

**PERHITUNGAN KONSENTRASI NITROGEN OKSIDA (NO, NO<sub>x</sub>)  
AMBIEN DENGAN MENGGUNAKAN KONSENTRASI NO<sub>2</sub> DAN O<sub>3</sub> DARI  
PASSIVE SAMPLER (STUDI KASUS: CIPEDES, BANDUNG)  
(CALCULATION OF AMBIENT NITROGEN OXIDES (NO, NO<sub>x</sub>)  
CONCENTRATIONS USING NO<sub>2</sub> AND O<sub>3</sub> CONCENTRATIONS FROM  
PASSIVE SAMPLER (CASE STUDY: CIPEDES, BANDUNG)**

**Asri Indrawati<sup>1,\*</sup>, Dyah Aries Tanti, Tuti Budiwati, dan Sumaryati**

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

\*e-mail: asri.indrawati@lapan.go.id, asriku@gmail.com

Diterima 23 Agustus 2018; Direvisi 28 Februari 2019; Disetujui 8 Agustus 2019

**ABSTRACT**

Monitoring of nitrogen oxides concentration in ambient air is important because it's hazards and impact on human health and the environment. Passive sampler is an inexpensive and convenient air monitoring method, especially for monitoring locations that are difficult to reach. This study was conducted to calculate nitrogen oxides (NO and NO<sub>x</sub>) concentrations using passive sampler. The data used are NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations from passive sampler and monthly average data of solar radiation and temperature in Cipedes in 2011-2015. Data processing is carried out using the equation of photochemical reactions. In addition, the relationship between solar radiation and temperature with NO<sub>2</sub>, NO and O<sub>3</sub> concentrations was also investigated using Pearson correlation statistical method.. The results for NO concentration range were 6.32 - 55.8 ppb and the average value was 21.97 ppb. The result for NO<sub>x</sub> concentration range were 37.28 - 100.83 ppb and the average value was 66.43 ppb. The correlation between solar radiation and temperature indicated that both had a significant effect on changes in O<sub>3</sub> concentration.

Keywords: *concentration, nitrogen oxides, passive sampler, solar radiation, temperature, photochemistry*

**ABSTRAK**

Pemantauan konsentrasi nitrogen oksida di udara ambien sangat penting dilakukan, mengingat bahaya dan dampak yang ditimbulkan secara luas bagi kesehatan manusia serta lingkungan hidup. *Passive sampler* merupakan metode pemantauan udara yang murah dan mudah untuk dilakukan, terutama untuk lokasi pemantauan yang sulit dijangkau. Penelitian ini dilakukan untuk menghitung konsentrasi nitrogen oksida (NO dan NO<sub>x</sub>) dengan menggunakan *passive sampler*. Data yang digunakan yaitu data konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> dari *passive sampler* serta data rata-rata bulanan radiasi matahari dan temperatur daerah Cipedes tahun 2011 - 2015. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan persamaan reaksi fotokimia. Hubungan antara radiasi matahari dan temperatur terhadap perubahan konsentrasi NO<sub>2</sub>, NO, dan O<sub>3</sub> dihitung dengan menggunakan metode statistik korelasi *Pearson*. Hasil yang diperoleh yaitu NO memiliki rentang konsentrasi sebesar 6,32 - 55,8 ppb dengan nilai rata-rata sebesar 21,97 ppb, sedangkan nilai konsentrasi NO<sub>x</sub> adalah 37,28 - 100,83 ppb dengan nilai rata-rata sebesar 66,43 ppb. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa radiasi matahari dan temperatur berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan konsentrasi O<sub>3</sub>.

Kata kunci: *konsentrasi, nitrogen oksida, passive sampler, radiasi matahari, temperatur, fotokimia*

**1 PENDAHULUAN**

Nitrogen oksida (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>), yang berasal dari pembakaran, sumber alami, dan emisi dari daratan,

memainkan peranan yang penting dalam proses fotokimia yang menghasilkan ozon (O<sub>3</sub>) di lapisan troposfer. Deposisi NO<sub>x</sub> dalam jumlah yang berlebih

berkontribusi kepada total nitrogen di dalam ekosistem. Deposisi  $\text{NO}_x$  juga berkaitan dengan deposisi asam (hujan asam) yang terjadi di permukaan bumi (Seok *et al.*, 2013). Selain itu,  $\text{NO}_x$  juga dapat bereaksi dengan senyawa lain yang ada di atmosfer untuk membentuk partikel kecil yang dapat membahayakan kesehatan manusia terutama penyakit pernafasan yang kronis (Gasmi *et al.*, 2017; Mavroidis, 2011). Sumber utama  $\text{NO}_x$  di daerah perkotaan berasal dari emisi lalu lintas yang tergantung pada jenis, ukuran, dan bahan bakar kendaraan (Gasmi *et al.*, 2017).  $\text{NO}_x$  yang diemisikan dari kendaraan berat menghasilkan lima kali jumlah  $\text{NO}_x$  dibandingkan dengan  $\text{NO}_x$  yang dikeluarkan oleh kendaraan ringan berbahan bakar bensin. Penambahan biodiesel pada kendaraan bermesin diesel dapat sedikit meningkatkan emisi  $\text{NO}_x$  (Castaneda *et al.*, 2014).

$\text{NO}_x$  juga bertanggung jawab atas masalah lingkungan dengan skala yang lebih besar, seperti pemanasan global karena  $\text{NO}_x$  dapat berpindah jauh dari sumber asalnya yang terbawa oleh angin (Mavroidis, 2011). Dari penelitian yang telah dilakukan, negara-negara di kawasan Asia Timur menyumbang sekitar 29%  $\text{NO}_x$  dari total emisi global, jauh lebih besar dari Amerika Serikat dan Eropa. Polutan oksida N ( $\text{NO}_x$  dan nitrat) yang dihasilkan oleh negara – negara di kawasan Asia Timur dapat terbawa tidak hanya ke negara tetangga, tetapi juga ke negara – negara lain sehingga mempengaruhi kualitas udara dan juga berpengaruh terhadap iklim (Qu *et al.*, 2016).

$\text{NO}_x$  berperan sebagai prekursor dari sejumlah polutan beracun dan mempunyai efek, baik pada paparan jangka pendek maupun panjang, terhadap kesehatan manusia sehingga menjaga konsentrasi nitrogen oksida pada level konsentrasi rendah dapat memberikan manfaat yang signifikan terhadap kesehatan masyarakat (Mavroidis, 2011).

