada ketinggian 25 sampai 40 km yang disebut lapisan stratosfer. Lapisan stratosfer mengandung 90 % dari total ozon yang terdapat di atmosfer. Ozon di stratosfer berperan sebagai pelindung bumi dari radiasi sinar ultraviolet dengan panjang gelombang 280-320 nm yang berbahaya bagi kehidupan [NASA, 2001].

Ozon di stratosfer disebut lapisan ozon yang tersusun oleh molekul-molekul ozon. Konsentrasi molekul ozon dinyatakan dalam satuan Dobson Unit (DU). 1 DU tersusun oleh sekitar  $27 \times 10^9$  molekul ozon per cm persegi. 100 DU mewakili 1 mm ketebalan total kolom lapisan ozon pada tekanan 1 atm. Konsentrasi ozon total yang normal secara umum rata-rata sekitar 300 DU atau tebal lapisannya sebesar 3 mm. Nilai ini juga dipengaruhi lintang wilayah seperti tampak pada Gambar 1-1. Di kutub selatan konsentrasi ozon total dapat menurun hingga 117 DU pada akhir musim semi [NASA, 2001].



Gambar 1-1: Distribusi ozon pada tiga wilayah berdasarkan lintangnya

Selain di stratosfer, ozon juga terdapat di lapisan paling bawah atmosfer yaitu lapisan troposfer yang disebut ozon troposfer. Berbeda dengan ozon stratosfer, ozon troposfer bersifat polutan. O<sub>3</sub> troposfer bersifat sebagai polutan, secara alamiah konsentrasinya meningkat akibat aktivitas manusia (antropogenik). Ikatan ekstra oksigen yang mudah terurai membuat oksigen bersifat sebagai oksidator kuat dan korosif pada material dan berbahaya bagi tumbuhan dan binatang. Dampak bagi kesehatan yang ditimbulkan oleh ozon permukaan diantaranya adalah kerusakan fungsi paru-paru dan saluran pernapasan serta menurunkan sistem kekebalan tubuh [Fehsenfeld. 1993].

Ozon troposfer terbentuk dari reaksi fotokimia yang melibatkan CH<sub>4</sub>, senyawa organik yang mudah menguap (*Volatile Organic Compounds/VOCs*) dan karbonmonoksida dengan kehadiran NO<sub>x</sub> dan sinar matahari yang sangat kompleks [Fehsenfeld. 1993].

Reaksi kimia ozon di stratosfer dan troposfer melibatkan senyawa-senyawa kimia lainnya. Ozon stratosfer dipengaruhi oleh radikal klorin, bromin, dan radikal lain seperti OH dan NO yang berperan sebagai katalis dalam proses perusakan ozon di stratosfer. Begitu juga dengan reaksi kimia ozon di troposfer yang selain melibatkan pencemar primer seperti NO<sub>x</sub>, VOC, CH<sub>4</sub>, dipengaruhi juga oleh radikal OH dan NO. Dalam paper ini dibahas pengaruh radikal OH dan NO pada reaksi ozon di atmosfer.

## 1.2 Tujuan

Tujuan penulisan paper ini adalah untuk membahas mengenai pengaruh radikal OH dan NO pada reaksi ozon di atmosfer yaitu di stratosfer dan troposfer, serta mengkaji faktor-faktor yang mempengaruhi reaksi ozon di troposfer dan stratosfer.

## 2 DATA DAN METODE

Data-data yang digunakan pada tulisan ini sebagian besar merupakan

hasil studi literatur. Untuk mengetahui pengaruh faktor meteorologi terhadap konsentrasi ozon permukaan digunakan data ozon permukaan dan temperatur rata-rata per jam di Bandung pada 1 Januari 2008 yang ada di Bidang Komposisi Atmosfer PSTA LAPAN.

## 3 RADIKAL OH DI ATMOSFER

Sumber utama radikal OH di stratosfer adalah dari reaksi uap air dengan atom oksigen radikal yang berasal dari hasil fotolisis molekul ozon. Radikal OH memiliki waktu hidup yang sangat singkat, sehingga karakternya sangat didominasi oleh siklus hariannya, dengan konsentrasi paling banyak terjadi pada siang hari dan sangat sedikit pada malam hari [A. Damiani., M. Storini., C. Rafenelli., and P. Diego, 2010].

