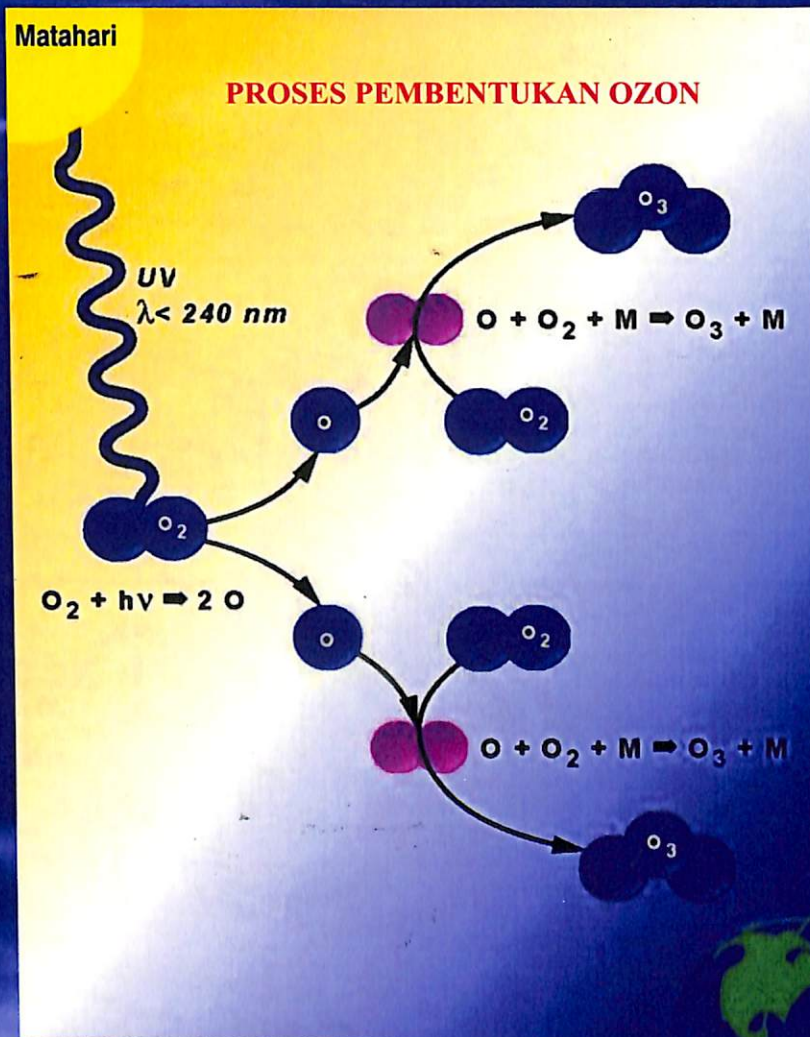


ANALISIS POLA DAN KECENDERUNGAN OZON TOTAL DI INDONESIA 1979 - 2004



LEMBAGA PENERBANGAN DAN ANTARIKSA NASIONAL

Jl. Pemuda Persil No. 1, Jakarta Timur 13220
Telp. (021)4892802, Fax. (021) 4894815

**ANALISIS POLA DAN KECENDERUNGAN OZON
TOTAL DI INDONESIA
1979 – 2004**

17/08
10

Disusun Oleh

Rukmi Hidayati
Siti Asiaty
Suparno



LEMBAGA PENERBANGAN DAN ANTARIKSA NASIONAL

Jl. Pemuda Persil No. 1, Jakarta Timur 13220 Telp. (021) 4892802, Fax. (021) 4894815

2006

**Keterangan gambar sampul :
Proses Pembentukan Ozon**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas ramat dan karuniaNya sehingga booklet “Analisis Pola dan Kecenderungan Ozon Total Indonesia 1979 - 2004 “ ini dapat diselesaikan. Buku ini merupakan bagian dari terbitan Peta Ozon Total Indonesia, dimaksudkan untuk memberikan penjelasan atau gambaran tentang Peta Ozon Total di Indonesia dan merupakan terbitan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.

Buku ini ditujukan kepada masyarakat luas dari berbagai disiplin yang memerlukan pengetahuan tentang ozon apa dan bagaimana kondisi ozon total di Indonesia selama periode tahun 1979 hingga 2004, serta dampak perubahan – perubahannya.

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam pembuatan Peta Ozon Total di Indonesia dan buku ini, secara penuh dan dedikasinya yang besar sehingga penyusunan buku ini dapat terlaksana.

Akhir kata, bilamana dalam penyajian buku informasi ini terdapat hal yang tidak berkenan di hati pembaca, kami mohon maaf. Saran dan kritik atas buku ini kami tunggu dan diharapkan dapat menjadikan masukan yang berharga bagi perbaikan penyajian pada buku-buku informasi yang akan datang.

Bandung Januari 2006

Editor

DAFTAR ISI

Hal	
Penanggung jawab dan editor	i
Judul dan penyusun	ii
Keterangan gambar sampul	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar isi	v
1. Pendahuluan	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Landasan teori	2
1.2.1. Keberadaan ozon di alam dan fungsinya	2
1.2.2. Reaksi pembentukan dan kerusakan ozon	5
1.2.2.1. Ozon Permukaan	5
1.2.2.2. Ozon Troposfer	6
1.2.2.3. Ozon Stratosfer	8
1.3. Faktor – faktor yang mempengaruhi konsentrasi ozon	9
1.3.1. Faktor – faktor yang mempengaruhi ozon troposfer	10
1.3.1.1. Pengaruh aktivitas matahari pada ozon troposfer	10
1.3.1.2. Pengaruh musim pada ozon troposfer	11
1.3.1.3. Pengaruh ENSO pada ozon troposfer	11
1.3.1.4. Pengaruh antropogenik pada ozon troposfer	12
1.3.2. Faktor-faktor yang mempengaruhi ozon stratosfer	13
1.3.2.1. Pengaruh aktivitas matahari pada ozon stratosfer	13
1.3.2.2. Pengaruh musim pada ozon stratosfer	14
1.3.2.3. Pengaruh QBO	15
1.3.2.4. Pengaruh antropogenik	15
2. Tinjauan Pustaka	16
3. Data dan Metode	16
3.1. Data	16
3.2. Metode	17
4. Hasil dan Pembahasan	17
4.1. Hasil	17
4.2. Pembahasan	18
5. Kesimpulan	26
Ucapan terima kasih	26
Daftar Pustaka	27
Lampiran	29

1. Pendahuluan

1.1. Latar belakang.

Ozon menjadi perhatian ilmuwan sejak tahun 1970, hal ini terjadi karena para ilmuwan beranggapan bahwa konsentrasi ozon di lapisan atas atmosfer telah rusak karena pengaruh aktivitas manusia. Informasi kerusakan ozon ini didapat dari pengumpulan data oleh "WMO Global Ozone Observing System"; yang pada pertengahan 1950 mempunyai 150 stasiun pengamat ozon dan 15 tahun terakhir melakukan pengamatan dengan satelit. Dari penelitian laboratorium, hasil pengukuran dan penelitian teoritis ditemukan hubungan antara aktivitas manusia dengan kerusakan ozon. Hal ini merupakan dasar informasi negara-negara menanggapi seruan UNEP untuk menandatangani konferensi lingkungan pertama untuk melindungi lapisan ozon di Wina 1985 (Bojkov R. D., 1995).

Senyawa antropogenik / akibat aktivitas manusia yang diemisikan ke atmosfer seperti CH_4 , CO , NO_x , NMHC, CFC, CH_3Br , Halon mempunyai pengaruh berbeda pada ozon troposfer dan stratosfer. CH_4 , CO , NO_x berfungsi sebagai ozon prekursor pada ozon troposfer, yaitu menyebabkan penambahan ozon troposfer, sedangkan senyawa-senyawa tersebut kalau dapat mencapai stratosfer menyebabkan berkurangnya ozon stratosfer. CFC, CH_3Br , Halon tidak berpengaruh pada ozon troposfer karena di troposfer CFC bersifat inert, sedangkan di stratosfer akan ditransformasi menjadi zat aktif yang merusak ozon stratosfer seperti Cl , ClO , Br , BrO (Wardle D.I. et. all., 1997). Adanya isu tentang penipisan lapisan ozon terutama di daerah kutub, diikuti dengan penandatanganan Montreal Protokol pada tahun 1987

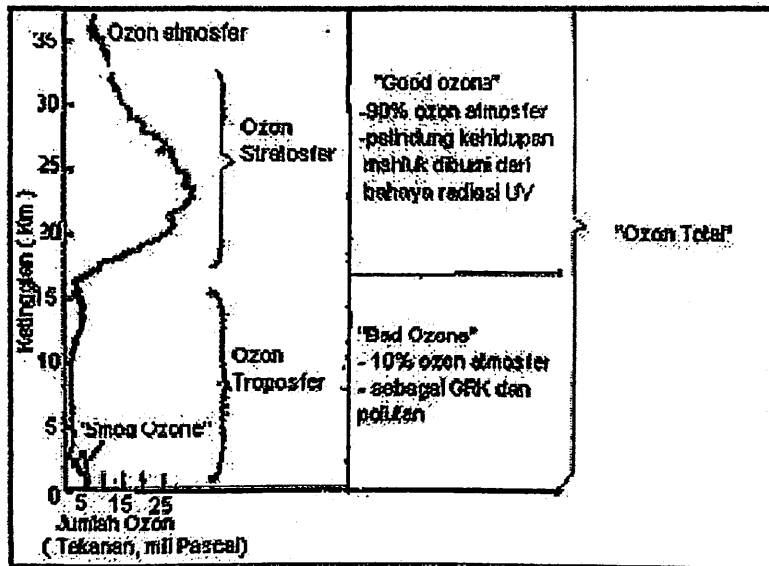
oleh negara-negara maju dan kemudian menyusul perjanjian 1990 di London dan tahun 1992 di Copenhagen. Penandatanganan ini diikuti oleh negara-negara berkembang pada tahun-tahun berikutnya secara bertahap. Montreal protokol ini intinya menyerukan pada semua pihak untuk menghapus zat-zat perusak ozon, yaitu group CFC dan Halon. Indonesia sebagai negara berkembang ikut meratifikasi Montreal Protokol ini pada tahun 1992.