Sehubungan dengan efek oksida nitrogen terhadap kesehatan manusia, beberapa lembaga lingkungan hidup di seluruh dunia menetapkan ambang batas untuk konsentrasi  $\text{NO}_2$  di udara ambien. *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) menetapkan ambang batas 53 ppb untuk konsentrasi rata-rata satu tahun dan 100 ppb untuk konsentrasi rata-rata satu jam (Gasmi *et al.*, 2017). Indonesia menetapkan nilai ambang batas  $\text{NO}_2$  sebesar 203,77 ppb untuk konsentrasi rata-rata 1 jam; 76,41 ppb untuk konsentrasi 24 jam; dan 50,94 ppb untuk konsentrasi 1 tahun (PP 41, 1999).

Metode *passive sampler* merupakan metode pemantauan kualitas udara yang murah dan mudah untuk dilakukan, terutama untuk lokasi pemantauan yang sulit dijangkau. Beberapa gas yang dapat dipantau dengan menggunakan metode ini antara lain  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , dan  $\text{NH}_3$  (Tanti, 2016). Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi konsentrasi  $\text{NO}_x$  dengan menggunakan konsentrasi  $\text{NO}_2$  dan  $\text{O}_3$  dari *passive sampler* untuk daerah Cipedes, Bandung. Pemanfaatan data *passive sampler* dilakukan untuk pengembangan penelitian pemantauan udara dengan menggunakan *passive sampler* agar hasilnya dapat bermanfaat bagi masyarakat luas dan pemerintah daerah untuk penentuan kebijakan terkait dengan kualitas udara.

## 2 METODOLOGI

### 2.1 Lokasi dan Data

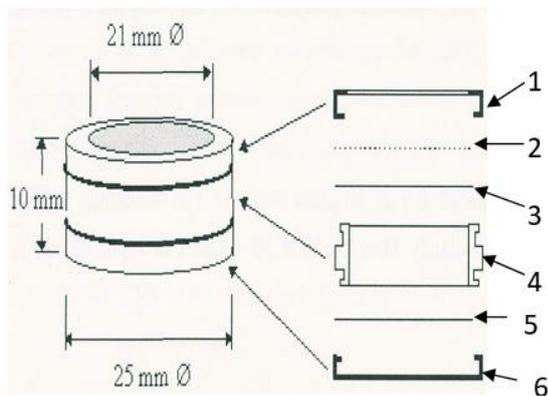
Lokasi penelitian yaitu daerah Cipedes, Bandung. Daerah Cipedes merupakan daerah dengan lalu lintas yang cukup padat setiap harinya, terutama pada saat hari libur karena lokasinya yang dekat dengan daerah Pasteur. Gerbang tol Pasteur merupakan salah satu gerbang masuknya kendaraan dari luar Bandung.

Data yang digunakan adalah data  $\text{NO}_2$  dari *passive sampler*. Data temperatur serta radiasi matahari

diperoleh dari *Automatic Weather Station* (AWS) berupa data bulanan dari tahun 2011 sampai 2015. *Passive sampler* dan AWS diletakkan pada lokasi yang sama (co-located sampling) yaitu pada koordinat (6°54' LS, 10°35' BT).

## 2.2 Metode Penelitian

*Passive sampler* adalah salah satu metode sampling udara yang berukuran kecil, tidak membutuhkan listrik dan biaya yang murah. Prinsip kerja *passive sampler* berdasarkan prinsip difusi molekul. Molekul gas akan berdifusi ke dalam *sampler* dan berkumpul pada filter. Filter tersebut sebelumnya telah diberi larutan penyerap yang spesifik untuk masing-masing gas (Tanti, 2016).



Gambar 2-1: Penampang *passive sampler*. (1) penutup bagian atas; (2) lapisan *stainless steel mesh*; (3) filter teflon; (4) *ring*; (5) filter penyerap; (6) lapisan penutup bagian bawah (Powell, 2007)

*Passive sampler* dengan metode CSIRO terdiri dari beberapa lapisan seperti yang terlihat dalam Gambar 2-1. *Passive sampler* CSIRO terdiri dari beberapa bagian yang meliputi bagian penutup, *ring*, dan filter, yang masing-masing bagian mempunyai fungsi spesifik. Bagian 1 merupakan bagian atas dari *passive sampler* yang berfungsi sebagai inlet gas pada *passive sampler* yang ditutup dengan *fine mesh* (*stainless steel mesh*, bagian 2) sehingga dapat meminimalkan transportasi udara secara

konvektif. Untuk meminimalkan difusi turbulen internal dan gangguan dari partikel, filter teflon (pori 1  $\mu\text{m}$  dan diameter 25 mm) diletakkan setelah bagian *stainless steel* (bagian 3). Filter teflon digunakan untuk melindungi kerusakan filter penyerap (pori 0,45  $\mu\text{m}$ ) yang berada pada bagian 5 setelah *ring* (bagian 4) dan dilindungi oleh penutup (bagian 6). *Ring* berfungsi sebagai penyambung antara bagian atas dan bawah dari *passive sampler*.

Larutan penyerap untuk gas  $\text{NO}_2$  adalah  $\text{NaOH}$  dan  $\text{NaI}$  yang dilarutkan dalam metanol, sedangkan untuk  $\text{O}_3$  terdiri dari  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , gliserol, metanol, dan selanjutnya dilarutkan dengan *aquabidest* (Powell, 2007). Reaksi kimia yang nantinya akan terjadi pada filter adalah (Adon et al., 2010):

- Untuk gas  $\text{NO}_2$   
 $2\text{NO}_{2(\text{g})} + 3\text{I}^- \rightarrow 2\text{NO}_2^- + \text{I}_3^-$
- Untuk gas  $\text{O}_3$   
 $\text{O}_{3(\text{g})} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{O}_2$

Kelemahan dari metode *passive sampler* adalah sangat bergantung pada kondisi meteorologi, seperti temperatur, kecepatan angin, dan kelembapan udara. Angin kencang dan hujan lebat dapat menyebabkan kerusakan pada filter. Kecepatan angin dapat mempengaruhi proses reaksi maupun penyerapan gas ke dalam filter (media penyerap gas) (Bari et al., 2015; Salem et al., 2009; Tanti, 2016).