OH berasal dari peristiwa fotokimia yang memutus molekul H<sub>2</sub>O melalui proses fotolisis atau melalui reaksi dengan atom oksigen metastabil yang sangat reaktif O(<sup>1</sup>D):



Uap air mengalami transport dari troposfer ke stratosfer melalui lapisan tropopause tropikal dan juga terbentuk melalui proses oksidasi metana:



Tanda titik pada reaksi di atas menggambarkan serangkaian reaksi lain yang menghasilkan produk akhir di sebelah kanan tanda panah.

## 4 RADIKAL NO DI ATMOSFER

Radikal NO di stratosfer berasal dari reaksi antara N<sub>2</sub>O dengan atom oksigen radikal seperti tampak pada reaksi (4-3) Portmann R.W., Daniel J.S., dan Ravishankara A.R., 2012.





$\text{N}_2\text{O}$  merupakan sumber utama radikal NO di stratosfer. Sifat  $\text{N}_2\text{O}$  yang stabil menyebabkan  $\text{N}_2\text{O}$  tidak dapat terurai di troposfer. Ketika mencapai stratosfer,  $\text{N}_2\text{O}$  dapat bereaksi secara fotolisis (seperti pada Reaksi 4-1) dan reaksi dengan atom oksigen radikal sebagai proses penghilangan  $\text{N}_2\text{O}$  di stratosfer. Hampir 10 persen dari  $\text{N}_2\text{O}$  diubah menjadi  $\text{NO}_x$ .

Proses penghilangan NO di stratosfer terjadi melalui reaksi antara NO dengan atom N menghasilkan gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ).



Walaupun  $\text{N}_2\text{O}$  merupakan sumber utama  $\text{NO}_x$  di stratosfer, sumber lainnya berasal dari atmosfer tengah yaitu proses pembentukan  $\text{NO}_x$  melalui sinar kosmik pada ketinggian 10-15 km. Sinar kosmik merupakan radiasi dari partikel berenergi tinggi yang berasal dari luar atmosfer bumi. Sinar kosmik dapat berupa elektron, proton, bahkan inti atom seperti besi atau yang lebih berat lagi. Hampir 90% sinar kosmik yang tiba di permukaan Bumi adalah proton, sekitar 9% partikel alfa dan 1% elektron.

## 5 REAKSI KIMIA OZON DI ATMOSFER

### 5.1 Reaksi Pembentukan dan Penguraian Ozon di Stratosfer

Banyak reaksi kimia di atmosfer yang memicu terjadinya kerusakan ozon. Akan tetapi, di stratosfer reaksi utama penyebab terbentuknya molekul ozon adalah akibat reaksi fotolisis oleh sinar UV dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) di bawah 250 nm yang dapat memutus ikatan  $\text{O}_2$  seperti dijelaskan berikut ini [Mc.Conell, J.C., 2008].



dengan  $h\nu$  merepresentasikan energi foton dengan frekuensi  $\nu$  dan panjang gelombang  $\lambda$ . Atom O yang terbentuk bereaksi sangat cepat dengan molekul  $\text{O}_2$  untuk membentuk  $\text{O}_3$ :



Selain itu, pada panjang gelombang 200 nm terdapat jendela transmisi di atmosfer, penyerapan untuk radiasi ini yang menghasilkan pembentukan ozon dapat terjadi pada ketinggian 20 km di daerah tropis. Sumber utama ozon di daerah stratosfer tropis dengan kecepatan reaksi maksimum terjadi pada ketinggian 40 km. Akan tetapi, sebagian besar ozon yang diproduksi di daerah ini terurai dengan sendirinya. Pada ketinggian di bawah 30 km waktu hidup senyawa-senyawa kimia cenderung panjang sehingga sebagian ozon dapat ditransport ke wilayah lain.