Untuk mengetahui kondisi ozon total di Indonesia maka diperlukan suatu analisis pola dan kecenderungan ozon total di wilayah Indonesia dalam kurun waktu yang cukup panjang. Informasi tentang kondisi ozon total ini sangat penting dan diperlukan, karena ozon berperan sangat penting bagi kehidupan di bumi. Disamping itu dengan mengetahui kondisi ozon total di Indonesia dari periode 1979-2004, dapat menjawab isu menipisnya lapisan ozon apakah juga terjadi di wilayah Indonesia

1.2. Landasan teori

1.2.1. Keberadaan Ozon di alam dan fungsinya

Ozon adalah tiga atom Oksigen yang bersatu, sehingga sering dituliskan dengan rumus kimia O_3 . Ozon berbentuk gas, berbau tajam dan berwarna biru pucat serta digolongkan sebagai unsur polusi karena sifatnya yang beracun dan sangat korosif. Ozon dapat menyerang saluran pernafasan serta menyebabkan iritasi mata. Keberadaan ozon di udara bebas sangat bervariasi tergantung pada ketinggiannya yang dapat dilihat dalam Gambar 1.



Gambar 1. Keberadaan ozon di atmosfer berdasarkan ketinggian.

Ozon (O_3) merupakan gas yang komposisinya kecil di atmosfer namun mempunyai peran sangat penting. Ozon ada pada setiap ketinggian atmosfer bumi, mulai dari permukaan sampai ketinggian setidak – tidaknya 100 km. Konsentrasi yang paling besar di lapisan stratosfer pada kira-kira 25 km. Dilapisan mesosfer ozon sangat kecil dan jarang dibahas, di lapisan troposfer konsentrasi ozon lebih kecil dari stratosfer. Karakteristik dan peran ozon berbeda tergantung pada ketinggiannya. Ozon troposfer mempunyai peran yang sangat penting pada proses kimia atmosfer pada ketinggian ini, juga mempunyai pengaruh termal pada lapisan atmosfer bawah.

Di lapisan stratosfer diperkirakan ozon lebih besar dari 90% dan sisanya di troposfer (Anderson. and Herschbach, 1985), konsentrasi ozon turun perlahan – lahan sampai ketinggian tropopaus kemudian

naik lagi dan konsentrasi maksimum terjadi pada ketinggian 25 km. Setelah mencapai harga maksimum pada ketinggian 25 km konsentrasi ozon turun lagi.

Pada ketinggian permukaan Ozon (O_3) merupakan polutan sekunder yang dihasilkan dari reaksi fotokimia ozon prekursor. Ozon prekursor dapat dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil untuk industri, transportasi, keperluan rumah tangga, dan fasilitas umum lainnya. Senyawa ozon prekursor yang dihasilkan dari aktivitas tersebut antara lain NO_x , CO, CH_4 , NMHC (Non Metan Hidrokarbon). Reaksi fotokimia pembentukan ozon permukaan selain memerlukan ozon prekursor juga memerlukan radiasi UV. Konsentrasi ozon permukaan turun pada malam hari, karena tidak ada radiasi UV sehingga tidak ada reaksi fotolisa NO_2 untuk membentuk ozon, dan dalam keadaan temperatur atmosfer yang stabil tidak ada transport ozon dari atmosfer atas ke atmosfer bawah. Pada saat pagi hari emisi gas dari kendaraan bermotor dan sumber lainnya ke atmosfer menaikkan konsentrasi prekursor ozon; kenaikan fluks densitas radiasi UV menyebabkan adanya reaksi fotokimia yang menghasilkan ozon dan maksimum pada tengah hari. Ketika matahari mulai tenggelam konsentrasi ozon permukaan turun lagi (Colls, 1997). Ozon permukaan merupakan pencemar berarti secara alamiah konsentrasinya naik karena aktivitas manusia. Ikatan ekstra oksigen ini mudah terurai, sehingga ozon sebagai oksidan yang kuat dan juga korosif pada material dan bersifat racun pada tanaman dan binatang. (Wardle et. All, 1997).

Ozon troposfer adalah ozon yang berada dekat permukaan bumi sampai ketinggian tropopaus yang jumlahnya $\pm 10\%$ terhadap total kolom ozon atmosfer, mempunyai peran yang sangat penting pada

perubahan iklim karena bersifat sebagai gas rumah kaca. Ozon troposfer juga merupakan sumber utama gugus OH yang reaktif, menyebabkan pembersihan beberapa molekul organik di atmosfer. Reaksi kimia di troposfer dapat berperan sebagai filter kimia pada bahan yang berdampak pada ozon di stratosfer karena bahan tersebut dikontrol oleh gugus OH (Anderson and Herschbach, 1985).

Ozon stratosfer sangat efisien menyerap ultraviolet dan merupakan sumber panas paling besar pada ketinggian 10 km – 50 km. UV diserap oleh ozon menyebabkan temperatur inversi dan merupakan penanggung jawab adanya lapisan stratosfer. Konsentrasi ozon bervariasi, terbesar di lapisan stratosfer pada ketinggian 25 km – 30 km. Ozon stratosfer jumlahnya $\pm 90\%$ total ozon di atmosfer dan berfungsi melindungi bumi karena menyerap radiasi UV, sehingga radiasi UV yang sampai di bumi menjadi kecil, hal ini sangat menguntungkan bagi kehidupan.

1.2.2. Reaksi Pembentukan dan Perusakan Ozon

1.2.2.1. Ozon permukaan

Reaksi pembentukan ozon permukaan dengan NO_x sebagai ozon prekursor dapat dituliskan sebagai berikut:

$\text{NO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{NO} + \text{O} (\lambda \text{ 280} - 430 \text{ nm})$, reaksi ini disebut reaksi fotolisa

NO_2 . Selanjutnya O bereaksi dengan O_2 .

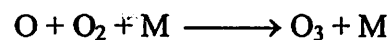
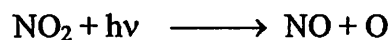
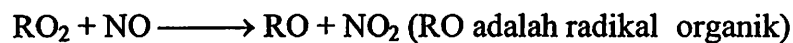
$\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \longrightarrow \text{O}_3 + \text{M}$ (M adalah molekul netral seperti N_2 atau O_2)

$\text{NO} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ (Penghasil NO_2).

Selain itu ozon permukaan dapat terbentuk sebagai polutan sekundair, reaksinya sangat kompleks, melibatkan reaksi antara ratusan

hidrokarbon yang berbeda, radikal NO dan NO₂. Secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

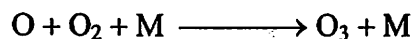
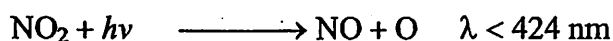
$\text{OH} + \text{RH} \longrightarrow \text{R} + \text{H}_2\text{O}$ (R adalah radikal organik yang mengandung atom C dan H). R bereaksi dengan molekul oksigen membentuk RO₂ (radikal peroksi organik), selanjutnya bereaksi:



Reaksi ini terjadi pada siang hari, karena memerlukan radiasi UV. Pada malam hari tidak ada photon radiasi UV sehingga NO tidak dapat dibentuk dari fotolisa, sehingga pada malam hari NO dan O₃ turun. (Colls, 1997).

1. 2.2.2. Ozon Troposfer

Ozon troposfer salah satu hasil fotokimia karena adanya polutan utama NO dan NO₂ dan hidrokarbon.



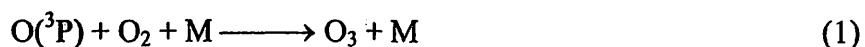
M adalah senyawa ketiga yang berfungsi untuk menyerap energi yang dihasilkan pada waktu terjadi reaksi, misalnya N₂

hν adalah energi photon yang digunakan untuk reaksi photolisis

Selain itu ozon troposfer dapat terbentuk karena adanya prekursor NO_x, CO, CH₄.

Reaksi dengan NO_x (NO₂ dan NO), CO dan CH₄

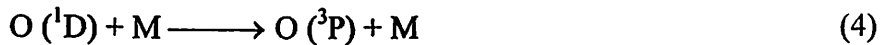
Ozon terbentuk dari reaksi atom O pada keadaan dasar dan molekul O₂



Terurai karena fotolisis



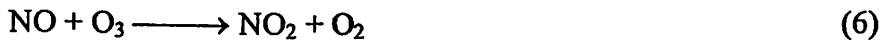
O (¹D) tidak stabil diredam oleh O₂ dan N₂ menjadi



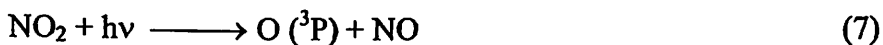
Dapat juga bereaksi dengan H₂O membentuk hidroksil



Ozon bereaksi dengan NO membentuk NO₂



NO₂ terurai karena fotolisis

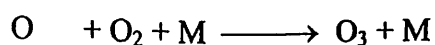
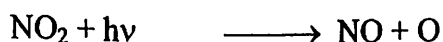
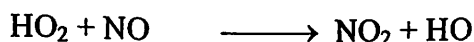


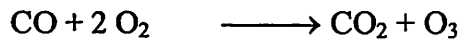
Ozon yang terurai pada reaksi (6) bereaksi membentuk O₃ dari reaksi (7) diikuti reaksi (1). Reaksi (1) – (7) siklus pembentukan dan peruraian ozon secara alamiah. O₃, O (¹D), O (³P) dan NO₂ dibentuk oleh reaksi NO dengan HO₂, CH₃O₂ dan RO₂.