Sampling *passive sampler* dilakukan selama 1 bulan. Selanjutnya, filter dalam *passive sampler* untuk masing-masing gas dianalisis dengan menggunakan ion kromatografi untuk gas  $\text{O}_3$  dan spektrofotometer pada panjang gelombang 540 nm untuk  $\text{NO}_2$ . Konsentrasi untuk masing-masing dihitung dengan menggunakan persamaan (Powell, 2007):

$$C_o = \frac{EV \times C_{aq} \times R}{t \times D} \dots\dots\dots(1)$$

$$p = \frac{n \times R \times T}{V \times 1000} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung konsentrasi gas ambien ( $C_0$ ) dalam satuan  $\text{nmol/m}^3$ , sedangkan persamaan (2) digunakan untuk mengkonversi konsentrasi gas dari  $\text{nmol/m}^3$  ke  $\text{ppbv}$  (p).

Pada persamaan (1) EV adalah volume ekstraksi ( $\text{cm}^3$ ),  $C_{\text{aq}}$  adalah konsentrasi gas hasil analisis dari ion kromatografi untuk  $\text{O}_3$ , dan spektrofotometer untuk  $\text{NO}_2$  dalam  $\mu\text{mol/L}$ . R adalah total resistensi sampel ( $\text{m}^{-1}$ ), untuk sampling *outdoor* sebesar  $49,78 \text{ m}^{-1}$  untuk gas  $\text{NO}_2$  dan  $36,98 \text{ m}^{-1}$  untuk gas  $\text{O}_3$ . D merupakan koefisien difusi gas di udara sebesar  $1,54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  untuk  $\text{NO}_2$  dan  $1,64 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  untuk  $\text{O}_3$ , dan nilai t merupakan waktu sampling dalam satuan detik.

Pada persamaan (2)  $n/V$  adalah konsentrasi gas dalam satuan  $\text{nmol/m}^3$ , R adalah konstanta gas  $0,0820562 \text{ L atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , dan T adalah temperatur sampling dalam K.

Setelah nilai konsentrasi gas  $\text{NO}_2$  dan  $\text{O}_3$  diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan konsentrasi NO dan  $\text{NO}_x$ . Perhitungan konsentrasi NO dan  $\text{NO}_x$  dilakukan dengan menggunakan rumusan sebagai berikut (Cerc, 2012):

$$K_1 = 4,405 \times 10^{-2} \exp\left(\frac{-1370}{T_0}\right) \dots\dots\dots(3)$$

$$K_2 = 8 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{-10}{Q}\right) + 7,4 \times 10^{-6} Q \dots\dots\dots(4)$$

$$[\text{NO}_2] = \left(\frac{K_1}{K_2}\right) [\text{NO}][\text{O}_3] \dots\dots\dots(5)$$

$$[\text{NO}_x] = ([\text{NO}] + [\text{NO}_2]) \dots\dots\dots(6)$$

Tahapan perhitungan dilakukan dengan menghitung  $K_1$  ( $\text{s}^{-1}\text{ppb}^{-1}$ ) dengan menggunakan nilai temperatur ( $T_0$ ) dalam kelvin (persamaan (3)). Nilai  $T_0$  yang digunakan merupakan nilai rata-rata bulanan. Selanjutnya, dilakukan perhitungan  $K_2$  ( $\text{s}^{-1}$ ) dengan menggunakan nilai radiasi matahari Q ( $\text{W/m}^2$ ) (persamaan (4)). Nilai Q yang digunakan juga merupakan rata-rata bulanan radiasi matahari. Setelah mendapatkan nilai  $K_1$  dan  $K_2$ , selanjutnya menghitung konsentrasi NO dengan menggunakan persamaan (5).

Langkah terakhir adalah menghitung nilai konsentrasi  $\text{NO}_x$  dengan menggunakan persamaan (6). Selanjutnya, plot data *time series* yang digunakan untuk menampilkan variasi konsentrasi  $\text{NO}_x$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , serta data temperatur dan radiasi matahari. Metode statistik korelasi *Pearson* digunakan untuk melihat hubungan antara konsentrasi NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  dengan temperatur dan radiasi matahari.

### 3 HASIL PEMBAHASAN

#### 3.1 Temperatur dan Radiasi Matahari

Cipedes termasuk daerah urban di Bandung, memiliki kondisi temperatur yang cukup sejuk dengan temperatur bulanan dari tahun 2011 – 2015 antara  $22,54 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $25,49 \text{ }^\circ\text{C}$  dan rata-rata sebesar  $24,01 \text{ }^\circ\text{C}$  (Gambar 3-1 (A)). Nilai radiasi matahari setiap bulannya berada pada rentang  $100,49 \text{ W/m}^2$  –  $229,85 \text{ W/m}^2$  dengan nilai rata-rata sebesar  $160,88 \text{ W/m}^2$ .

Fluktuasi nilai radiasi matahari yang diperoleh dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah perubahan jarak Bumi – Matahari. Jarak terdekat Bumi – Matahari dicapai sekitar bulan Januari sehingga pada saat itu energi matahari yang diterima oleh Bumi dalam jumlah maksimum. Di sisi lain, sekitar bulan Juli, jarak Bumi – Matahari berada pada jarak terjauh sehingga energi matahari yang diterima bumi berada dalam jumlah minimum dalam siklus edar Bumi mengelilingi Matahari (Hamdi *et al.*, 2015; Sumaryati *et al.*, 2015).

