

ANALISIS POLA VARIABILITAS OZON STRATOSFER DAN BAHAN PERUSAK OZON SERTA PENGARUHNYA TERHADAP INDEKS UV DI WILAYAH INDONESIA TERKAIT PROTOKOL MONTREAL

ANALYSIS OF STRATOSPHERIC OZONE AND OZONE DEPLETION SUBSTANCES VARIABILITY IN QUALITY OF UV INDEX OVER INDONESIA RELATED TO MONTREAL PROTOCOL

Riris Ayu Wulandari¹ dan Kania Dewi²

Program Studi Teknik Lingkungan, FTSL, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha No. 10 Bandung 40132

Email: ririsayuwulandari@gmail.com dan kaniadewiitb@gmail.com

Abstrak: Ozon pada lapisan stratosfer berperan sebagai pelindung dari radiasi ultraviolet. Penggunaan bahan perusak ozon (BPO) pada kegiatan manusia membuat berkurangnya konsentrasi ozon stratosfer. Adanya Protokol Montreal dapat mengontrol produksi dan konsumsi BPO. Meskipun demikian, beberapa penelitian menyatakan bahwa konsentrasi ozon stratosfer masih belum meningkat. Konsentrasi BPO yang berada di lapisan stratosfer (berupa BrO dan ClO) perlu diamati secara temporal dan spasial dengan menggunakan data satelit (sensor Microwave Limb Sounders (MLS) satelit Aura) sehingga ruang lingkup pengamatannya dapat lebih lama dan lebih luas. Lebih lanjut, konsentrasi ozon stratosfer yang rendah dapat mengakibatkan tingginya indeks UV (UVI). Penelitian ini difokuskan untuk wilayah Indonesia dari tanggal 1 Januari 2005 hingga 31 Januari 2017, dengan melakukan perhitungan korelasi antara BPO dan ozon stratosfer. Dari pembuatan profil vertikal, didapat bahwa konsentrasi ozon maksimum berada di ketinggian 10 hPa (31 km), konsentrasi BrO maksimum pada 31,6 hPa (24 km), dan konsentrasi ClO maksimum pada 2,1 hPa (42 km). Korelasi antara ozon dan BrO paling kuat (-0,58) berada pada ketinggian 6,8 hPa atau 33,5 km. Sementara itu, korelasi antara ozon dan ClO yang paling kuat (-0,43) berada pada ketinggian 4,6 hPa atau 36 km. Kaitan antara UVI dan ozon stratosfer dengan nilai korelasi negatif terbesar (-0,5987) berada pada ketinggian 1 hPa atau 47,7 km. Sementara itu, pengurangan jumlah ozon total di atmosfer cukup mempengaruhi UVI dengan korelasi negatif sebesar -0,25.

Kata kunci: ozon stratosfer, BPO, indeks UV, MLS/Aura

Abstract: *Ozone in the stratospheric layer acts as a protector of ultraviolet radiation. The use of ozone-depleting substances (ODS) in human activities has reduced the concentration of stratospheric ozone. The existence of the Montreal Protocol can control ODS production and consumption. Nonetheless, several studies suggest that stratospheric ozone concentration has not increased. ODS concentrations in the stratosphere layer (in the form of BrO and ClO) need to be observed temporally and spatially using satellite data (Microwave Limb Sounders (MLS) Aura satellite sensor) so that the scope of observation can be longer and wider. Low stratospheric ozone concentrations can result in a high UV (UVI) index. This study focused on Indonesia from January 1, 2005 to January 31, 2017, by calculating the correlation between ODS and stratospheric ozone. From the vertical profile, it was found that the maximum ozone concentration was at 10 hPa (31 km), maximum BrO concentration at 31.6 hPa (24 km), and maximum ClO concentration at 2.1 hPa (42 km). The strongest correlation between ozone and*

BrO (-0.58) occur at 6.8 hPa or 33.5 km. Meanwhile, the strongest correlation between ozone and ClO (-0.43) occur at 4.6 hPa or 36 km. The greatest negative correlation between UVI and stratospheric ozone (-0.5987) occurred at 1 hPa or 47.7 km. Meanwhile, the reduction in total ozone in the atmosphere affected increasing of UVI with a negative correlation of -0.25.

Keywords: *stratospheric ozone, ODS, UV index, MLS/Aura*

PENDAHULUAN

Ozon stratosfer berperan penting dalam melindungi Bumi dari radiasi ultraviolet (UV) dari matahari. Namun, banyaknya penggunaan bahan-bahan kimia oleh industri yang merusak lapisan ozon stratosfer, yang disebut dengan bahan perusak ozon (BPO), mengakibatkan berkurangnya konsentrasi ozon stratosfer. Sektor industri dan transportasi diketahui penyumbang terbesar pencemaran udara terutama di daerah perkotaan (Maulana, 2016). Contoh dari penggunaan BPO di industri adalah HCFC sebagai pengganti sementara bahan CFC yang digunakan dalam pendingin, busa polyurethane (PU foam) dan pelarut (Wang dkk., 2015).

Protokol Montreal dapat dengan sukses mengontrol produksi dan konsumsi BPO sehingga jumlahnya di atmosfer semakin berkurang. Penelitian Bornman dkk. (2015) menyebutkan bahwa mulai hilangnya BPO dikarenakan oleh kesuksesan Protokol Montreal. Namun, penelitian Ball dkk. (2018) menyatakan bahwa masih terdapat penurunan konsentrasi ozon pada lapisan stratosfer bawah di wilayah 60° LS – 60° LU.

Jumlah BPO dan konsentrasi ozon yang berada di atmosfer perlu diamati variabilitasnya baik secara temporal maupun spasial. Penggunaan data satelit membantu dalam pengamatan tersebut untuk ruang lingkup yang lebih lama dan luas. Pada penelitian Nurlatifah dan Driejana (2017), data satelit digunakan sebagai data utama dan juga pembanding dari hasil model yang dilakukan. Hasil pengukuran satelit Aura dengan instrument Microwave Limb Sounder (MLS) milik NASA digunakan untuk mendapatkan data ozon dan BPO (yang akan diamati adalah klorin monoksida (ClO) dan bromin monoksida (BrO)).