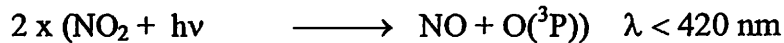
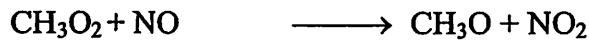
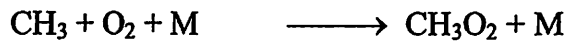
RO₂ : peroksi organik kompleks. Reaksi terjadi selama ada foto oksidasi CO, CH₄, hidrokarbon.

Reaksi dengan CO





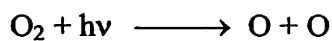
Reaksi dengan CH_4



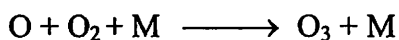
$\text{CH}_4 + 4 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{O}_3$ (Anderson and Herschbach, 1985).

1.2.2.3. Ozon stratosfer.

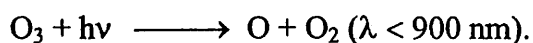
Reaksi pembentukan ozon stratosfer menurut Chapman yang merupakan reaksi fotolisa molekul oksigen dengan menyerap radiasi ultraviolet dengan panjang gelombang $\lambda < 243 \text{ nm}$.



Atom oksigen yang terbentuk ini bereaksi secara cepat membentuk ozon

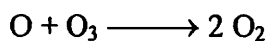
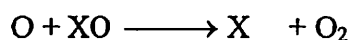
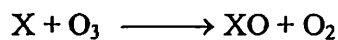


Selanjutnya O_3 mengalami reaksi fotolisa



Reaksi ini berulang terus hasilnya pemanasan di stratosfer, karena reaksi pembentukan maupun reaksi perusakan ozon menghasilkan panas. Pada keadaan ini tidak ada kehilangan ozon karena reaksinya selalu berulang dan memerlukan radiasi matahari, sehingga produksi ozon paling banyak di daerah tropis (Wardle D.I. et. all, 1997).

Adanya unsur – unsur lain yang masuk ke stratosfer menyebabkan reaksi kesetimbangan pembentukan ozon menurut Chapman diatas terganggu dan dapat berakibat berkurangnya O_3 stratosfer. Unsur – unsur yang menyebabkan kerusakan ozon antara lain adalah H_2O , N_2O , CH_3Cl , CFC, CH_3Br dan halon. Unsur – unsur ini akan diubah menjadi senyawa yang lebih aktif merusak ozon senyawa tersebut adalah NO , NO_2 , OH , HO_2 , Cl , ClO , Br , BrO . Senyawa ini menjadi katalisator pada reaksi pengrusakan tersebut dengan reaksi:



X adalah katalisator yaitu senyawa – senyawa NO , NO_2 , OH , HO_2 , ClO , Br , BrO (Wardle D.I. et. all, 1997).

1.3. Faktor – faktor yang mempengaruhi konsentrasi ozon

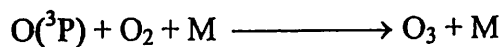
Perubahan konsentrasi ozon total disebabkan oleh adanya pembentukan dan perusakan ozon di troposfer dan stratosfer karena pengaruh alamiah dan antropogenik.

1.3.1. Faktor-faktor yang mempengaruhi Ozon Troposfer

Di atas sudah disebutkan bahwa konsentrasi O_3 dipengaruhi oleh faktor alamiah dan antropogenik. Pengaruh alamiah pada ozon troposfer antara lain pengaruh aktivitas matahari, pengaruh musim, pengaruh ENSO (El Nino and South Oscillation). Pengaruh antropogenik disebabkan bertambahnya emisi senyawa ozon prekursor ke atmosfer yang dihasilkan oleh industri, kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, biomasa serta emisi gas hasil kebakaran hutan. Gas CH_4 , CO , NO_x , NMHC (Non Metan-Hidro Carbon), merupakan ozon prekursor yang sangat berpengaruh pada pembentukan ozon troposfer.

1.3.1.1. Pengaruh aktivitas matahari pada ozon troposfer

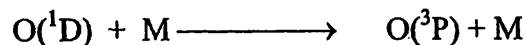
Aktivitas matahari akan berpengaruh pada konsentrasi ozon karena reaksi pembentukan dan perusakan ozon secara alamiah memerlukan radiasi ultraviolet. Reaksi pembentukan dan perusakan ozon troposfer sebagai berikut:



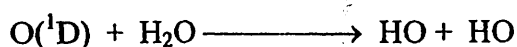
O_3 dirusak secara fotolisis :



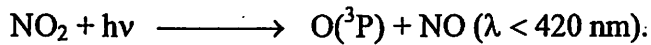
$O(^1D)$ adalah oksigen tereksitasi bersifat tidak stabil dipadamkan oleh molekul netral bisa oleh O_2 atau N_2 sebagai berikut:



$O(^1D)$ dapat bereaksi dengan H_2O membentuk OH dengan reaksi sebagai berikut:



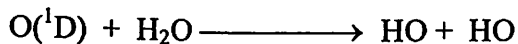
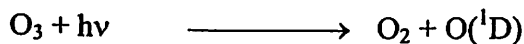
$O(^3P)$ adalah oksigen pada kondisi dasar (ground state) dapat terbentuk dari fotolisa :



Selanjutnya $O(^3P)$ membentuk O_3 seperti reaksi permulaan, ini adalah siklus alamiah pembentukan dan perusakan. Reaksi di atas memerlukan energi radiasi matahari.

1.3.1.2. Pengaruh musim pada ozon troposfer

Indonesia mempunyai dua musim yaitu musim basah (hujan) dan musim kering (kemarau). Pada saat musim hujan atmosfer banyak mengandung uap air. Reaksi fotolisa ozon di atas menunjukkan bahwa $O(^1D)$ dapat bereaksi dengan H_2O membentuk OH dengan reaksi sebagai berikut:



Semakin banyak uap air maka akan semakin banyak radikal OH yang terbentuk, dan semakin banyak ozon yang terurai. Radikal OH ini merupakan oksidator atau pembersih troposfer yang efisien sehingga menyaring senyawa kimia yang akan menuju lapisan stratosfer.

1.3.1.3. Pengaruh ENSO (El Nino and South Oscillation) pada ozon troposfer

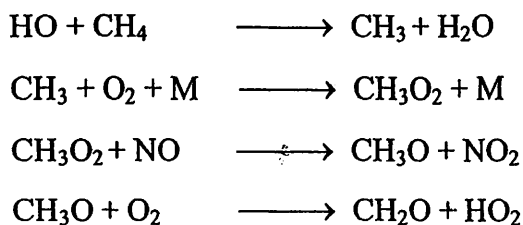
Gejala iklim yang dikenal dengan nama El Nino dan Oscilasi Selatan adalah suatu perubahan pada sirkulasi atmosfer yang terjadi secara tidak teratur dengan perioda sekitar 2 – 7 tahun di atas daerah tropis Pasifik. Pada tahun – tahun normal berembus angin timuran dari Pasifik Timur yang menyebabkan terjadinya hujan berat di wilayah

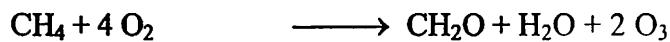
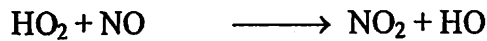
bagian barat Pasifik termasuk Indonesia. Sedangkan pada saat terjadi El Nino angin timuran melemah dan terdesak kearah timur oleh angin baratan yang lebih dominan dan lebih kuat, karena tekanan di Darwin lebih besar dari tekanan di Tahiti. Akibatnya hujan yang seharusnya terjadi diwilayah Indonesia bergeser bergerak kearah timur, maka Indonesia mengalami kekeringan .

Akibat kekeringan, perusakan ozon oleh uap air berkurang. Pada saat kekeringan mendukung terjadinya kebakaran hutan di Indonesia yang menyebabkan emisi gas ke atmosfer bertambah banyak. Pada saat ini selain emisi gas dari industri dan transportasi emisi gas bertambah karena kebakaran hutan. Gas - gas tersebut ada yang bersifat sebagai prekursor ozon troposfer. Akibatnya pada saat ada peristiwa ENSO terjadi kenaikan ozon stratosfer dan troposfer karena perusakan oleh uap air berkurang dan pembentukan ozon troposfer bertambah karena bertambahnya ozon prekursor akibat kebakaran hutan.

1.3.1.4. Pengaruh antropogenik pada ozon troposfer.

Gas CH₄, CO, NO_x, NMHC (Non Metan Hidro Carbon), merupakan ozon prekursor yang sangat berpengaruh pada pembentukan ozon troposfer. Gas ini dihasilkan oleh industri, kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, biomasa serta emisi gas hasil kebakaran hutan. Contoh reaksi pembentukan ozon troposfer karena pengaruh CH₄ sebagai ozon prekursor sebagai berikut:



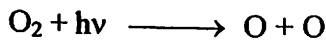


1.3.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi ozon stratosfer

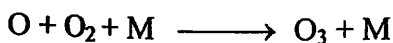
Pengaruh alamiah pada ozon stratosfer antara lain pengaruh aktivitas matahari, pengaruh musim, pengaruh QBO. Pengaruh antropogenik disebabkan bertambahnya emisi senyawa perusak ozon ke atmosfer yang dihasilkan oleh industri, kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, biomasa serta emisi karena kebakaran hutan.