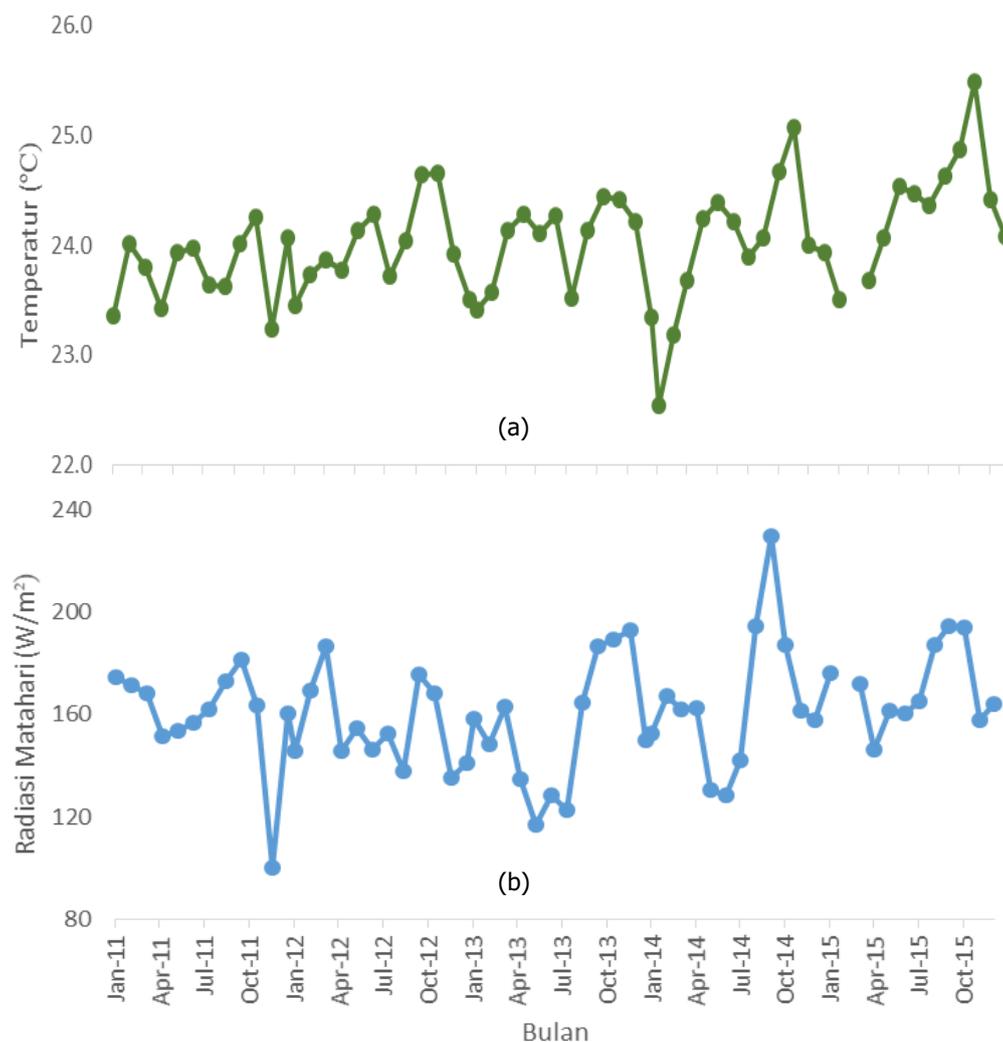
Berdasarkan Gambar 3-1(B) terlihat pada bulan Januari nilai radiasi matahari memiliki kecenderungan lebih besar dibandingkan pada bulan Juni. Fluktuasi nilai radiasi matahari juga dipengaruhi oleh hamburan dan serapan oleh senyawa lain, seperti ozon,  $\text{CO}_2$ , uap air, dan aerosol. Pelemahan energi radiasi oleh aerosol akan berdampak pada proses fotokimia, seperti pembentukan ozon di lapisan troposfer (Hamdi *et al.*, 2015).

Dalam beberapa penelitian yang telah dilakukan, radiasi matahari dan temperatur permukaan mempunyai hubungan yang linier (Daut *et al.*, 2012; Dumas *et al.*, 2015). Namun untuk daerah Cipedes, terlihat ada beberapa kondisi dimana antara radiasi matahari dengan temperatur memiliki pola yang berkebalikan yang terlihat pada Gambar 3-1, seperti bulan Juli dan Agustus 2011, bulan Januari dan Maret 2015, serta bulan Februari dan Maret 2014. Hal ini dapat terjadi karena adanya awan. Keberadaan awan dapat menghalangi sebagian besar radiasi matahari yang masuk ke permukaan bumi.

Awan dapat bertindak sebagai “selimut” radiasi dengan menyerap

radiasi inframerah yang dipancarkan oleh permukaan bumi ke angkasa. Akibatnya, permukaan bumi yang dinaungi awan tidak mendingin secepat mungkin, sama halnya ketika langit tidak berawan. Panas yang terperangkap dalam awan akan menyebabkan permukaan bumi menjadi panas. Efek ini yang dikenal sebagai *cloud radiative forcing* yang memainkan peranan penting dalam variasi temperatur di permukaan bumi (NASA, 2005; Betts *et al.*, 2013).

Hasil penelitian di Cina pada musim panas menunjukkan adanya kecenderungan pemanasan permukaan Bumi akibat tutupan awan (Lee, 2016).



Gambar 3-1: Grafik variasi bulanan temperatur (a) dan radiasi matahari (b) di daerah Cipedes tahun 2011 – 2015

### 3.2 Konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> Passive Sampler

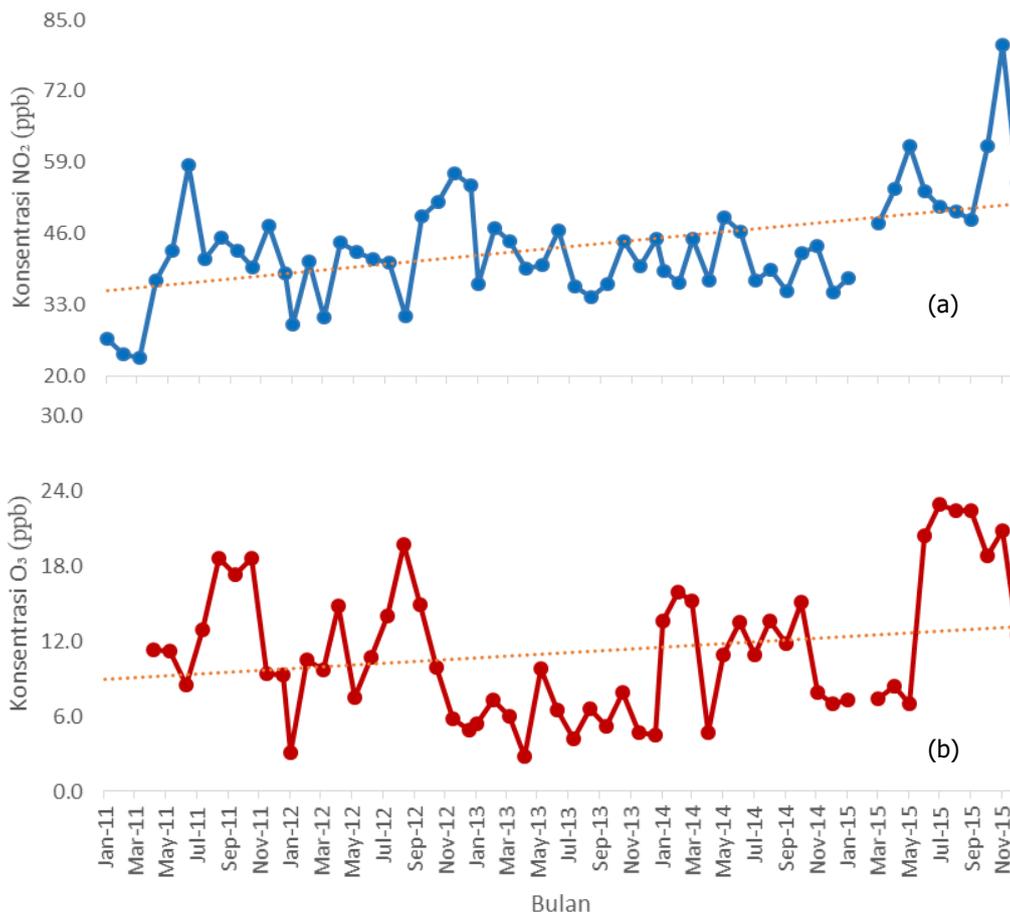
Konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> yang didapat dari *passive sampler* berfluktuasi setiap bulannya (Gambar 3-2). Tren menunjukkan adanya kenaikan konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> dari tahun 2011 – 2015. Konsentrasi NO<sub>2</sub> dari tahun 2011 – 2015 antara 23,41 – 80,44 ppb dengan rata-rata sebesar 43,46 ppb. Konsentrasi rata-rata NO<sub>2</sub> dalam 1 tahun pada tahun 2015 mencapai konsentrasi 52,78 ppb. Nilai tersebut telah melebihi nilai ambang batas untuk rata-rata 1 tahun, yaitu sebesar 50,94 ppb (PP 41, 1999).