Klorin monoksida (ClO) merupakan senyawa dengan jumlah paling banyak dan bersifat paling reaktif di lapisan stratosfer, serta merupakan salah satu dari bentuk variasi senyawa klorin (Cl). Sumber utama klorin adalah Chloro Fluoro Carbon (CFC) yang tersusun dari klor, fluor, dan karbon yang diemisikan dari beragam aktivitas manusia. Ketika CFC mencapai lapisan stratosfer, radiasi UV dengan energi tinggi mengurai CFC dan menghasilkan Cl (Komala, 2015 dan Ambarsari, 2010). Reaksi ClO di atmosfer ditunjukkan pada beberapa

persamaan berikut.



Bromin monoksida (BrO) bersifat sebagai bahan yang mempercepat perusakan ozon di atmosfer dalam reaksi kimia yang terjadi (Theys, 2004 dalam Ambarsari dan Komala, 2013). Reaksi BrO di atmosfer terdapat pada beberapa persamaan berikut.



Meskipun konsentrasi senyawa bromin (Br) di atmosfer lebih sedikit dibandingkan senyawa Cl, senyawa Br di stratosfer memiliki tingkat efisiensi yang cukup besar dalam perusakan ozon yaitu hingga 25% di lintang tengah dan 50% di kutub (Theys, 2009, dalam Komala, 2015). BrO dan senyawa Br lainnya berasal dari alam maupun kegiatan manusia.

Jumlah BPO yang terus bertambah dapat mengakibatkan penurunan konsentrasi ozon stratosfer dan berdampak pada meningkatnya radiasi ultraviolet pada permukaan bumi. Tingginya radiasi UV dapat berakibat pada meningkatnya potensi kejadian kanker kulit (Diffey, 2004). Banyaknya radiasi ultra violet di permukaan dapat dilihat dari indeks ultra violet atau ultraviolet index (UVI). Program indeks UV mulanya dikembangkan di Kanada pada tahun 1992 dengan memperhatikan potensi meningkatnya radiasi UV karena pengurangan konsentrasi ozon stratosfer. Tahun 1994, Organisasi Kesehatan Dunia atau World Health Organization (WHO) membuat standar indikator dari level paparan UV. Setelah itu, indeks UV menjadi suatu parameter yang digunakan secara luas dalam mengkarakterisasikan radiasi UV matahari (Fioletov dkk., 2010).

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Komala (2017), terdapat hubungan negatif yang kuat antara indeks UV dengan lapisan ozon. Dengan kata lain, adanya penurunan jumlah ozon di atmosfer mengakibatkan adanya peningkatan indeks UV. Peningkatan radiasi UV karena adanya pengurangan jumlah ozon di atmosfer juga ditunjukkan pada penelitian Roman dkk (2015).

Pengamatan mengenai variabilitas ozon stratosfer dan BPO di wilayah ekuator hanya sedikit dilakukan. Hal ini terkait dengan isu bahwa lubang ozon hanya terjadi pada wilayah Antartika. Meskipun demikian, pengamatan tersebut tetap perlu dilakukan untuk mengetahui kecenderungan konsentrasi ozon setelah adanya Protokol Montreal serta untuk mendeteksi secara dini apabila ditemukan adanya penurunan konsentrasi ozon stratosfer dan peningkatan

indeks UV. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pola variabilitas konsentrasi dan kaitannya antara ozon stratosfer dengan BPO (berupa ClO dan BrO) yang berada di wilayah Indonesia, serta kaitannya dengan indeks UV.

METODOLOGI

Cakupan wilayah dalam penelitian ini difokuskan pada wilayah Indonesia yang merupakan wilayah ekuator yang jarang mendapat perhatian mengenai penelitian konsentrasi ozon di lapisan stratosfer. Seluruh data O₃, ClO, dan BrO yang digunakan adalah data volume mixing ratio (vmr) yang memiliki resolusi temporal harian yang berasal dari satelit MLS/Aura milik NASA. Data mencakup wilayah Indonesia dengan koordinat 15° LS – 15° LU dan 90° – 150° BT, selama 13 tahun dari 1 Januari 2005 hingga 31 Desember 2017, dengan masing-masingnya sejumlah 4.707 data (dikarenakan terdapat beberapa hari yang tidak ada data) dan total keseluruhan data yang akan dikerjakan berjumlah 14.121 data. Nilai UVI dan ozon total yang digunakan diperoleh dari pengukuran oleh satelit OMI/Aura. Data mengenai jumlah penggunaan HCFC dan Metil bromida (dalam satuan ton) disediakan oleh KLHK.

Pengerjaan penelitian ini didasarkan pada penelitian Komala (2015 dan 2017) yang terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu pengerjaan deret waktu (time series) dan korelasi antara O₃ dengan BPO yang berada di stratosfer (BrO dan ClO) dan sumber di permukaan bumi (HCFC dan Metil bromida), serta pengerjaan deret waktu dan korelasi antara ozon stratosfer dan ozon total dengan indeks UV.

Deret waktu dan korelasi antara O₃ dengan BPO

Untuk mendapatkan pola variabilitas temporal dari masing-masing nilai O₃, ClO, dan BrO, terlebih dahulu dibuat plot deret waktu. Deret waktu dibuat pada ketinggian tertentu dimana nilai konsentrasi O₃, ClO, dan BrO maksimum yang ditentukan berdasarkan profil vertikal yang telah dibuat sebelumnya. Analisis deret waktu dibuat juga dalam rata-rata waktu bulanan dan tahunan, untuk mendapat pola variabilitas. Perhitungan deviasi ($x - \bar{x}$) dilakukan untuk setiap variabel, O₃, ClO, dan BrO. Nilai deviasi yang terbentuk kemudian dibuat juga plot deret waktunya untuk membantu dalam menganalisis pola variabilitas masing-masing variabel yang diamati. Pengamatan variabilitas ozon, BrO, dan ClO dilakukan dengan menggunakan metode FFT. Prinsip utama metode ini adalah dengan mengubah deret waktu dari domain waktu menjadi domain frekuensi.