1.3.2.1. Pengaruh aktivitas matahari pada ozon stratosfer

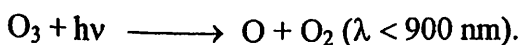
Pengaruh matahari pada ozon stratosfer dapat ditunjukkan pada reaksi pembentukan ozon menurut Chapman, yang merupakan reaksi fotolisa molekul oksigen yang menyerap radiasi ultraviolet panjang gelombang $\lambda < 243 \text{ nm}$.



Atom oksigen yang terbentuk ini bereaksi secara cepat membentuk ozon



Selanjutnya O_3 mengalami reaksi fotolisa

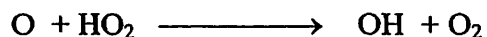
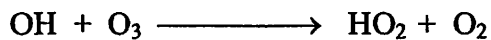


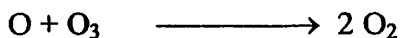
Reaksi ini akan berulang terus, sehingga tidak ada kehilangan ozon.

Reaksinya memerlukan radiasi matahari sehingga produksi ozon paling banyak di daerah tropis. Selama pembentukan dan perusakan ozon dipengaruhi radiasi UV dari matahari maka ada korelasi antara konsentrasi ozon dengan siklus sunspot 11 tahun. Sunspot mengemisikan radiasi elektromagnetik yang tinggi, sehingga kenaikan radiasi UV akan mendukung produksi ozon. Pada saat matahari aktif fluks radiasi makin besar sehingga pembentukan ozon stratosfer makin besar, sebaliknya pada waktu matahari tenang pembentukan ozon di stratosfer lebih kecil.

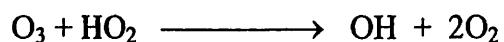
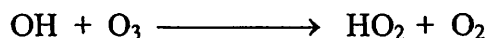
1.3.2.2. Pengaruh musim pada ozon stratosfer

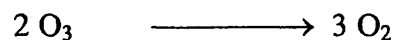
Lapisan troposfer mengandung banyak uap air, sedangkan stratosfer mengandung sedikit uap air. Uap air dari troposfer dapat masuk ke lapisan stratosfer dengan mekanisme "cold trap" di tropopaus sebagai berikut: Temperatur rendah di tropopaus menyebabkan air membeku secara efektif dan ini dapat ditranspor ke stratosfer. Sumber lain, uap air di stratosfer dihasilkan dari oksidasi metan yang sampai ke stratosfer. H₂O adalah sumber senyawa OH yang dapat merusak ozon dengan mekanisme sebagai berikut:





Mekanisme reaksi juga dapat terjadi sebagai berikut:





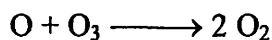
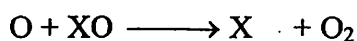
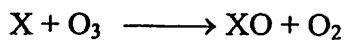
Pada musim hujan lapisan troposfer mengandung banyak uap air, ada kemungkinan uap air yang ditranspor ke lapisan stratosfer bertambah.

1.3.2.3. Pengaruh QBO (Quasi Biennial Oscillation)

Quasi Biennial Oscillation (QBO) adalah perubahan angin baratan dan timuran di stratosfer didaerah ekuator dengan perioda 24 – 30 bulan. Perubahan ini berpengaruh pada transpor di atmosfer. Pada saat bertiup angin baratan terjadi penurunan ozon 6% – 8% pada lintang kutub selatan bagian tengah. Sebaliknya pada saat bertiup angin timuran terjadi surplus ozon dari pada hasil pengukuran umumnya.

1.3.2.4. Pengaruh antropogenik

Adanya unsur lain yang masuk ke stratosfer, reaksi kesetimbangan pembentukan ozon menurut reaksi Chapman diatas terganggu dan dapat menyebabkan berkurangnya O₃ di stratosfer. Unsur yang menyebabkan merusakkan ozon antara lain adalah H₂O, N₂O, CH₃Cl, CFC, CH₃Br dan halon. Unsur ini akan diubah menjadi senyawa yang lebih aktif merusak ozon seperti NO, NO₂, OH, HO₂, Cl, ClO, Br, BrO. Senyawa diatas menjadi katalisator pada reaksi merusakkan, reaksinya :



X adalah katalisator yaitu senyawa – senyawa NO, NO₂, OH, HO₂, Cl, ClO, Br, BrO

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penipisan lapisan ozon terbesar terjadi pada awal musim semi di Antartik, dimana nilai ozon total turun sampai 65% sejak 1975, sedangkan di Artik pada periode ini sekitar 12%. Di lintang menengah ozon total menurun sekitar 5% per dekade.

Hasil penelitian yang dilakukan di Canada, setelah penandatanganan Montreal Protokol tahun 1987 dan satu dekade kemudian tahun 1997, menunjukkan penurunan nilai ozon total tertinggi 12% dan terendah 3%. Sementara hasil Montreal Protokol menunjukkan kenaikan laju konsentrasi CFCs secara perlahan dan mulai menurun sejak tahun 1990. Ini disebabkan karena belum semua negara mematuhi secara penuh ketentuan Montreal Protokol. Konsentrasi klor di stratosfer diharapkan mencapai puncak 3,5 ppb, kemudian menurun secara gradual beberapa tahun kemudian, sehingga mencapai level normal sekitar 0,1 ppb setelah tahun 2100 (Wardle, D.I., et al, 1987)

3. DATA DAN METODE

3.1. Data

Data ozon total global diperoleh dari TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 89,5⁰ Lintang Utara sampai 89,5⁰ Lintang Selatan; 179,5⁰ Bujur Barat – 179,5⁰ Bujur Timur dengan resolusi 1⁰ lintang x 1,25⁰ bujur) berupa rata-rata bulanan. Data ozon total untuk wilayah Indonesia sekitar 6,5⁰ Lintang Utara sampai 11,5⁰ Lintang Selatan; 91,875⁰ – 144,375⁰ Bujur Timur, dari tahun 1979 – 2004. Data berupa rata-rata bulanan dengan resolusi 1⁰ lintang kali 1,25⁰ bujur, diperoleh dengan mencropping data ozon total global sesuai dengan koordinat Indonesia

3.2. Metode

Pertama akan dilakukan pengolahan data menggunakan software perataan, berupa rata-rata spasial, latitude dan longitude serta rata-rata tahunan, dari tahun 1979 – 2004, serta time series ozon total di Indonesia periode 1979-2004, untuk analisis pola dan kecenderungan ozon total di Indonesia. Untuk membandingkan ozon total pada kondisi sebelum dan sesudah Montreal Protokol, dihitung penurunan ozon total dari tahun 1980 – ke tahun 2000 dan dibuat pola serta petanya menggunakan software Grads dan ArcView, sehingga dapat dilihat penipisan lapisan ozon pada periode itu.

Untuk validasi data ozon total dari TOMS digunakan data ozon total dari Brewer di Bandung tahun 1996, dengan cara mencropping ozon total di Jawa Barat dari ozon total di Indonesia pada tahun yang sama, begitu pula untuk ozon total di Bandung diperoleh dengan mencropping ozon total di Jawa Barat pada tahun yang sama.

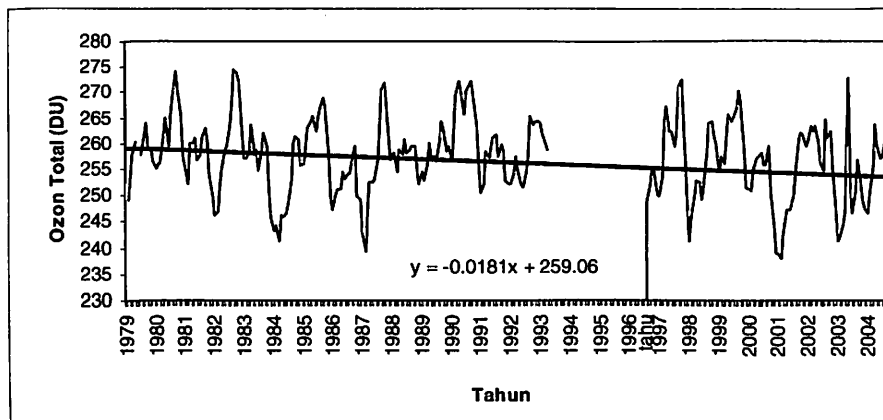
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil yang diperoleh berupa :

- Time series ozon total di Indonesia periode 1979 – 2004
(Gambar 4.1)
- Perbandingan rata-rata bulanan ozon total (DU) periode 1979-1992 dengan periode 1997-2004.(Gambar 4.2).
- Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 1980 (Gambar 4.3)
- Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 2000 (Gambar 4.4)
- Perbedaan (%) ozon total di Indonesia tahun 1980 – 2000
(Gambar 4.5)

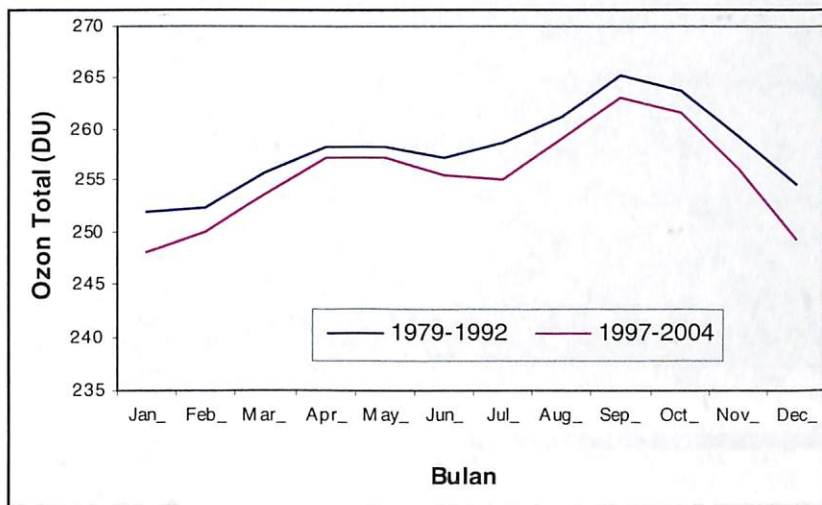
- Variasi musiman ozon total di Indonesia periode 1979-2004
(Gambar.4.6.)
- Variasi tahunan ozon total di Indonesia tahun 1979 – 2004
(Gambar.4.7)
- Variasi rata-rata ozon total (DU) pada Lintang dan musim yang berbeda di Indonesia (Gambar 4.8).
- Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 1996 (Gambar 4.9)
- Variasi spasial ozon total di Jawa Barat tahun 1996
(Gambar 4.10)
- Variasi spasial ozon total di Bandung tahun 1996 (Gambar 4.11)
- Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 2004
(Gambar 4.12)