Konsentrasi O<sub>3</sub> dari tahun 2011 – 2015 mempunyai rentang konsentrasi antara 2,81 – 22,99 ppb dengan konsentrasi rata-rata 11,17 ppb. Untuk rata-rata tahunan, nilai konsentrasi

tertinggi pada tahun 2015 sebesar 15,52 ppb. Nilai tersebut masih di bawah nilai ambang batas untuk rata-rata 1 tahun, yaitu sebesar 25 ppb (PP 41, 1999).

Pengukuran konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> juga dilakukan di daerah Soreang, Bandung. Konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> di Soreang dari tahun 2012-2015 memiliki nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan di daerah Cipedes, yaitu 37,21 ppb untuk rata-rata nilai konsentrasi NO<sub>2</sub> dan 5,96 ppb untuk O<sub>3</sub> (Tanti, 2018).

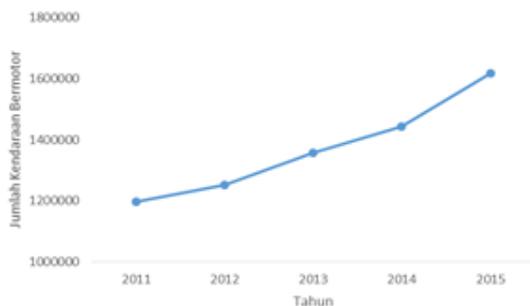
Perbedaan konsentrasi ini terjadi karena perbedaan jumlah sumber pencemar NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> yang berbeda untuk daerah Soreang dan Cipedes. Daerah Soreang terletak di daerah yang tidak terlalu padat arus transportasinya bila dibandingkan dengan daerah Cipedes.



Gambar 3-2: Grafik variasi bulanan konsentrasi NO<sub>2</sub> (a) dan O<sub>3</sub> (b) daerah Cipedes Tahun 2011 – 2015

Nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) dihasilkan oleh aktivitas antropogenik, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa (Zainordin *et al.*, 2017). Untuk daerah perkotaan, kendaraan bermotor merupakan sumber utama dari  $\text{NO}_2$ . Gas  $\text{NO}_2$  terbentuk ketika pembakaran bahan bakar berlangsung pada temperatur tinggi (Wang *et al.*, 2016).

Berdasarkan data jumlah kendaraan bermotor di Bandung, terlihat terjadinya peningkatan jumlah kendaraan di Bandung dari tahun 2011 – 2015 (Gambar 3-3). Pada tahun 2015, peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Bandung naik sebesar 35% bila dibandingkan dengan tahun 2011. Kondisi ini bersesuaian dengan adanya peningkatan konsentrasi  $\text{NO}_2$  pada tahun 2015 sebesar 40% bila dibandingkan dengan konsentrasi  $\text{NO}_2$  pada tahun 2011.



Gambar 3-3: Grafik jumlah kendaraan di Bandung tahun 2011 – 2015 (Sumber: Bandung dalam angka)

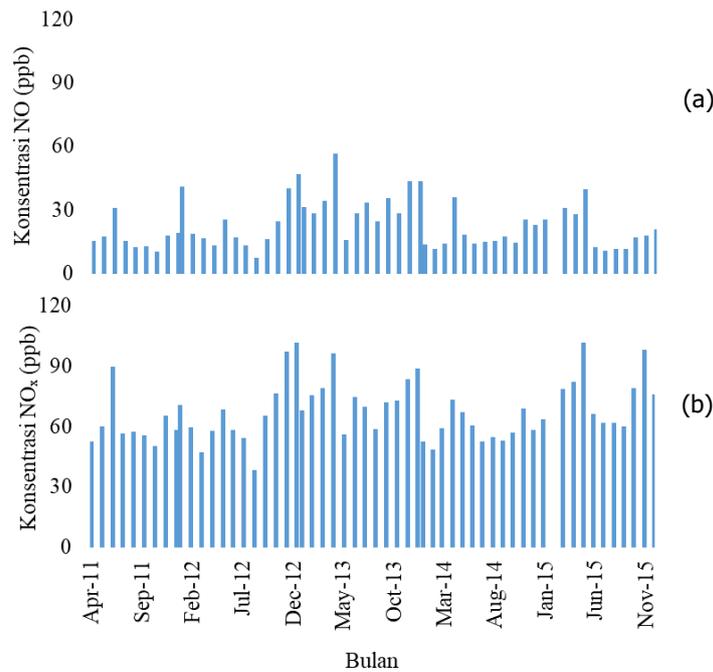
$\text{O}_3$  yang ada di udara ambien merupakan polutan sekunder yang dihasilkan dari serangkaian reaksi fotokimia kompleks antara  $\text{O}_3$  dengan prekursor, seperti  $\text{NO}_x$  atau VOCs dan juga radiasi matahari (Zainordin *et al.*,

2017). Di daerah perkotaan, hubungan antara konsentrasi  $\text{O}_3$  yang dihasilkan dari reaksi fotokimia dan prekursor, tidak linier karena sangat tergantung pada konsentrasi  $\text{NO}_x$  dan VOCs, rasio  $\text{NO}_x - \text{VOCs}$ , dan juga intensitas radiasi matahari (Alghamdi *et al.*, 2014). Variasi konsentrasi  $\text{O}_3$  di daerah tropis berbeda dengan daerah subtropis karena adanya perbedaan intensitas radiasi matahari, temperatur udara, dan juga kondisi kelembapan relatif yang sangat mempengaruhi konsentrasi diurnal dari  $\text{O}_3$  (Zainordin *et al.*, 2017).