Di lapisan stratosfer, ozon mengalami proses fotolisis dengan sangat cepat oleh sinar UV dan sinar tampak dari radiasi matahari seperti reaksi berikut:



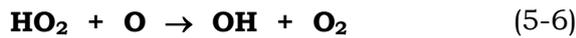
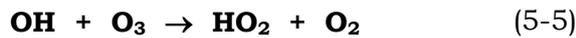
Akan tetapi, reaksi tersebut tidak menunjukkan keseluruhan jumlah atom O yang dilepaskan dan bergabung dengan molekul oksigen untuk membentuk kembali ozon. Perubahan yang sangat cepat dari O menjadi  $\text{O}_3$  membuat kedua spesi ini dapat dianggap spesi *single* disebut *odd oxygen* ( $\text{O}_x = \text{O} + \text{O}_3$ ).  $\text{O}_x$  atau  $\text{O}_3$  hilang saat terbentuknya ikatan oksigen seperti reaksi:



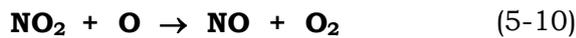
Reaksi tersebut merupakan reaksi sederhana yang menjadi bagian dari rangkaian reaksi lainnya yang diperkenalkan oleh Sydney Chapman (Chapman, 1930) yang bisa menjelaskan mengenai lapisan ozon dan masih dapat digunakan hingga sekarang. Reaksi lainnya yang melibatkan  $\text{HO}_x$  ( $=\text{H} + \text{OH} + \text{HO}_2 + \dots$ ),  $\text{NO}_x$  ( $=\text{NO} + \text{NO}_2$ ),  $\text{ClO}_x$  ( $=\text{Cl} + \text{ClO} + \text{OCIO} + \text{HOCl} + \text{BrCl}$ ) dan,  $\text{BrO}_x$  ( $=\text{Br} + \text{BrO} + \text{BrCl} + \text{HOBr}$ ) radikal juga mempengaruhi budget ozon. Semua radikal ini berasal dari senyawa-senyawa lain yang memiliki waktu hidup panjang sehingga dapat ditransport dari troposfer ke stratosfer.

## 5.2 Siklus Radikal OH dan NO dalam Reaksi Ozon Troposfer dan Stratosfer

Radikal OH berperan penting dalam keseimbangan ozon di atmosfer. Hal ini disebabkan radikal OH terlibat dalam siklus katalitik penguraian ozon di stratosfer seperti halnya radikal ClO dan Br, melalui siklus HOx <sup>6</sup>:



Sama halnya seperti OH, radikal NO juga terlibat dalam siklus katalitik penguraian ozon di stratosfer melalui siklus NOx:



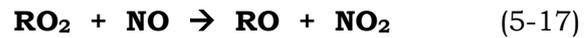
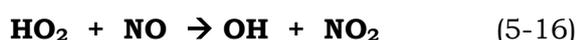
Di troposfer, radikal OH terlibat dalam reaksi pembentukan dan penguraian ozon. Dalam reaksi pembentukan ozon yang melibatkan CO dan VOC, CO bereaksi dengan radikal OH membentuk atom H radikal dan CO<sub>2</sub>. Atom H radikal kemudian bereaksi dengan O<sub>2</sub> membentuk hirdoperoksi radikal (HO<sub>2</sub>) seperti reaksi berikut:



Radikal OH juga mengikat hidrokarbon (RH) dan senyawa VOC yang lain untuk membentuk alkyl peroksi radikal (RO<sub>2</sub>):



HO<sub>2</sub> dan RO<sub>2</sub> mengoksidasi NO untuk membentuk NO<sub>2</sub>, menghasilkan kembali radikal OH:



Pembentukan kembali NO<sub>2</sub> mengakibatkan ozon terbentuk lebih banyak dalam waktu kurang lebih 1 hingga 2 menit. Siklus ini terus berjalan hingga NO<sub>2</sub> atau NO atau rantai propagasi spesi radikal yang lain (OH dan HO<sub>2</sub>) dihilangkan.

Reaksi produksi ozon di troposfer berhenti dengan:

- Penghilangan reaktan atau reaktan berubah menjadi spesi kimia yang lain
- Penurunan *fluks actinic* yang berkaitan dengan sinar matahari terutama saat matahari tenggelam.