Analisis mengenai korelasi antara ozon stratosfer dan BPO difokuskan pada ketinggian dimana nilai masing-masing konsentrasi O₃, ClO, dan BrO maksimum. Korelasi secara spasial dan temporal dilakukan untuk mendapatkan keterkaitan antara ozon stratosfer dengan BPO yang dalam hal ini adalah ClO dan BrO. Terlebih dahulu dilakukan regresi linier sederhana untuk O₃ stratosfer dengan ClO dan O₃ stratosfer dengan BrO. Dalam hal ini, O₃ stratosfer berperan sebagai variabel respon dan ClO serta BrO sebagai variabel bebas. Pembuatan regresi linier dilakukan untuk beberapa lapisan yang berbeda dimana salah satu variabelnya bernilai maksimum. Dari persamaan regresi linier sederhana yang terbentuk dan nilai korelasi serta koefisien determinasi, diketahui mengenai seberapa besar akan terjadi pengurangan nilai ozon stratosfer apabila terdapat senyawa ClO dan BrO di atmosfer, khususnya di lapisan stratosfer. Selain itu, akan diketahui pula seberapa besar variabel bebas (dalam hal ini berupa ClO dan BrO) akan berpengaruh terhadap variabel respon melalui nilai koefisien determinasinya.

Pengamatan juga dilakukan pada sumber BPO yang berupa HCFC dan Metil bromida (MBr). Kaitan antara HCFC dan MBr dengan BPO berupa ClO dan BrO diamati di setiap ketinggian di lapisan stratosfer. Selain itu, dilakukan juga perhitungan antara kaitan HCFC dan MBr terhadap konsentrasi ozon stratosfer dengan menggunakan metode regresi linier sederhana dan perhitungan korelasi.

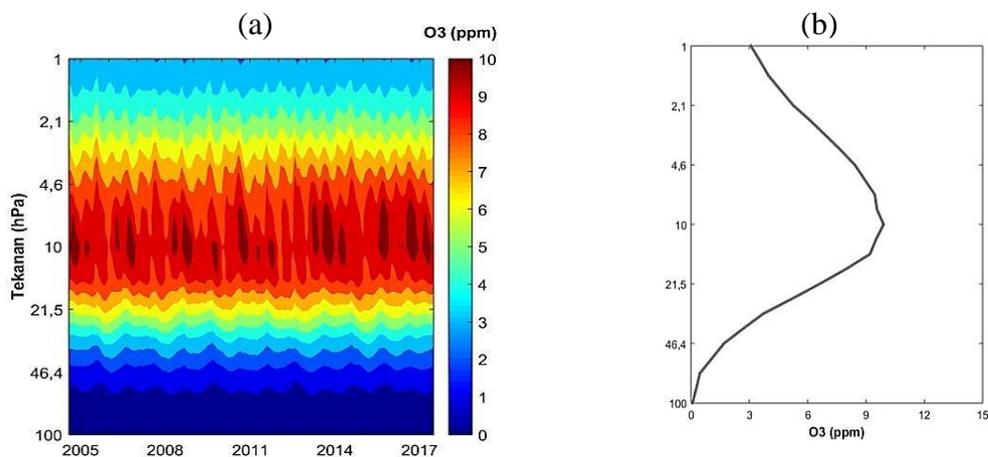
Deret waktu dan korelasi antara ozon dan indeks UV

Plot deret waktu untuk data UVI dengan ozon stratosfer dan ozon total dibuat dengan terlebih dahulu melakukan rata-rata dari wilayah Indonesia. Dari data tersebut kemudian dibuat pola deret waktu untuk rata-rata bulanan dan tahunan. Untuk mengetahui keterkaitan antara ozon stratosfer dan ozon total dengan UVI, perlu terlebih dahulu dilakukan analisis korelasi untuk kedua data tersebut. Dari analisis korelasi didapatkan persamaan antara ozon, baik stratosfer maupun total sebagai variabel bebas dan UVI sebagai variabel respon. Selain itu, didapatkan pula nilai koefisien determinasi yang mampu menggambarkan mengenai seberapa besar variabel bebas, dalam hal ini adalah ozon stratosfer ataupun ozon total, dapat menjelaskan variabel responnya (UVI). Variabilitas nilai UVI di wilayah Indonesia juga diamati, apakah masih berada pada kategori aman atau berisiko. Standar penentuan kategori UVI menggunakan standar dari WHO (2002) mengenai nilai indeks UV dan bahaya paparan matahari.

HASIL DAN PEMBAHASAN

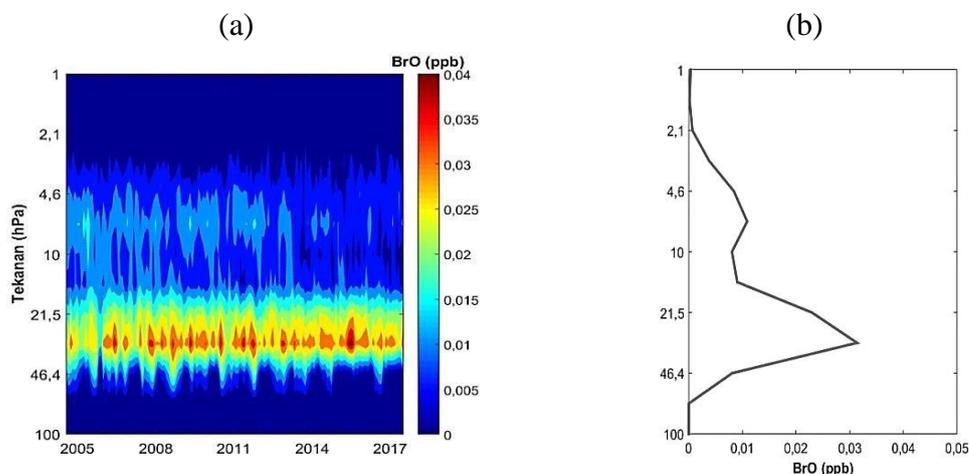
Analisis profil vertikal ozon dan BPO

Hasil deret waktu ozon terhadap ketinggian dari Januari 2005 hingga Desember 2017 menunjukkan bahwa nilai maksimum berada di ketinggian 10 hPa atau 31 km di atas permukaan laut (**Gambar 1a**). Konsentrasi ozon maksimum di ketinggian tersebut mencapai 10,95 ppm dan konsentrasi minimum di ketinggian yang sama adalah 8,87 ppm. Rata-rata nilai konsentrasi ozon secara keseluruhan memperjelas bahwa nilai maksimum (dengan rata-rata sebesar 9,91 ppm) berada di ketinggian 10 hPa atau 31 km (**Gambar 1b**).