### 3.3 Perhitungan Konsentrasi NO dan $\text{NO}_x$ dari *Passive Sampler*

Sampling  $\text{O}_3$  dengan *passive sampler* baru dilakukan pada bulan April 2011 sehingga data konsentrasi NO dan  $\text{NO}_x$  dari perhitungan dengan menggunakan persamaan (5) dan persamaan (6) dimulai dari bulan April 2011 – Desember 2015. Dari hasil perhitungan diperoleh rentang konsentrasi untuk NO sebesar 6,32 – 55,8 ppb dengan nilai rata-rata sebesar 21,97 ppb, sedangkan untuk konsentrasi  $\text{NO}_x$  sebesar 37,28 – 100,83 ppb dengan nilai rata-rata adalah 66,43 ppb (Gambar 3-4).

Hasil perhitungan konsentrasi NO dan  $\text{NO}_x$  dari *passive sampler*, bila dibandingkan dengan nilai konsentrasi NO,  $\text{NO}_x$  dari *automatic analyzer* yang dilakukan oleh Budiyono *et al.* (2009), menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan dalam orde nilai konsentrasinya. Rata-rata nilai konsentrasi yang diperoleh pada penelitian Budiyono, *et al.* (2009) untuk  $\text{NO}_x$  yaitu 25,81 ppb dan NO yaitu 11,35 ppb.



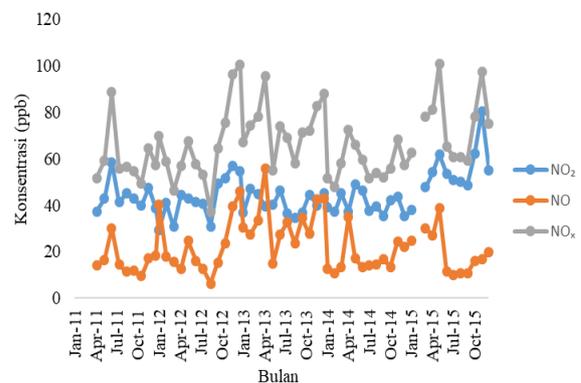
Gambar 3-4: Grafik hasil perhitungan konsentrasi NO (a) dan NO<sub>x</sub> (b) di daerah Cipedes Tahun 2011 – 2015

Dari hasil perhitungan yang disajikan dalam Gambar 3-5, terlihat bahwa nilai konsentrasi NO lebih rendah dibandingkan dengan nilai konsentrasi NO<sub>2</sub>. Namun, pada bulan April dan November 2013, konsentrasi NO lebih tinggi dari konsentrasi NO<sub>2</sub>. Kondisi ini diduga karena jumlah konsentrasi NO pada bulan April dan November sangat tinggi di udara sehingga tidak semua NO berubah menjadi NO<sub>2</sub>. Pada pagi hari, ketika sinar matahari mulai menginduksi serangkaian reaksi fotokimia, NO yang teremisikan di udara terkonversi menjadi NO<sub>2</sub> melalui reaksi dengan O<sub>3</sub>, dan pada siang hari NO<sub>2</sub> dikonversi kembali menjadi NO sebagai hasil fotolisis yang menyebabkan regenerasi O<sub>3</sub> (Han *et al.*, 2011).

Tinggi rendahnya konsentrasi NO dan NO<sub>2</sub> di atmosfer juga berhubungan dengan umur (*life time*) NO<sub>2</sub> di atmosfer. NO<sub>2</sub> di atmosfer lebih lama keberadaannya dibandingkan dengan NO karena NO bersifat lebih reaktif (Gasmi *et al.*, 2017). Umur NO di udara yang singkat, membuat NO berubah

dengan cepat menjadi NO<sub>2</sub> dalam interaksinya dengan O<sub>3</sub> atau O<sub>2</sub>.

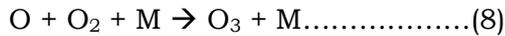
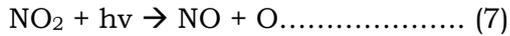
Reaksi fotokimia memecah NO<sub>2</sub> menjadi NO dan O yang selanjutnya akan menghasilkan O<sub>3</sub> dengan keberadaan sinar matahari. Kemudian NO, NO<sub>2</sub>, dan O<sub>3</sub> mencapai kondisi *steady state* (Sharma *et al.*, 2010). Emisi utama NO<sub>x</sub> ke atmosfer dalam bentuk NO, bahkan diperkirakan 95% NO<sub>x</sub> yang diemisikan dalam bentuk NO yang kemudian dioksidasi menjadi NO<sub>2</sub> (Gasmi *et al.*, 2017 dan Han *et al.*, 2011).



Gambar 3-5: Grafik konsentrasi NO, NO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> daerah Cipedes tahun 2011 – 2015.