Reaksi terminasi yang penting yaitu:



## 6 FAKTOR-FAKTOR YANG MEM-PENGARUHI REAKSI OZON DI ATMOSFER

### 6.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Reaksi Ozon di Troposfer

Hubungan antara kondisi meteorologi dan polutan di udara seperti ozon troposfer, telah sejak lama menjadi bagian penting dari penelitian atmosfer. Proses presipitasi, karakter aliran predominan, faktor cuaca seperti temperatur, kelembaban, dan tekanan sangat berhubungan dengan pembentukan, transport, difusi, dan deposisi dari polutan di udara [Schreiber, V., 1996]:

#### • Prekursor ozon

Prekursor ozon terutama karbon monoksida, hidrokarbon, dan oksida nitrogen yang berasal dari alam maupun hasil aktivitas manusia mempengaruhi konsentrasi ozon troposfer di atmosfer. Semakin tinggi emisi prekursor ozon tersebut, akan meningkatkan konsentrasi ozon troposfer yang terbentuk. Akan tetapi, hal ini juga masih dipengaruhi oleh faktor lain yaitu intensitas sinar

matahari dan faktor meteorologi diantaranya temperatur, kelembapan, tekanan, arah dan kecepatan angin, dan lain-lain.

#### • Intensitas sinar matahari

Sinar matahari sangat berpengaruh terhadap proses pembentukan ozon troposfer melalui reaksi fotokimia. Intensitas sinar matahari yang tinggi dikombinasikan dengan tingginya tingkat emisi prekursor ozon akibat aktivitas manusia akan memicu reaksi fotokimia pembentukan ozon troposfer [Kalabokas, 2004].

Hal ini dapat terlihat dari profil siklus harian (diurnal) ozon troposfer. Konsentrasi ozon troposfer di siang hari, di saat intensitas matahari dan aktivitas manusia tinggi, jauh lebih besar dibandingkan konsentrasi ozon troposfer di malam hari.

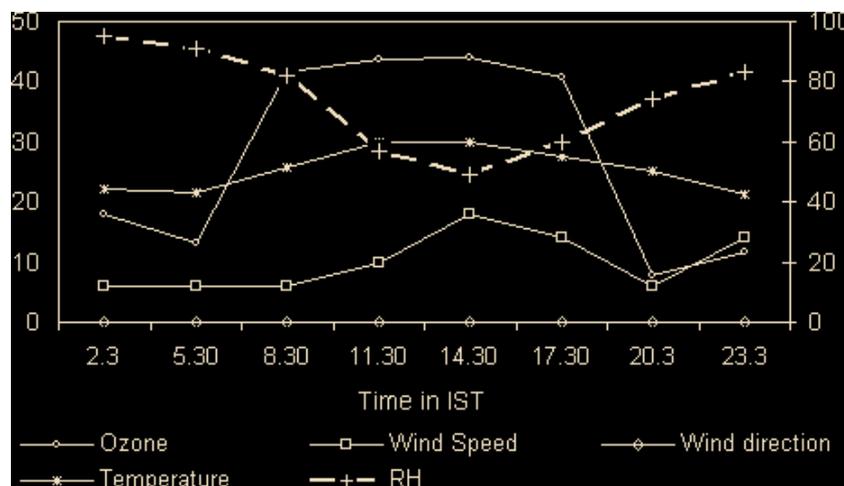
Selain variasi diurnal, pengaruh intensitas matahari dan prekursor ozon terhadap tingginya konsentrasi ozon troposfer dapat dilihat juga dari profil variasi musiman. Musim panas menjadi saat dimana konsentrasi ozon mencapai tingkat yang paling tinggi dibandingkan dengan saat musim dingin. Selain karena intensitas matahari yang rendah di musim dingin, aktivitas manusia pun berkurang. Oleh karenanya, emisi gas-gas prekursor ozon dari sektor transportasi, maupun sektor lainnya ikut berkurang sehingga menurunkan konsentrasi ozon troposfer yang terbentuk.

Untuk daerah yang mengalami musim hujan, konsentrasi ozon troposfer pada musim hujan lebih rendah dibandingkan musim kemarau. Hal ini disebabkan karena pada musim hujan terjadi proses *wash out* di atmosfer, sehingga gas-gas prekursor ozon di atmosfer larut dan mengalami deposisi dalam air hujan.