4.2. Pembahasan



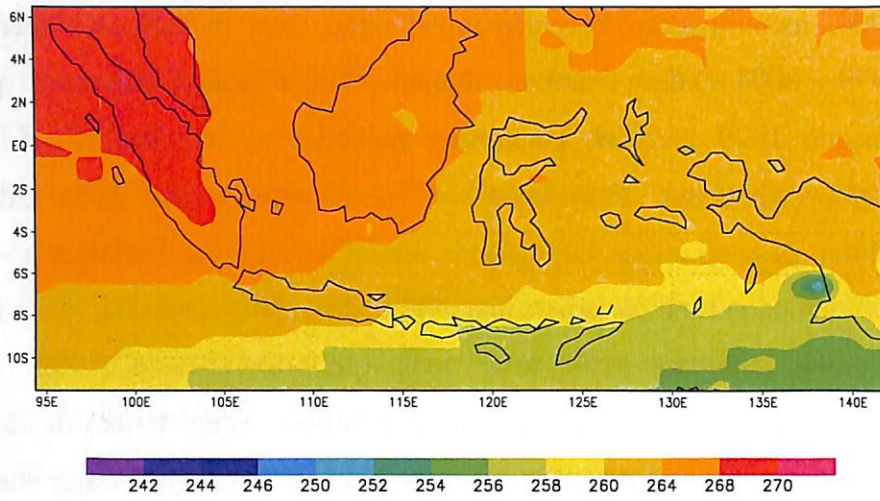
Gambar4.1. Time seris Ozon Total di Indonesia periode tahun 1979 – 2004

Gambar 4.1. Time seris ozon total di Indonesia tahun 1979 – 2004, menunjukkan kecenderungan ozon total di Indonesia periode 1979 – 2004. Dalam Gambar tampak ozon total di Indonesia pada periode 1979 – 2004, cenderung menurun sekitar 0,012 DU atau 0,005% per tahun. Penurunan konsentrasi ozon total ini juga dapat dilihat pada Gambar 4.2, dimana secara keseluruhan nilai rata-rata bulanan ozon total pada periode 1997 – 2004 lebih kecil dari pada nilai rata-rata bulanan ozon total pada periode 1979 - 1992. Bila dibandingkan dengan penurunan / penipisan yang terjadi di lintang menengah 5% per dekade, masih jauh lebih kecil. Ini wajar karena Indonesia terletak di daerah tropis yang merupakan daerah produksi ozon. Penurunan ini selain disebabkan oleh faktor alami juga oleh faktor antropogenik (CFCs , dan lainnya).



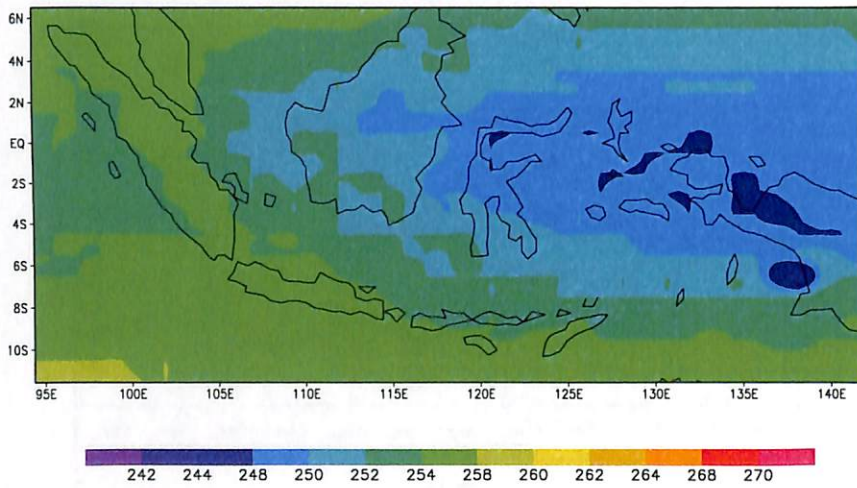
Gambar 4.2. Perbandingan rata-rata bulanan ozon total (DU) periode 1979-1992 dengan periode 1997-2004.

Ozon total di Indonesia tahun 1980

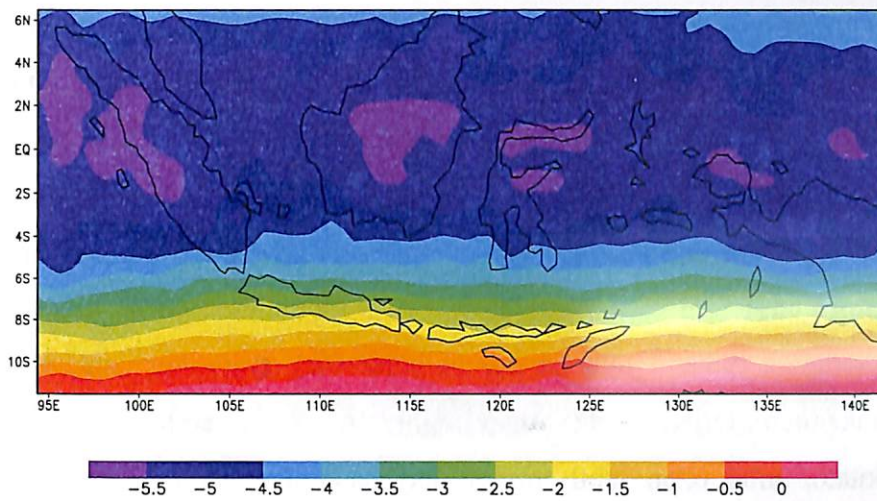


Gambar 4.3. Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 1980

Ozon total di Indonesia tahun 2000



Gambar 4.4. Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 2000



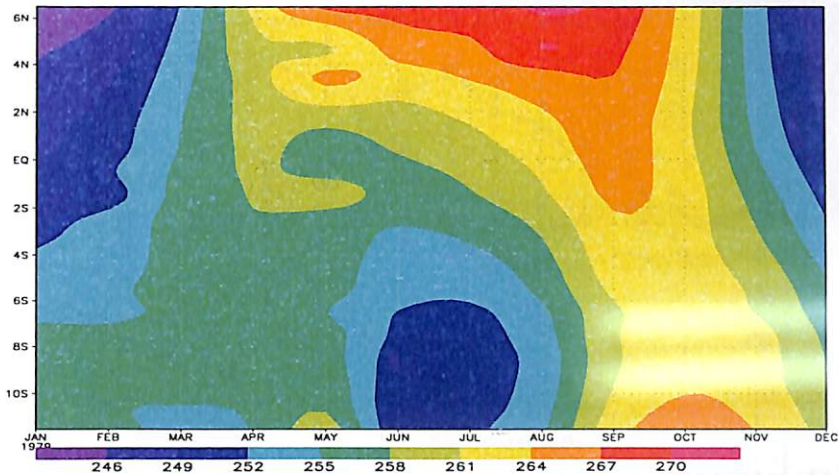
Gambar 4.5. Perbedaan (%) spasial ozon total di Indonesia (1980 – 2000)

Gambar 4.3. dan Gambar 4.4 adalah Variasi spasial ozon total di Indonesia tahun 1980 dan tahun 2000. Kedua Gambar ini menunjukkan kondisi ozon total di Indonesia sebelum dan sesudah Montreal Protokol ditandatangani, dan keduanya pada posisi matahari aktif. Konsentrasi ozon total pada tahun 1980 lebih besar dibanding tahun 2000, berarti ada penurunan, dan ini ditunjukkan pada Gambar 4.5. Perbedaan (%) yang terjadi pada tahun 2000 dibandingkan tahun 1980. Bila dibandingkan nilai konsentrasi ozon total pada tahun 1980 dan tahun 2000, penurunan ozon terendah 0,5% terjadi di Indonesia bagian selatan dan tertinggi 5,5% terjadi di Indonesia bagian utara. Hal ini sama dengan apa yang telah diteliti di Canada, Gambar 4.13. (D.I. Wardle, 1987 – 1997) masih menunjukkan penipisan lapisan ozon, penipisan tertinggi 12% dan terendah 3%. Berarti walaupun pengurangan penggunaan CFCs telah

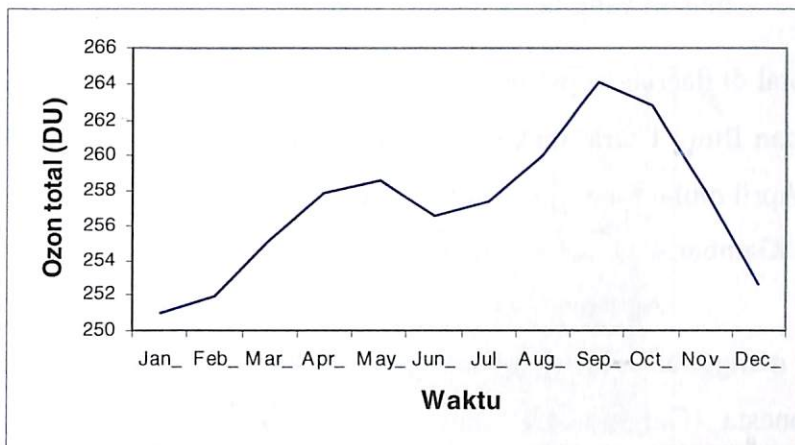
dilakukan belum nampak manfaat dari Montreal Protokol. Ini kemungkinan disebabkan karena belum semua negara mematuhi secara penuh anjuran Montreal Protokol. Disamping itu rata-rata "life time" CFCs di atmosfer sangat panjang sekitar 110 tahun.