### 3.4 Hubungan antara NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan O<sub>3</sub>

Pada udara ambien, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan O<sub>3</sub> terhubung melalui reaksi fotokimia seperti yang ditunjukkan berikut dibawah ini (Song *et al.*, 2011)



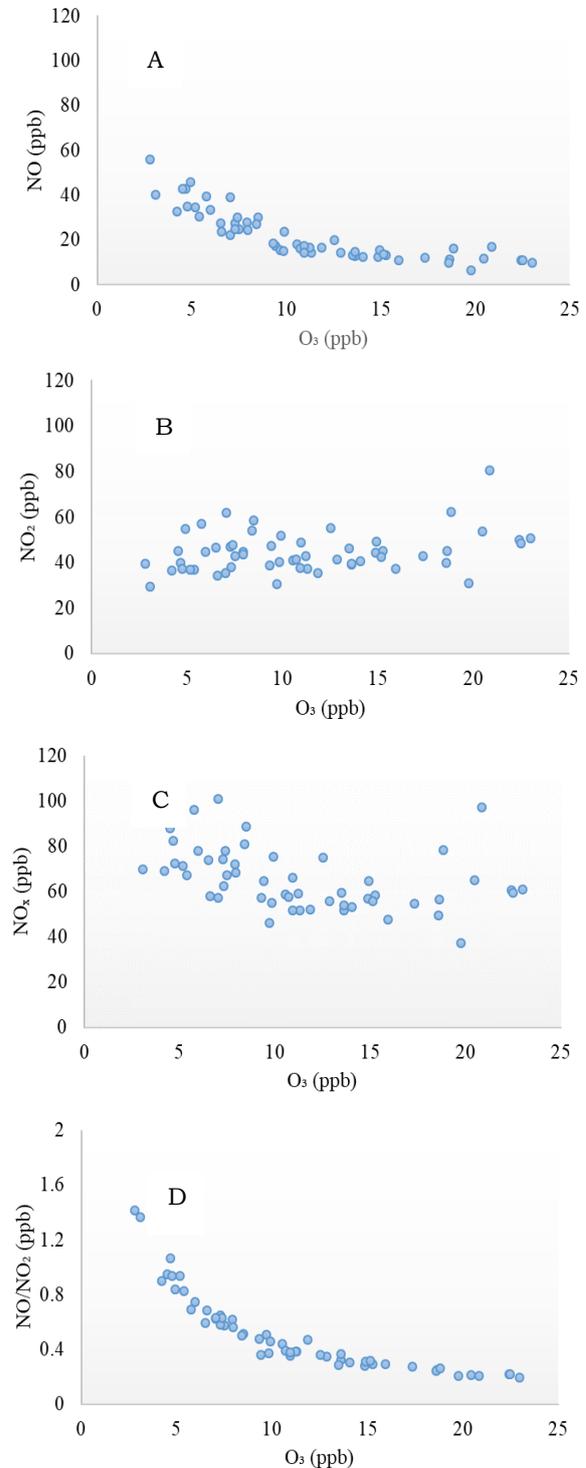
NO<sub>2</sub> dihasilkan dari sumber pencemar utama NO melalui reaksi oksidasi kimia yang merupakan reaksi utama terhadap kontribusi pembentukan polutan sekunder NO<sub>2</sub> di udara. Dalam reaksi di atas terlihat bahwa konsentrasi O<sub>3</sub> berhubungan dengan rasio konsentrasi (NO<sub>2</sub>/NO). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Han *et al.* (2011), O<sub>3</sub> mempunyai hubungan polinomial dengan Ln NO<sub>2</sub>/NO, dimana konsentrasi O<sub>3</sub> akan meningkat secara cepat pada saat (NO<sub>2</sub>/NO) mempunyai konsentrasi yang rendah.

Untuk menghasilkan O<sub>3</sub>, NO harus dikonversi menjadi NO<sub>2</sub> tanpa melibatkan O<sub>3</sub>. Keberadaan VOC di atmosfer melalui reaksi dengan NO dan peroksida (RO<sub>2</sub>) akan membuat akumulasi konsentrasi O<sub>3</sub> di atmosfer (Han *et al.*, 2017).

Berdasarkan Gambar 3-6 terlihat bahwa koping kimia antara O<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub> melalui reaksi 7, 8, dan 9 menghasilkan hubungan yang berkebalikan antara konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub>, yang berdampak pada penurunan konsentrasi O<sub>3</sub> pada saat konsentrasi NO tinggi. Produksi O<sub>3</sub> bergantung pada keadaan NO<sub>x</sub> karena NO<sub>2</sub> dan NO meningkatkan produksi dan disosiasi dari O<sub>3</sub>. Akibatnya, rasio NO/NO<sub>2</sub> yang meningkat akan mengurangi konsentrasi O<sub>3</sub> (HagenBjork *et al.*, 2016).

Pada saat lalu lintas padat, emisi NO dari kendaraan bermotor menyumbangkan puncak konsentrasi untuk NO pada saat pagi hari. Di sisi lain, pembentukan NO<sub>2</sub> sebagai

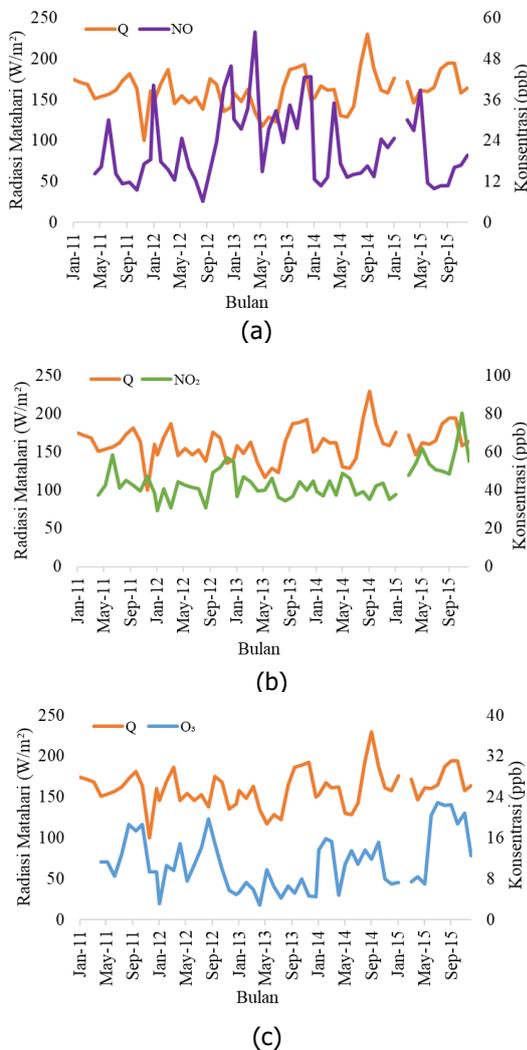
oksidator sekunder mencapai puncaknya terhambat beberapa saat ketika terjadi kesetimbangan reaksi antara NO dengan O<sub>3</sub> dan reaksi destruksi fotokimia NO<sub>2</sub> mencapai kondisi maksimum (Sharma *et al.*, 2010).