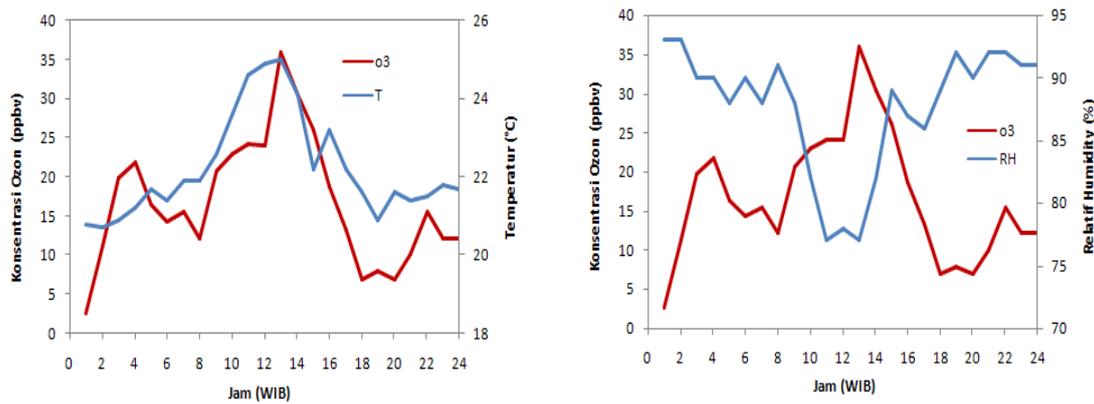
#### • Faktor meteorologi

Faktor meteorologi yang paling berperan dalam proses pembentukan ozon troposfer adalah kecepatan dan arah angin, temperatur, tekanan, dan kelembapan. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pulikeshi (2005) di Chennai, India, faktor meteorologi tersebut memberikan pengaruh terhadap proses pembentukan ozon troposfer (Gambar 6-1). Prekursor-prekursor ozon terkonsentrasi dalam skala lokal atau mengalami transport sehingga menghasilkan ozon troposfer di daerah lain sangat ditentukan oleh kecepatan angin. Pembentukan ozon terjadi lebih kondusif pada kondisi temperatur atmosfer yang hangat, kering, tidak ada awan, dan kecepatan angin yang rendah. Kondisi ini sebagian besar terjadi pada sistem dengan tekanan tinggi.

Hal yang sama juga tampak untuk kondisi di Bandung (Gambar 6-2). Konsentrasi ozon permukaan di Bandung sangat tinggi mencapai 35 ppbv pada saat temperatur udara maksimum yaitu 25 °C sedangkan kelembapan relatif rendah sebesar 75 %.



Gambar 6-1: Pengaruh faktor meteorologi terhadap ozon troposfer di Chennai India [Pulikeshi, 2005]



Gambar 6-2: Grafik konsentrasi ozon permukaan dan temperatur (kiri) dan konsentrasi ozon dan kelembaban relatif (kanan) di Bandung tanggal 1 Januari 2008.

Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa ozon troposfer meningkat pada saat nilai temperatur tinggi, kecepatan angin rendah, kelembapan rendah (kering), dan arah angin nol.

Dari analisis ini dapat diambil kesimpulan mengenai pengaruh faktor meteorologi terhadap proses pembentukan ozon troposfer sebagai berikut:

- Temperatur tinggi meningkatkan pembentukan ozon,
- Relatif humidity (RH)/kelembapan berpengaruh sebaliknya terhadap pembentukan ozon, kelembapan rendah ozon troposfer tinggi
- Kondisi dengan tekanan tinggi menyebabkan peningkatan konsentrasi ozon troposfer [Pulikeshi, 2005].

## 6.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Reaksi Ozon di Stratosfer

Konsentrasi ozon di stratosfer sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama yaitu [Rowland S., 2006]:

### • Jumlah oksigen di stratosfer

Reaksi pembentukan ozon di stratosfer berasal dari reaksi fotolisis molekul oksigen oleh sinar UV, sehingga jumlah ozon di stratosfer sangat ditentukan oleh kelimpahan molekul oksigen. Walaupun faktor lain seperti transport proses juga ikut berpengaruh terhadap jumlah ozon di stratosfer.