Gambar 4.6 menunjukkan variasi musiman ozon total di Indonesia periode 1979-2004, pada Gambar tampak di utara ekuator ozon maksimum pada bulan Juni – Agustus dimana posisi matahari berada di utara ekuator, sedangkan di selatan ekuator ozon maksimum terjadi pada bulan September – Nopember. Di utara ekuator nilai ozon lebih tinggi dari pada di selatan ekuator, ini disebabkan karena dinamika atmosfer yang terjadi di utara berbeda dengan di selatan ekuator.

Nilai ozon total pada bulan September, Oktober, Nopember (peralihan dari kemarau ke penghujan) lebih tinggi dari nilai ozon total pada bulan Maret, April, Mei (peralihan dari penghujan ke kemarau) dan Gambar.4.8. Variasi rata-rata ozon total pada Lintang dan musim yang berbeda, disini tampak ozon maksimum pada bulan September, Oktober dan mulai menurun pada bulan November sampai Desember, ini disebabkan karena Indonesia sebagian besar berada di Lintang Selatan dan pada saat itu posisi matahari berada di ekuator dan menuju ke selatan. Bila dibandingkan dengan Gambar.4.8a, variasi tahunan

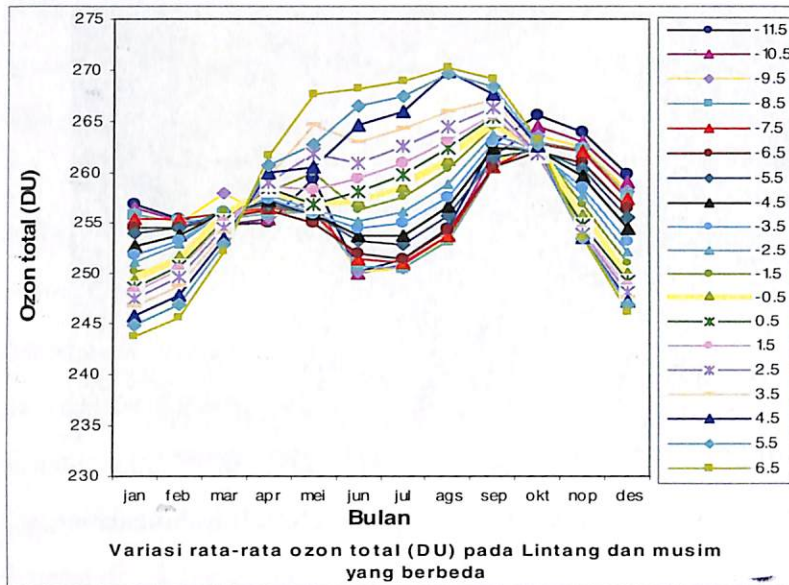


Gambar.4.6. Variasi musiman ozon total (DU) di Indonesia periode 1979-2004



Gambar.4.7. Variasi musiman ozon total (DU) di Indonesia tahun 1979 - 2004

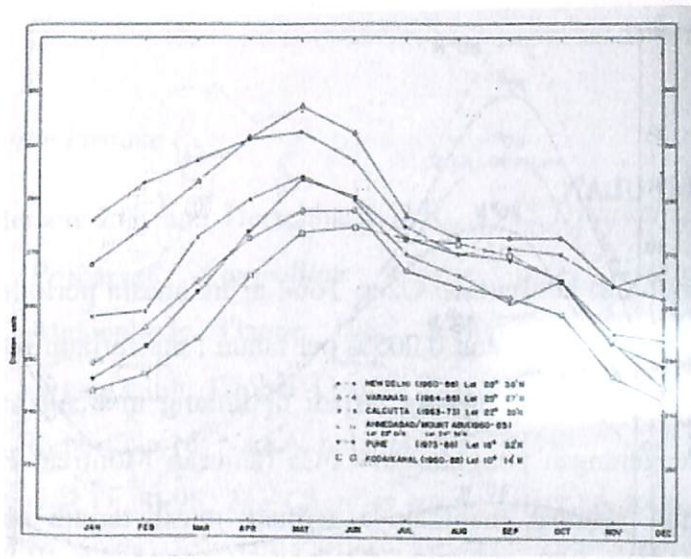
Gambar. 4.7. menunjukkan variasi musiman ozon total di Indonesia periode 1979-2004, pada Gambar tampak



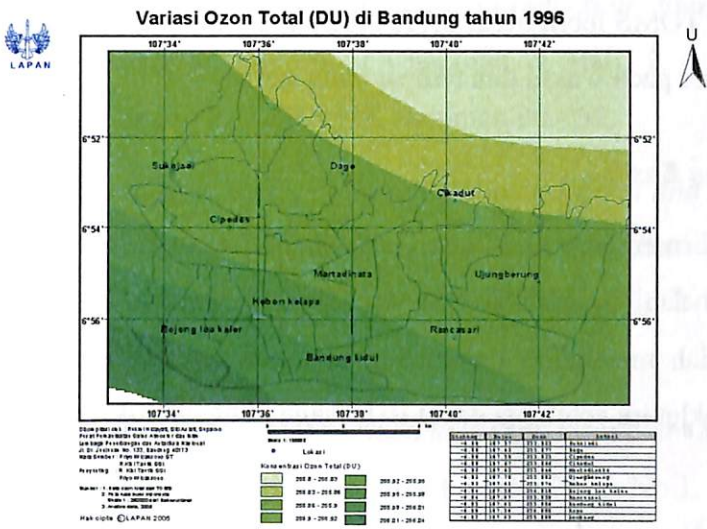
Gambar 4.8. Variasi rata-rata ozon total (DU) pada Lintang dan musim yang berbeda di Indonesia

ozon total di daerah tropis India, adalah kebalikan karena India berada di Belahan Bumi Utara, maka ozon total maksimum terjadi pada bulan Maret, April mulai menurun lagi pada bulan Mei sampai Juni.

Gambar 4.11. adalah variasi ozon total (DU) di Bandung pada bulan Agustus – Desember 1996, yang diperoleh dari hasil cropping menggunakan soft ware ArcView, dari variasi ozon total (DU) di Indonesia (Gambar 4.9) dan variasi ozon total (DU) di Jawa Barat (Gambar 4.10) pada waktu yang sama. Dari sini diperoleh nilai ozon total untuk daerah Cipedes 255,9 DU,



Gambar 4.8a. Variasi tahunan ozon total di India tahun 1960 - 1988



Gambar 4.11. Peta Variasi Ozon Total (DU) di Bandung (Agustus – Desember 1996)

sedangkan data Brewer pada waktu dan tempat yang sama (stasiun – LAPAN Bandung) menunjukkan nilai rata-rata 241 DU, berarti data

ozon total dari TOMS lebih besar sekitar 5,7 % bila dibandingkan dengan Brewer.

5. KESIMPULAN

Penurunan konsentrasi Ozon Total di Indonesia periode 1979 – 2004, sekitar 0,012 DU atau 0,005% per tahun , masih jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan yang terjadi di lintang menengah 5% per dekade. Pengurangan penggunaan CFCs (anjuran Montreal Protokol) masih belum nampak manfaatnya, terbukti masih terjadi penurunan konsentrasi ozon pada tahun 2000 bila dibandingkan dengan tahun 1980, penurunan terendah 0,5% yang terjadi di Indonesia bagian selatan dan tertinggi 5,5% yang terjadi di Indonesia bagian utara. Data ozon total dari TOMS lebih besar 5,7% dibandingkan dengan data ozon total dari Brewer pada waktu dan tempat yang sama.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada saudara Priyo Wicaksono ST dan Kiki Taufik SSi sebagai nara sumber dan semua pihak yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan proses penerbitan booklet ini sehingga dapat terlaksana dengan baik.