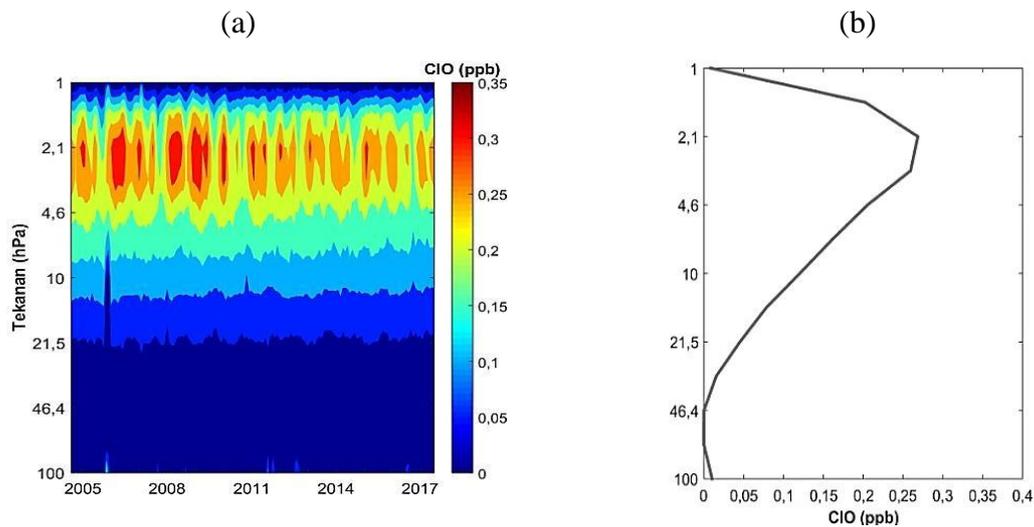
Gambar 1. Profil vertikal ozon dari 2005-2017 (a) dan rata-rata profil vertikal ozon (b)

Profil vertikal yang berbeda ditunjukkan oleh konsentrasi BrO dari Januari 2005 hingga Desember 2017. Diperoleh bahwa konsentrasi BrO yang paling tinggi berada pada ketinggian 31,6 hPa atau 24 km di atas permukaan laut (**Gambar 2a**). Konsentrasi BrO maksimum di ketinggian tersebut mencapai 0,043 ppb dan konsentrasinya minimumnya adalah 0,016 ppb. Grafik rata-rata nilai konsentrasi BrO menunjukkan lebih jelas bahwa nilai maksimum (dengan rata-rata sebesar 0,031 ppb) berada di ketinggian 31,6 hPa atau 24 km (**Gambar 2b**).



Gambar 2. Profil vertikal BrO dari 2005-2017 (a) dan rata-rata profil vertikal BrO (b)

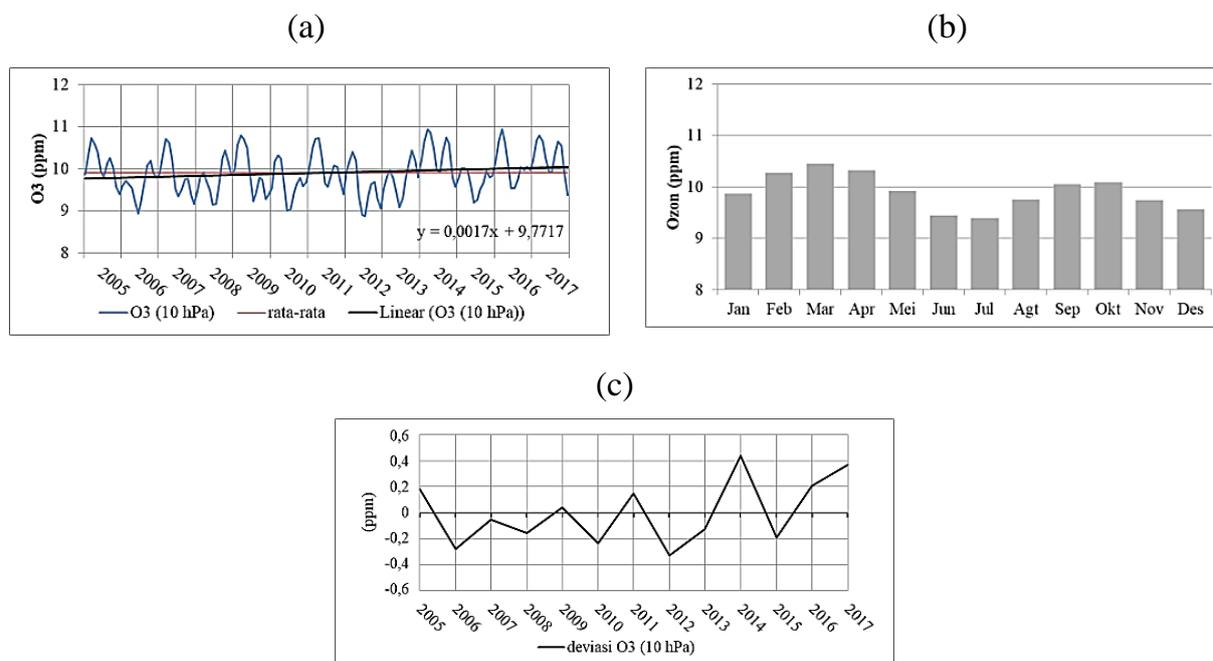
Deret waktu ClO terhadap ketinggian pada bulan Januari 2005 hingga Desember 2017 menunjukkan hasil yang berbeda dengan ozon dan BrO. Konsentrasi ClO tertinggi berada pada ketinggian 2,1 hPa atau 42 km di atas permukaan laut (**Gambar 3a**). Pada ketinggian tersebut, konsentrasi berkisar antara 0,17 ppb hingga 0,35 ppb. Grafik rata-rata konsentrasi ClO di tiap ketinggian memperjelas bahwa konsentrasi tertinggi (dengan rata-rata sebesar 0,268 ppb) berada di ketinggian 2,1 hPa atau 42 km (**Gambar 3b**).