### • Radiasi sinar ultraviolet

Radiasi sinar ultraviolet memegang peranan penting dalam reaksi

pembentukan ozon di stratosfer. Reaksi fotolisis molekul oksigen sangat ditentukan oleh energi radiasi ultraviolet dengan panjang gelombang 242 nm. Sedangkan reaksi penguraian ozon secara alami akibat fotolisis juga melibatkan energi radiasi UV yang terjadi pada panjang gelombang 310 nm.

### • Keberadaan radikal halogen, $\text{NO}_x$ dan $\text{HO}_x$

Selain reaksi alami fotolisis ozon di stratosfer, serta keberadaan radikal NO dan OH seperti sudah dijelaskan sebelumnya, keberadaan radikal halogen terutama klorin dan bromin ikut menentukan konsentrasi ozon di stratosfer. Penguraian ozon di stratosfer menurut siklus Chapman dan siklus katalitik yang dapat digambarkan secara umum dalam bentuk:



X dapat berupa NO, OH, H, Cl, dan Br. Reaksi ini secara keseluruhan dikendalikan oleh densitas atom oksigen yang menurun jumlahnya seiring menurunnya ketinggian. Di stratosfer bawah, siklus ini tidak terlalu penting dibandingkan siklus lainnya yang tidak dibatasi oleh atom oksigen.

## 7 PENUTUP

Radikal OH dan NO berperan sebagai agen perusak ozon di stratosfer.

Radikal NO juga berperan sebagai *intermediate* reaksi pembentukan ozon di troposfer untuk menghasilkan kembali NO<sub>2</sub> juga berperan dalam produksi OH. Radikal OH di troposfer berperan sebagai oksidator yang mengoksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub> dan bereaksi dengan HC membentuk alkil peroksi radikal. Beberapa faktor lain yang mempengaruhi ozon di stratosfer adalah sinar matahari, jumlah oksigen, dan keberadaan agen perusak ozon. Beberapa faktor lain yang mempengaruhi ozon di troposfer yaitu prekursor, sinar matahari, faktor meteorologi, pembentukan petir, dan pengaruh musim.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Ninong Komala dan Bapak Mulyono di Bidang Komposisi Atmosfer PSTA LAPAN yang telah membantu penulis dalam penyediaan data ozon permukaan dan temperatur di Bandung yang digunakan pada tulisan ini.

### DAFTAR RUJUKAN

A. Damiani., M. Storini., C. Rafenelli., and P. Diego, 2010. *Variability of the Nighttime OH Layer and Mesospheric Ozone at High Latitudes During Northern Winter: Influence of Meteorology*, Atmos. Chem. Phys., 10, 10291-10303.

Fehsenfeld, 1993. *Tropospheric Ozone: Distribution and Sources*, Global Atmospheric Chemical Change, 169-174.

K. Minschwaner., G. L. Manney., S. H. Wang., and R. S. Harwood, 2011. *Hydroxyl in the Stratosphere and Mesosphere – Part 1: Diurnal Variability*, Atmos. Chem. Phys., 11, 955-962.

Kalabokas, 2004. *A Climatological Study of Rural Surface Ozone in Central Greece*, Journal of Atmospheric chemistry and Physics, Athena, Yunani.

Mc.Conell, J.C., 2008. *Stratospheric Ozone Chemistry*, ATMOSPHERE-OCEAN 46 (1) 2008, 69–92.

NASA, 2001. *Educational Resources, The Ozone layer*, www. nas.nasa.gov/ About/ Education/Ozone/.

Portmann R.W., Daniel J.S., dan Ravishankara A.R., 2012. *Stratospheric Ozone Depletion Due to Nitrous Oxide: Influences of Other Gases*, Phil. Trans. R. Soc. B., 367, 1256-1264.

Pulikeshi, 2005. *The Effects of Weather on Surface Ozone Formation*, Green Page, Eco Servis International.

Rowland S., 2006. *Stratospheric Ozone Depletion Review*, Phil. Trans. R. Soc. B (2006) 361, 769–790.

Schreiber, V., 1996. *A Synoptic Climatological Evaluation of Surface Ozone Concentrations in Lancaster County, Pennsylvania*, Millersville University of Pennsylvania.