Daftar Pustaka

- Anderson J.G. and Herschbach D.R., 1985, *Tropospheric Chemistry: Processes Controlling Ozone and Hydroxyl Radical*, Atmospheric Ozone 1985 Volume I, World Meteorology Organization Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No.16, NASA, halaman 117 – 118
- Bojkov R.D., 1995, *The Changes ozone Layer*, A joint publication of World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme on the occasion of fiftieth anniversary of the United Nations, halaman 18.
- Colls J., 1997, *Air Pollution An introduction*, Published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 2 – 6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK. Halaman 30 - 32.
- Harrison R.M., 1997, *Pollution: Causes, Effects and Control*, Third Edition, Publish by The royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton road, Cambridge, CB4 4WF, UK. Page 180 –183
- Kenry I. G. M., 1993, *Ground Level Ozone in Montreal, Canada*, Atmospheric Environment Vol. 27B, No.1. Printed in Great Britain, Pergamon Press Ltd. Halaman 93.
- Ogawa T., 1993, *Atmospheric Ozone Depletion by Chlorofluorocarbon: its Mechanism and Facts*. Dipresentasikan dalam One Day Seminar on the Ozone Layer Protection and ODS Phase out, Jakarta 4 October 1993, halaman 1, 7.
- Seinfeld J.H. and Pandis S.N., 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Publish by John Wiley and Sons, New York – Chichester

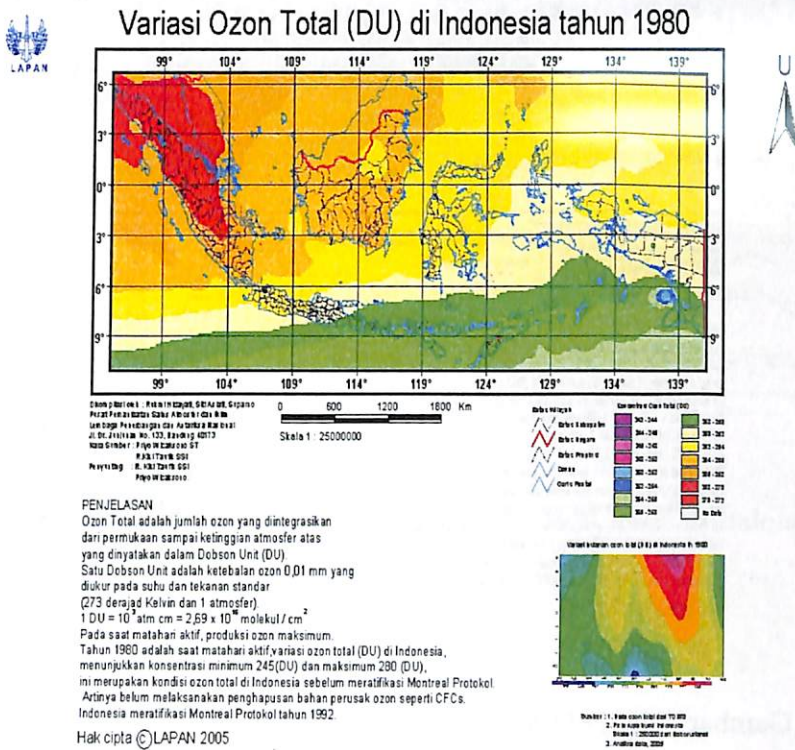
– Weinheim – Brisbane – Singapore – Toronto, halaman 239, 240.

Sinambela W., Rukmi Hidayati, Siti Asiati, 2002, "*Kaitan Aktivitas Matahari Jangka Panjang dengan Variasi Ozone total di Atas Jakarta dan Watukosek*", JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA, Vol.3, No. 1 Januari – Maret 2002 diterbitkan oleh Badan Meteorologi dan Geofisika, Departemen Perhubungan Republik Indonesia, Jakarta. ISSN 1411 – 3082, halaman 50 – 52.

Wallace J.M. and Hobbs P.V., 1977, *Atmospheric Science An Introduction Survey*, University of Washington, Published by Academic Press, Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, Orlando - San Diego - New York – Austin – Boston – London – Sydney - Tokyo – Toronto. Halaman 326 – 329.

Wardle D.I., Kerr J.B., Elroy Mc. and Francis D. R., 1997, *Ozone Chemistry: Simulation and Depletion*, *Ozone Science: A Canadian Perspective on the Changing Ozone Layer*, halaman 15.

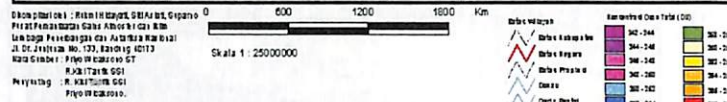
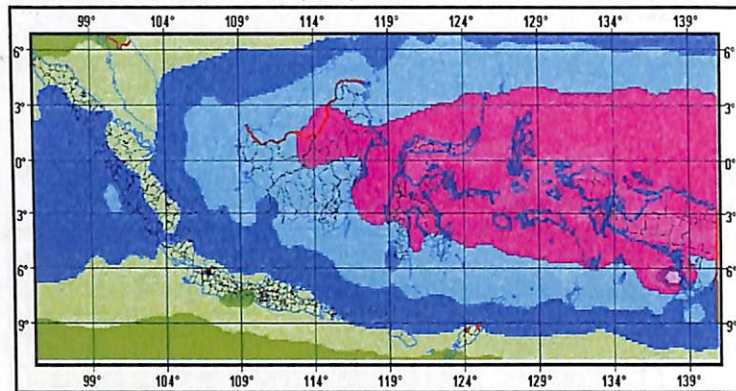
LAMPIRAN



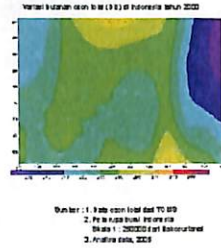
Gambar 4.3a. Peta Variasi Spasial Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 1980



Variasi Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 2000



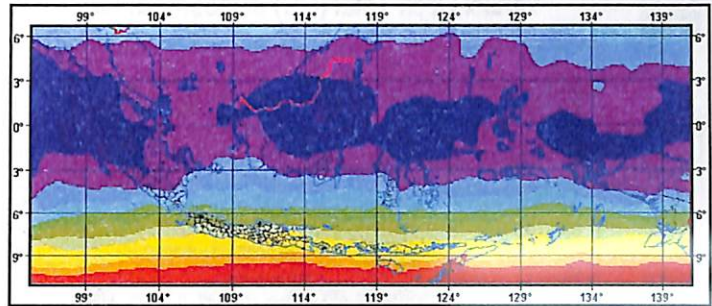
PENJELASAN
 Ozon Total adalah jumlah ozon yang diintegrasikan dari permukaan sampai ketinggian atmosfer atas yang dinyatakan dalam Dobson Unit (DU). Satu Dobson Unit adalah ketebalan ozon 0,01 mm yang diukur pada suhu dan tekanan standar (273 derajat Kelvin dan 1 atmosfer).
 $1 \text{ DU} = 10^7 \text{ atm cm} = 2,69 \times 10^{16} \text{ molekul / cm}^2$
 Pada saat matahari aktif, produksi ozon maksimum. Tahun 2000 adalah saat matahari aktif, variasi ozon total (DU) di Indonesia, menunjukkan konsentrasi minimum 235(DU) dan maksimum 265 (DU), ini merupakan kondisi ozon total di Indonesia sesudah meratifikasi Montreal Protokol. Indonesia meratifikasi Montreal Protokol tahun 1992. Namun disini masih nampak penipisan lapisan ozon, ini disebabkan karena life time CFCs sangat panjang sekitar 110 tahun.



Gambar 4.4a. Peta Variasi Spasial Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 2000



Perbedaan (%) Ozon Total 1980 vs 2000



Ditampilkan oleh : Rumi Hidayati, Dr. Agus Suparno
Pusat Pemantauan Sains Atmosfer dan Suhu
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Jughian No. 122, Bandung 40173
Nara Sumber : Piyu Wicaksono ST
R.Kiki Taufik S.Si
Penyunting : R. Rizki Taufik S.Si
Piyu Wicaksono.

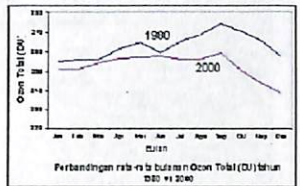
0 600 1200 Km
Skala 1 : 25000000

Perbedaan (%) Ozon Total 1980 vs 2000	
Warna	Perbedaan (%)
Biru	-2,75 - -2,25
Ungu	-2,25 - -1,75
Biru tua	-1,75 - -1,25
Biru muda	-1,25 - -0,75
Hijau	-0,75 - -0,25
Kuning	-0,25 - 0,25
Oranye	0,25 - 0,75
Merah	0,75 - 1,25
Merah tua	1,25 - 1,75
Merah muda	1,75 - 2,25
Merah jambu	2,25 - 2,75
Merah gelap	2,75 - 3,25
Merah hitam	3,25 - 3,75

PENJELASAN
Perbedaan (%) ozon total 1980 vs 2000, menunjukkan adanya penurunan lapisan ozon dari tahun 1980 ke tahun 2000. Penurunan tersebut 0,2% terjadi di Indonesia bagian Selatan dan tertinggi 5,7% terjadi di Indonesia bagian Utara. Penurunan ini masih jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan yang terjadi di Lintang tinggi, sehingga berendah 2% dan tertinggi 12% (D. I. Wardle, 1987:1607).

- Sumber 1. Data ozon total dari TOMS
- 2. Peta topografi bumi Indonesia
- Skala 1 : 250000 dari Bakosurtanal
- 3. Analisa data, 2005

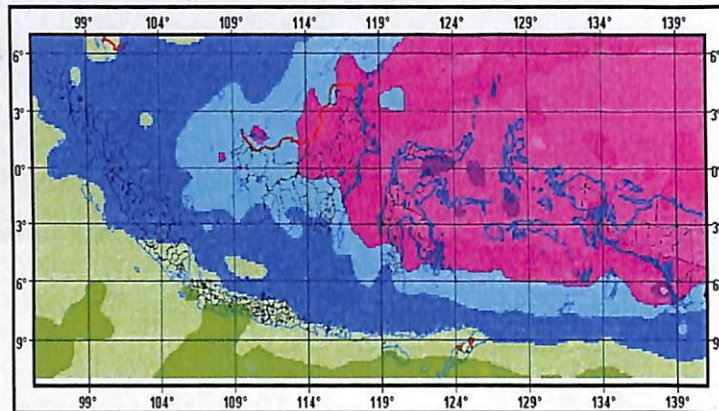
Hak cipta ©LAPAN 2005



Gambar 4.5a. Peta Perbandingan (%) Ozon Total di Indonesia (1980 – 2000)



Variasi Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 1996



Dibuat oleh : Rita Hidayati, Dita Nur, Gupana
Pusat Penelitian Sains Atmosfer dan Klimat
Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat
Jl. Dr. Jatiwala No. 120, Cikarang Barat
Muningsari, Cirebon 47151
KARAWANG
Penyunting : R. Kholifah Sidi
Prigunokomoso

0 600 1200 1800 Km
Skala 1 : 25000000

Simbol Hidrografi
- Garis Batas Negara
- Garis Perairan
- Garis Pantai
- Garis Perairan
- Garis Pantai

Konvensi Ozon Total (DU)
- 244 - 248
- 248 - 252
- 252 - 256
- 256 - 260
- 260 - 264
- 264 - 268
- 268 - 272
- 272 - 276
- 276 - 280
- 280 - 284
- 284 - 288
- 288 - 292
- No Data

PENJELASAN
Ozon Total adalah jumlah ozon yang diintegrasikan dari permukaan sampai ketinggian atmosfer atas yang dinyatakan dalam Dobson Unit (DU). Satu Dobson Unit adalah ketebalan ozon 0.01 mm yang diukur pada suhu dan tekanan standar (273 derajat Kelvin dan 1 atmosfer).
 $1\text{ DU} = 10^{-3}\text{ atm cm} = 2,69 \times 10^{16}\text{ molekul/cm}^2$
Pada saat matahari aktif, produksi ozon maksimum. Tahun 1996 adalah saat matahari pasif, variasi ozon total (DU) di Indonesia tahun 1996, menunjukkan konsentrasi minimum 244(DU) dan maksimum 258 (DU).