Gambar 3. Profil vertikal ClO dari 2005-2017 (a) dan rata-rata profil vertikal ClO (b)

Analisis deret waktu dan trend ozon dengan BPO

Deret waktu ozon dan BPO (BrO dan ClO) dibuat pada ketinggian dimana nilai masing-masingnya paling maksimum. Pada deret waktu konsentrasi ozon dari Januari 2005 hingga Desember 2017 pada ketinggian 10 hPa (31 km) terlihat bervariasi dalam setiap tahunnya dan memiliki *trend* positif sebesar 0,0017 ppm per bulan (**Gambar 4a**). Hal ini berarti setiap bulannya, di ketinggian 31 km, nilai ozon meningkat sebesar 0,0017 ppm atau 1,7 ppb. Tampak pada grafik deret waktu rata-rata bulanan (**Gambar 4b**) bahwa rata-rata konsentrasi tertinggi selama 13 tahun ada pada bulan Maret dan terendahnya pada bulan Juni-Juli. Hal ini sesuai dengan gerak semu matahari dimana pada bulan Maret matahari seolah berada di atas khatulistiwa, termasuk Indonesia, dan matahari seolah bergerak ke arah utara ketika bulan Juni-Juli. Matahari yang mengandung sinar UV akan dapat mempercepat proses fotolisis untuk pembentukan ozon. Grafik deviasi data tahunan (**Gambar 4c**) menunjukkan bahwa semakin tahun nilai rata-rata tahunan ozon selalu meningkat, kecuali pada tahun 2015 dimana rata-rata tahunan konsentrasi ozon di bawah rata-rata konsentrasi tahun 2005-2017.

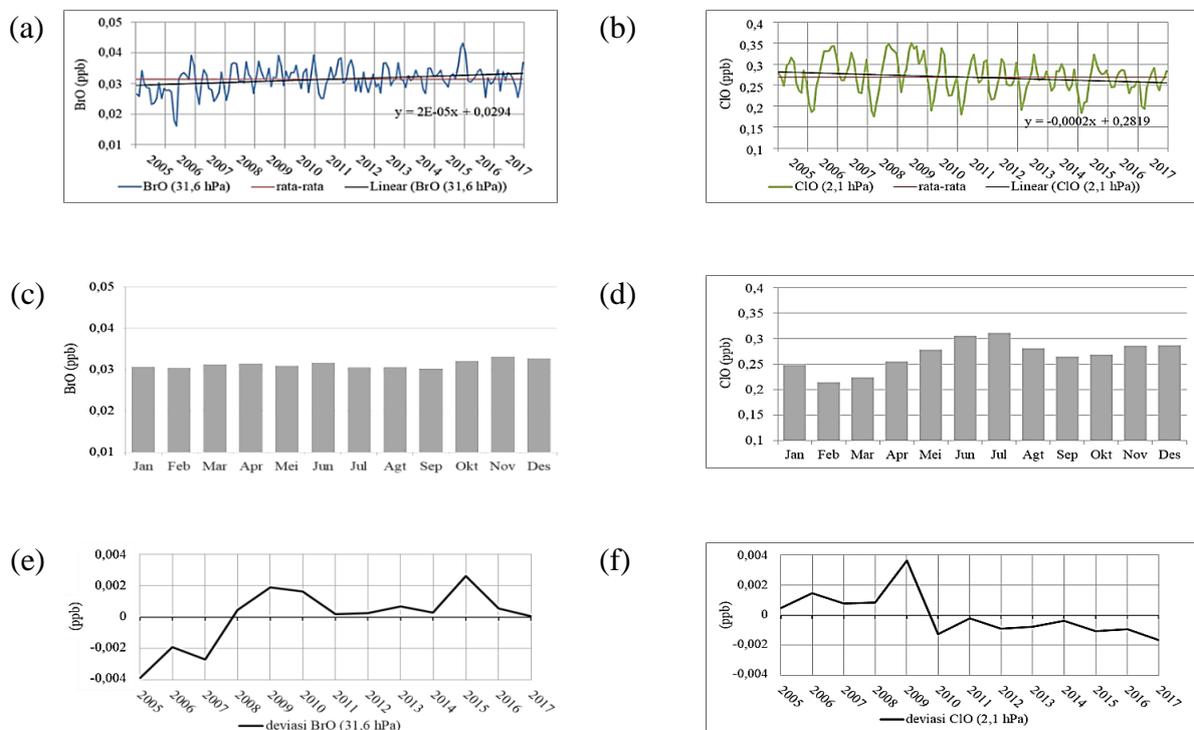


Gambar 4. Deret waktu rata-rata ozon pada tekanan 10 hPa (31 km) tahun 2005-2017 (a), rata-rata bulanan ozon (b), dan deviasi tahunan ozon (c)

Hasil deret waktu konsentrasi BrO yang dibuat pada ketinggian 31,6 hPa (24 km) dari Januari 2005 hingga Desember 2017 memiliki variasi dalam setiap tahunnya. Terbentuk adanya *trend* positif dengan nilai sebesar 2×10^{-5} ppb setiap bulannya (**Gambar 5a**). Meskipun telah terdapat pembatasan penggunaan BPO, salah satunya MBr, ternyata nilai konsentrasi BrO khususnya di ketinggian 24 km masih meningkat. Apabila ditinjau dari rata-rata bulanan dari tahun 2005 hingga 2017, konsentrasi maksimum terdapat pada bulan November dan minimum adalah pada bulan September (**Gambar 5b**). Dari grafik nilai rata-rata bulanan konsentrasi BrO, rata-rata bulanan yang satu dengan lainnya tidak terlalu jauh berbeda meskipun terdapat variasi antar dalam setiap tahunnya seperti yang tertera dalam **Gambar 5a**.

Grafik deviasi data tahunan BrO terhadap rata-rata konsentrasi tahun 2005-2017 menunjukkan bahwa nilai rata-rata konsentrasi tahunan sebelum tahun 2008 berada di bawah rata-rata tahun 2005-2017 (**Gambar 5c**). Sementara itu pada tahun 2008 hingga 2017 justru nilai rata-rata konsentrasi tahunannya lebih tinggi dibanding rata-rata tahun 2005-2017. Hal ini tentunya tidak selaras dengan adanya aturan pembatasan penggunaan MBr yang mengharapkan adanya penurunan BrO di lapisan stratosfer. Deret waktu rata-rata konsentrasi ClO dibuat untuk ketinggian 2,1 hPa (42 km) dari Januari 2005 hingga Desember 2017. Terdapat variasi dalam setiap tahunnya serta *trend* negatif dengan nilai sebesar 0,0002 ppb per bulan (**Gambar 5d**). Kecenderungan penurunan nilai ClO juga terlihat dari deviasi tahunannya

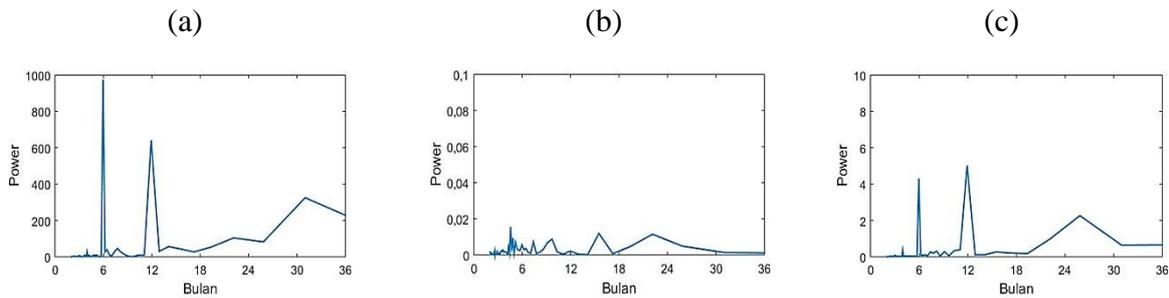
dimana setelah tahun 2010 konsentrasi rata-rata tahunannya berada di bawah rata-rata konsentrasi ClO tahun 2005- 2017 (**Gambar 5f**). Hal ini tentunya sejalan dengan adanya aturan pelarangan penggunaan CFC dan pembatasan HCFC, yang mana bahan-bahan tersebut nantinya akan membentuk ClO di atmosfer. Meskipun demikian, angka *trend* penurunan CFC masih relatif kecil mengingat pelarangan CFC yang sudah diatur sejak tahun 2007 melalui Peraturan Menteri Perindustrian no. 33 tahun 2007. Dari grafik rata-rata bulanan ClO tahun 2005-2017 terlihat bahwa konsentrasi maksimum terjadi pada bulan Juni hingga Juli (**Gambar 5e**). Pada bulan tersebut, keadaan di Indonesia cukup banyak sinar matahari yang tidak terhalang oleh awan-awan. Adanya paparan matahari akan membantu proses pelepasan Cl dari CFC maupun HCFC dan kemudian Cl akan bereaksi dengan ozon sehingga membentuk ClO (sesuai **Persamaan 1** dan **Persamaan 2**).



Gambar 5. Deret waktu rata-rata BrO pada tekanan 31,6 hPa (24 km) tahun 2005-2017 (a), rata-rata bulanan BrO (b), deviasi tahunan BrO (c), deret waktu rata-rata ClO pada tekanan 2,1 hPa (42 km) tahun 2005-2017 (d), rata-rata bulanan ClO (e), deviasi tahunan ClO (f)

Variabilitas yang dihasilkan dari perhitungan FFT (**Gambar 6**) pada masing- masing konsentrasi di ketinggian dimana bernilai maksimum menunjukkan bahwa konsentrasi ozon pada ketinggian 10 hPa atau 31 km memiliki periode ulang 6 bulanan. Konsentrasi BrO pada ketinggian 31 hPa atau 24 km tidak memiliki suatu frekuensi kuat yang dapat menggambarkan periode dominan yang terjadi, sehingga data konsentrasi rata- rata BrO setiap bulannya tidak

jauh berbeda dengan bulan lainnya. Konsentrasi ClO pada ketinggian 2,1 hPa atau 42 km diketahui memiliki periode dominan 1 tahunan dan 6 bulanan.



Gambar 6. Hasil FFT untuk ozon di 10 hPa (a), BrO di 31 hPa (b), dan ClO di 2,1 hPa (c)

Analisis korelasi ozon dan BPO

Adanya pengaruh BPO, baik di stratosfer maupun di permukaan, terhadap ozon yang berada di stratosfer diamati dengan menghitung korelasi antaranya. Korelasi antara ozon dan BrO pada ketinggian dimana nilai BrO maksimum, yaitu 31,6 hPa (24 km), menunjukkan bahwa koefisien korelasinya hanya sebesar 0,043. Hal ini menandakan bahwa tidak ada kaitan yang kuat antara BrO dan ozon pada ketinggian tersebut. Pada ketinggian dimana nilai ozon maksimum (10 hPa atau 31 km), koefisien korelasi yang dihasilkan sebesar -0,4977. Angka koefisien korelasi yang dihasilkan pada ketinggian 10 hPa (31 km) menunjukkan adanya korelasi negatif yang cukup kuat dan menandakan adanya hubungan keterbalikan antara BrO dan ozon. Koefisien korelasi antara BrO dan ozon yang menunjukkan adanya hubungan paling kuat ada pada ketinggian 6,8 hPa (33,5 km) yaitu sebesar -0,58. Secara spasial, korelasi yang cukup kuat (sekitar -0,5) berada di sekitar tengah hingga selatan Indonesia (**Gambar 7a**). Sehingga pada ketinggian ini, BrO dianggap paling mempengaruhi besarnya konsentrasi ozon. Persamaan regresi linier yang dihasilkan antara BrO dan ozon pada ketinggian ini yaitu

$$y = -106.935x + 10.616 \quad (\text{Persamaan 6})$$

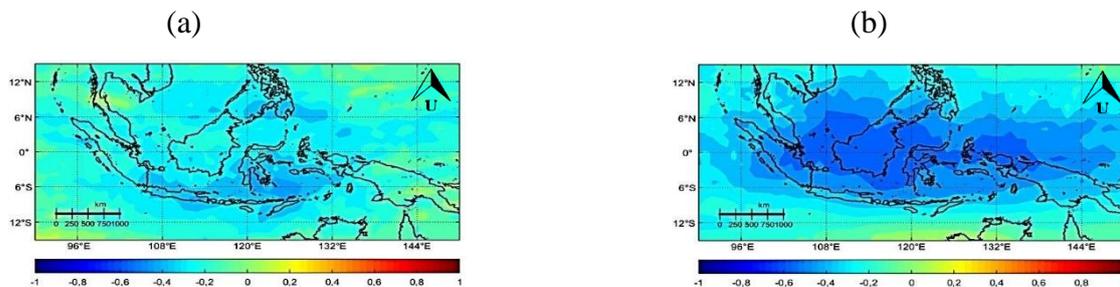
dimana x merupakan BrO dan y merupakan ozon pada 6,8 hPa (33,5 km). Dari **Persamaan 6** dapat disimpulkan bahwa pada ketinggian tersebut, setiap kenaikan 1 ppb dari BrO akan menurunkan 106.935 ppb atau 106,9 ppm ozon di ketinggian tersebut.