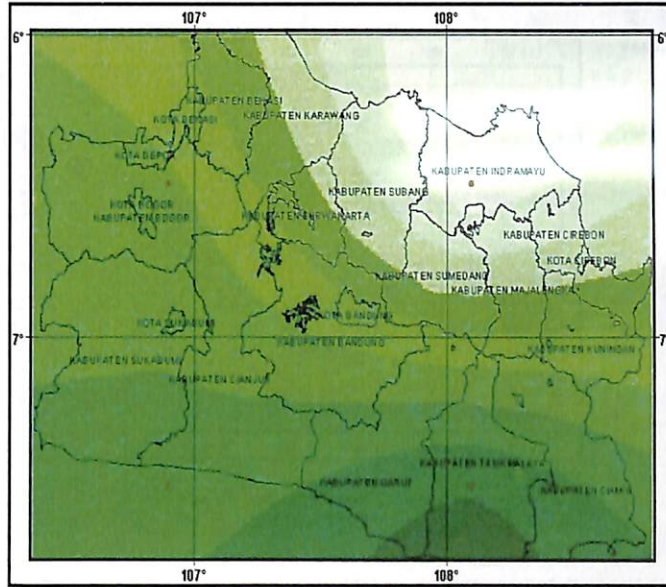
Data:
1. 3 data ozon total per 10 hari
2. Periode waktu 1996
3. Skala 1 : 25000000 dan Koordinat
4. Versi data, 2005

Hak cipta ©LAPAN 2005

Gambar 4.9.Peta Variasi Ozon Total (DU) di Indonesia
(Agustus – Desember 1996)



Variasi Ozon Total (DU) di JABAR tahun 1996



Dibuat oleh : Rini Hidayat, GIANWA, GSP-01
Pusat Penelitian dan Pengembangan RIM
Lingkungan Penelitian dan Pengukuran Udara
Jl. Dr. Jatiatm. No. 121, Bandung 40177
No. Sinder : Pajowidjandjo ST
KABITAYR 051
Pevyitay : R. KAHAYR 051
Piyowidjandjo
Skala 1 : 1 500 000 dan 70 000
1. Peta Rupa Bumi, Peta Topografi
2. Data Data, dan Informasi
3. Aneka Data, 2006

Skala 1 : 1500000

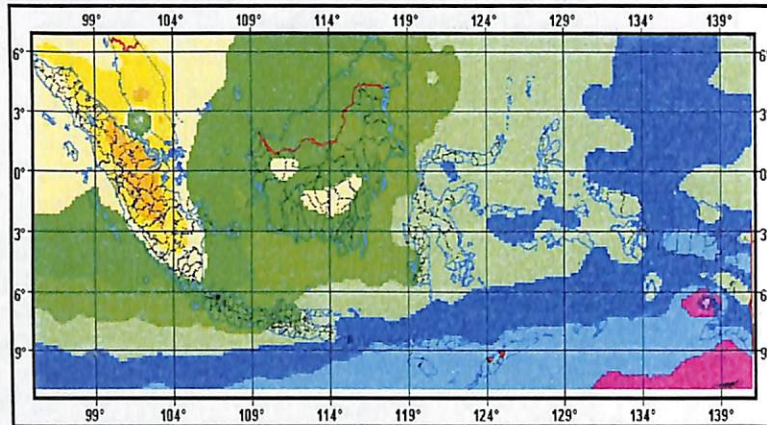
Konsentrasi Ozon Total (DU)	
254.5 - 254.9	256.1 - 256.4
254.9 - 255.2	256.4 - 256.7
255.2 - 255.5	256.7 - 257
255.5 - 255.9	257 - 257.3
255.9 - 256.1	257.3 - 257.6

Hak cipta © LAPAN 2006

Gambar 4.10. Peta Variasi Ozon Total (DU) di Jawa Barat (Agustus – Desember 1996)

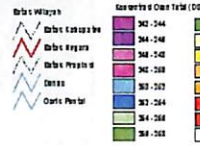


Variasi Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 2004



Dibuat di Jakarta, Kantor LAPAN
Pusat Pemantauan Suhu Atmosfer dan Bumi
Unit Kerja Penelitian dan Pengukuran
Jl. Dr. Juanda No. 133, Kebayoran Baru
Jakarta Selatan 12130
Telp. (021) 72611000
Pencetakan : R. Kiki Triandani
Foto : W. Kusuma.

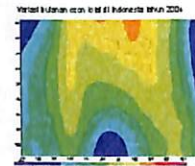
0 600 1200 1800 Km
Sekala 1 : 25000000



PENJELASAN

Ozon Total adalah jumlah ozon yang diintegrasikan dari permukaan sampai ketinggian atmosfer atas yang dinyatakan dalam Dobson Unit (DU). Satu Dobson Unit adalah ketebalan ozon 0,01 mm yang diukur pada suhu dan tekanan standar (273 derajat Kelvin dan 1 atmosfer). $1 \text{ DU} = 10^{17} \text{ atm cm} = 2,69 \times 10^{16} \text{ molekul/cm}^2$. Pada saat matahari aktif, produksi ozon maksimum. Tahun 2004 adalah saat matahari menjelang pasif, variasi ozon total (DU) di Indonesia tahun 2004, menunjukkan konsentrasi minimum 244 (DU) dan maksimum 266 (DU).

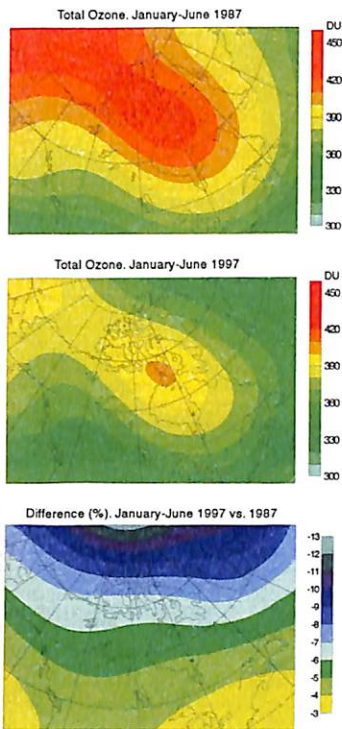
Hak cipta © LAPAN 2005



Daftar: 1. Data ozon total dari TOB
2. Pola angin umum Indonesia
3. Analisis data 2005

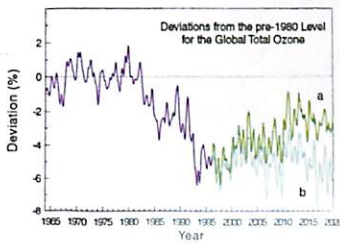
Gambar 4.12. Peta Variasi Ozon Total (DU) di Indonesia tahun 2004

How Has the Ozone Layer Over Canada Changed Since 1987?



The upper map shows average ozone levels over Canada for January-June 1987, while the middle map shows the same information for January-June 1997. The percentage differences between the two periods are plotted in the lower map, which shows declines ranging from 3% over southern Canada and about 4% over the Prairies up to 12% in the high Arctic. Although these differences are consistent with decadal trends, a comparison of other years, such as 1985 and 1995, would yield different results. The maps have been constructed from both ground-based and satellite measurements.

When Might the Recovery of the Ozone Layer Be Detectable?



The graph shows the global total ozone record from 1964 to 1996 and two hypothetical projections based on different scenarios. Branch (a), which expresses the best case, assumes that the Montreal Protocol and its amendments will be fully implemented and that concentrations of chlorine and bromine will decline according to the projections contained in the 1994 UNEP Assessment. It also assumes that ozone depletion has been due only to known ozone-depleting substances. Branch (b) is based on the assumption that concentrations of all ozone-depleting substances remain at their 1997 levels.

Although these projections are relatively crude, they do illustrate that several years will be needed to detect the start of any recovery and several more to estimate its extent. The actual recovery scenario is likely to be somewhere between these two cases because the protocol may not be fully adhered to by all parties and other factors or as yet unidentified substances may be contributing to depletion.

The graph is derived from a very simple statistical model of seasonally dependent, chlorine-induced depletion, modified by the addition of random noise and the quasi-biennial and solar cycles in ozone.

Gambar 4.13. Perbedaan Ozon Total di Canada sebelum (1987) dan sesudah penandatanganan Montreal Protokol (1997)