Keterkaitan antara MBr dan BrO yang paling kuat terdapat pada ketinggian 46 hPa (21 km) yaitu sebesar 0,67. Korelasi yang dihasilkan di tiap-tiap ketinggian tidak ada yang mendekati korelasi kuat (angka koefisien sebesar 1) karena MBr yang berada di Indonesia dapat bergerak ke arah lain dan membentuk BrO di luar wilayah Indonesia. Meskipun demikian, MBr mampu mempengaruhi ozon di stratosfer khususnya pada ketinggian 6,8 hPa

(33,5 km). Koefisien korelasi yang dihasilkan adalah sebesar -0,416 dengan persamaan regresi linier berikut

$$y = -0,0023x + 9,79 \quad (\text{Persamaan 7})$$

dimana x mewakili MBr dan y mewakili ozon (pada 6,8 hPa atau 33,5 km). Dalam **Persamaan 7** dijelaskan bahwa adanya kenaikan 1 ton MBr dapat menurunkan ozon sebanyak 0,0023 ppm atau 0,23 ppb pada ketinggian 6,8 hPa atau 33,5 km.



Gambar 7. Korelasi spasial antara BrO dan ozon (di 33,5 km) tahun 2005-2017 (a) dan korelasi spasial antara ClO dan ozon (di 36 km) tahun 2005-2017 (b)

Hasil korelasi antara ClO dan ozon pada ketinggian dimana nilai ClO maksimum, 2,1 hPa (42 km) justru menghasilkan angka koefisien korelasi yang sangat kecil (-0,0055). Hal ini berarti pada ketinggian 2,1 hPa (42 km), hampir tidak ada kaitan atau korelasi antara konsentrasi ClO dan ozon. Pada ketinggian dimana nilai ozon maksimum (10 hPa atau 31 km), koefisien korelasi yang dihasilkan sebesar -0,072 yang juga menandakan bahwa korelasi ClO dan ozon sangat lemah. Korelasi yang cukup kuat (dengan koefisien sebesar -0,43) antara ClO dan ozon berada di ketinggian 4,6 hPa atau sekitar 36 km di atas permukaan laut. Secara spasial, korelasi negatif yang cukup kuat antara ClO dan ozon terjadi di sekitar wilayah Kalimantan dan Sulawesi bagian barat laut dengan nilai koefisien korelasinya mencapai -0,6 (**Gambar 7b**). Dapat dikatakan bahwa pada ketinggian 4,6 hPa (36 km), ClO dianggap paling mempengaruhi besarnya konsentrasi ozon. Persamaan regresi linier yang dihasilkan antara ClO dan ozon pada ketinggian ini yaitu:

$$y = -12.612x + 11.015 \quad (\text{Persamaan 8})$$

dengan x merupakan ClO dan y merupakan ozon. Dari **Persamaan 8** dapat dijelaskan bahwa adanya kenaikan ClO sebesar 1 ppb dapat menurunkan konsentrasi ozon hingga 12.612 ppb atau 12,6 ppm pada ketinggian 4,6 hPa (36 km).

Korelasi HCFC dengan ClO terkuat terdapat pada ketinggian 4,6 hPa (36 km) yaitu sebesar 0,64. Korelasi antara HCFC dan ClO tidak mendekati nilai maksimal 1 (korelasi kuat)

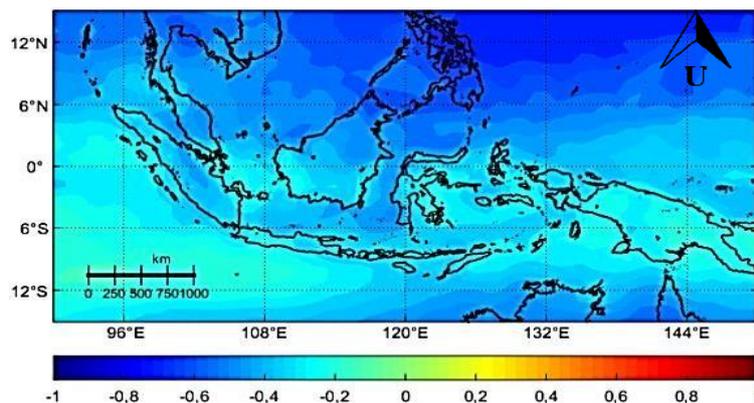
karena HCFC yang berada di atmosfer dapat bergerak ke daerah lain sehingga ClO dapat terbentuk di luar wilayah Indonesia. Selain itu, berkaitan dengan sifat HCFC yang memiliki ikatan karbon-hidrogen, Cl di dalamnya dapat terlepas di troposfer karena HCFC teroksidasi. Namun, terdapat pula HCFC yang dapat mencapai ke lapisan stratosfer. Meskipun demikian, laju fotolisis HCFC lebih lambat dibanding CFC. HCFC tetap mampu mempengaruhi ozon stratosfer, khususnya pada ketinggian 6,8 hPa (33,5 km). Koefisien korelasi antara keduanya yaitu -0,6 dengan persamaan regresi linier yang dihasilkan antara HCFC dan ClO adalah

$$y = -0,0026x + 10,216 \quad (\text{Persamaan 9})$$

dimana x mewakili HCFC dan y mewakili ozon (pada 6,8 hPa atau 33,5 km). Dari **Persamaan 9** diketahui bahwa adanya kenaikan 1 ton HCFC dapat menurunkan 0,0026 ppm atau 0,26 ppb ozon pada ketinggian tersebut.

Analisis Korelasi Ozon dan UVI

Dampak dari adanya ozon stratosfer yang berkurang dapat memicu semakin banyaknya UV yang sampai di permukaan. Hal ini disebabkan karena UV yang tidak terserap oleh ozon. Hasil korelasi antara UV dengan ozon pada ketinggian 1 hPa atau 47,7 km memiliki nilai korelasi negatif terbesar yaitu sebesar -0,5987. Secara spasial, korelasi yang cukup tinggi berada di bagian utara Indonesia yang nilai koefisien korelasinya dapat mencapai -0,6 (**Gambar 8**). Di seluruh wilayah Indonesia, korelasi yang dihasilkan bervariasi dengan rentang sebesar -0,3 hingga -0,5.



Gambar 8. Korelasi spasial antara UVI dengan ozon (di 47,7 km) tahun 2005-2017

Kaitan antara UVI dengan ozon total turut diperhitungkan melalui koefisien korelasi. Nilai koefisien korelasi yang dihasilkan yaitu -0,25. Korelasi negatif menandakan bahwa

berkurangnya konsentrasi ozon dapat menaikkan nilai UVI, atau sebaliknya, walaupun hubungan korelasi keduanya termasuk lemah. Hasil persamaan regresi linier sederhana antara UVI dan ozon total membentuk persamaan berikut

$$y = -0,0347x + 19,86 \quad (\text{Persamaan 10})$$

dimana x adalah ozon total dan y adalah nilai UVI. Dari **Persamaan 10** dijelaskan bahwa setiap adanya penambahan 1 DU ozon total, maka nilai UVI berkurang sebesar 0,0347.

KESIMPULAN

Profil vertikal dari ozon di stratosfer menunjukkan bahwa ozon maksimum berada di 31 km dengan nilai rata-rata bulannya sebesar 9,91 ppm. Pada ketinggian tersebut, ozon memiliki *trend* positif sebesar 0,0017 ppm per bulannya. Nilai maksimum BrO (0,031 ppb) berada pada ketinggian 24 km dan nilai maksimum ClO (0,17 ppb) berada pada 42 km. *Trend* masing-masing untuk BrO dan ClO pada ketinggian dimana nilainya maksimal yaitu 0,02 ppt dan -0,2 ppt setiap bulannya. Meskipun sudah terdapat pembatasan konsumsi BPO, nyatanya hal ini belum membuat adanya penurunan yang signifikan untuk BrO dan ClO terutama BrO yang masih memiliki *trend* positif.

Variabilitas konsentrasi ozon, BrO, dan ClO yang dihasilkan berbeda-beda. Untuk ketinggian dimana masing-masing konsentrasi bernilai maksimum, ozon memiliki periode berulang 6 bulanan, BrO tidak memiliki periode dominan, dan ClO memiliki periode berulang 1 tahunan dan 6 bulanan.

Korelasi antara ozon dan BrO paling kuat (-0,58) berada pada ketinggian 33,5 km. Pada ketinggian yang sama, koefisien korelasi yang dihasilkan antara MBr dengan ozon yaitu sebesar -0,416. Dari persamaan regresi linier yang terbentuk, diperoleh bahwa 1 ton MBr dapat mengurangi konsentrasi ozon sebesar 0,23 ppb pada ketinggian 33,5 km. Sementara itu, korelasi antara ozon dan ClO yang paling kuat (-0,43) berada pada ketinggian 36 km. Korelasi terkuat antara HCFC dengan ozon terjadi pada ketinggian 33,5 km dengan besar koefisien adalah -0,6. Dari persamaan regresi linier diperoleh bahwa 1 ton HCFC dapat menurunkan konsentrasi ozon sebesar 0,26 ppb pada 33,5 km.

Kaitan antara UVI dan ozon stratosfer dengan nilai korelasi negatif terbesar (- 0,5987) berada pada ketinggian 47,7 km. Sementara itu, pengurangan jumlah ozon total di atmosfer cukup mempengaruhi UVI dengan korelasi negatif sebesar -0,25.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarsari, N. dan Komala, N. (2010): Profil vertikal ozon, ClO, dan temperatur di Bandung dan Watukosek berbasis observasi sensor MLS satelit AURA. Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer.
- Ambarsari, N. dan Komala, N. (2013): Korelasi ozon dan bromin monoksida di Indonesia berbasis observasi satelit AURA-MLS. *Jurnal Sains Dirgantara*, **2**, 116-125.
- Maulana, Q., Sofyan, A., & Frazila, R. B. (2016). Simulasi pemodelan jaringan jalan untuk memprediksi pengurangan emisi co, nox, pm10, dan so2 dari rencana pembangunan bus rapid transit di kota tangerang. *Jurnal Teknik Lingkungan*, **22**(1), 63-72.
- Ball, William T., Ising, J. A., Mortlock, D. J., Staehelin, J., Haigh, J. D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S. M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., Sofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J. R., dan Rozanov, E. V. (2018): Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 1379-1394.
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robinson, S. A., Ballare, C. L., Flint, S. D., dan Caldwell, M. M. (2015): Solar ultraviolet radiation and ozone depletion driven climate change: effects on terrestrial ecosystems. *Photochem. Photobiol. Sci.*, **14**, 88-107.
- Diffey, B. (2004): Climate change, ozone depletion, and the impact on ultraviolet exposure of human skin. *Physics in Medicine and Biology*, **49**(1), R1-11.
- Fioletov, V., Kerr, J.B., dan Fergusson, A.. (2010): The UV Index: Definition, Distribution, ad Factors Affecting It. *Canadian Journal of Public Health*, **101**(4), 15-19.
- Komala, N. dan Ambarsari, N. (2015): Ozone variability and ozone depleting substances (ODS) in Indonesia based on MLS-AURA data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Science*, **12**, 125-134.
- Komala, Ninong. (2017): Analisis lapisan ozon, indeks ultra violet dan fraksi awan di Pulau Jawa berbasis data satelit Aura-OMI. *Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia IX*.
- Nurlatifah, A. dan Driejana. (2017). Pengaruh Komponen Meteorologi terhadap Pergerakan Aerosol di Kota Bandung berdasarkan Data NCEP/NCAR dan Model Hysplit-4 Backward Trajectory Model. *Dinamika dan Teknologi Atmosfer Benua Maritim Indonesia*, Media Akselerasi, Bandung.
- Roman, R., Bilbao, J., dan de Miguel, A. (2015): Erythemal ultraviolet irradiation trends in the Iberian Peninsula from 1950 to 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 375-391.
- Wang, Ziyuan, Yan, H., Fang, X., Gao, L., Zhai, Z., Hu, J., Zhang, B, dan Zhang, J. (2015): Past, present, and future emissions of HCFC-141b in China. *Atmospheric Environment* **109**, 228-233.
- WHO. (2002): Global Solar UV Index: A Practitional Guide. [online] <http://www.who.int/uv/publications/en/UVIGuide.pdf?ua=1> diakses pada 8 Juli 2018.