Gambar 3-6: Grafik hubungan antara O<sub>3</sub> dengan NO (a), NO<sub>2</sub> (b), NO<sub>x</sub> (c), dan (NO/NO<sub>2</sub>) (d) daerah Cipedes tahun 2011-2015.

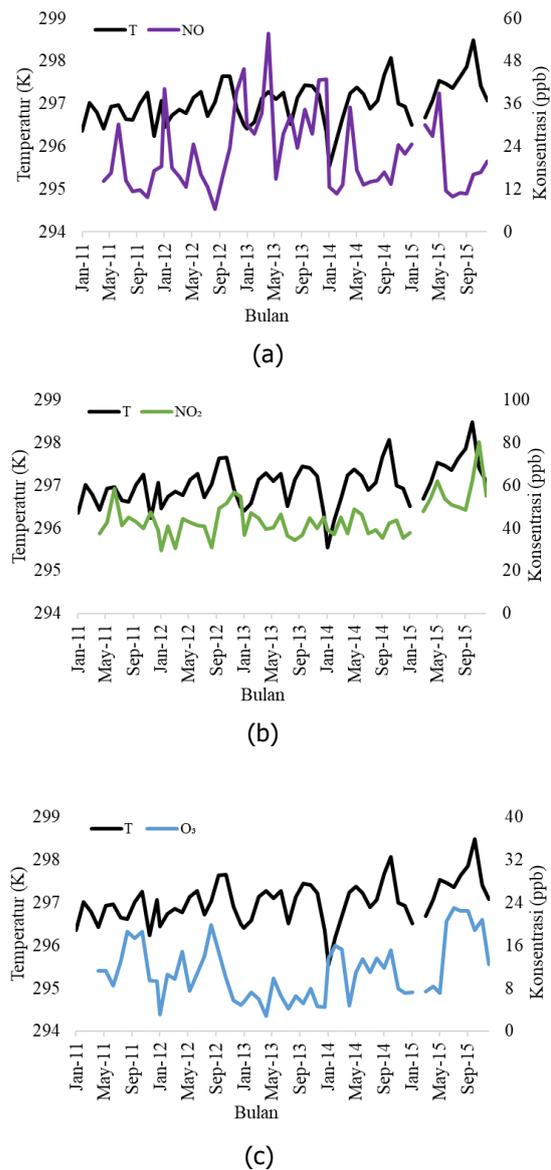
### 3.5 Hubungan antara NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> dengan Temperatur dan Radiasi Matahari

Perhitungan konsentrasi NO serta NO<sub>x</sub> dari *passive sampler* melibatkan radiasi matahari dan temperatur. Pembentukan dan variasi konsentrasi O<sub>3</sub> dan NO<sub>2</sub> melibatkan berbagai proses, seperti fotokimia yang berkaitan dengan temperatur dan keberadaan radiasi matahari. Selain itu, proses pengenceran dan dispersi NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dan O<sub>3</sub> di atmosfer sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi, seperti suhu, radiasi matahari, kecepatan angin, arah angin, dan kelembapan (Bari *et al.*, 2015; Salem *et al.*, 2009).



Gambar 3-7: Grafik hubungan antara radiasi matahari (Q) dengan NO (a), NO<sub>2</sub> (b) dan O<sub>3</sub> (c) di daerah Cipedes tahun 2011-2015.

Gambar 3-7 memperlihatkan bahwa konsentrasi NO<sub>2</sub> pada saat radiasi matahari tinggi, nilai konsentrasi NO<sub>2</sub> rendah. Pola yang sama juga terlihat untuk konsentrasi NO dimana konsentrasi NO meningkat pada saat radiasi matahari tinggi. Lain halnya untuk O<sub>3</sub> yang mempunyai pola yang sama dengan radiasi matahari, dimana pada saat radiasi matahari tinggi, nilai konsentrasi O<sub>3</sub> juga mengalami kenaikan, begitu pula sebaliknya.



Gambar 3-8: Grafik antara NO (a), NO<sub>2</sub> (b), dan O<sub>3</sub> (c) dengan Temperatur daerah Cipedes tahun 2011-2015.

Hubungan antara temperatur dengan NO, NO<sub>2</sub>, dan O<sub>3</sub> ditunjukkan Gambar 3-8. NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> mempunyai pola yang sama, dimana ketika temperatur naik, konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> juga naik. Kondisi untuk NO, apabila temperatur tinggi, maka konsentrasi NO akan menurun.

Penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi NO<sub>2</sub> mempunyai hubungan negatif dengan radiasi matahari dan hubungan yang positif dengan temperatur. Namun, radiasi matahari tidak signifikan mempengaruhi tinggi rendahnya konsentrasi NO<sub>2</sub>, sedangkan temperatur mempengaruhi secara signifikan terhadap tinggi rendahnya konsentrasi NO<sub>2</sub>. Hubungan negatif antara NO<sub>2</sub> dengan radiasi matahari disebabkan karena radiasi matahari memecah molekul NO<sub>2</sub> sesuai dengan persamaan 9 (Han *et al.*, 2017). NO mempunyai hubungan yang negatif terhadap radiasi matahari dan temperatur, namun tidak signifikan berpengaruh terhadap tinggi rendahnya konsentrasi NO.

Lain halnya dengan O<sub>3</sub>, dimana konsentrasi O<sub>3</sub> mempunyai hubungan yang positif dengan radiasi matahari dan temperatur dan signifikan mempengaruhi tinggi rendahnya konsentrasi O<sub>3</sub>. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari dan temperatur yang tinggi serta curah hujan dan kecepatan angin yang rendah dapat meningkatkan konsentrasi O<sub>3</sub> (Zainordin *et al.*, 2017).

Radiasi matahari mengkatalisasi reaksi pembentukan O<sub>3</sub> (persamaan (7) dan (8)) pada panjang gelombang < 424 nm (Han *et al.*, 2017). Korelasi antara radiasi matahari dan temperatur mengindikasikan adanya pengaruh proses fotokimia dalam pembentukan O<sub>3</sub> di daerah perkotaan (Han *et al.*, 2011 dalam Castaneda *et al.*, 2014).

#### 4 KESIMPULAN

Prediksi konsentrasi NO<sub>x</sub> dan NO dengan menggunakan konsentrasi NO<sub>2</sub> dan O<sub>3</sub> dari *passive sampler* didapatkan hasil konsentrasi NO sebesar 6,32 – 55,8 ppb dengan nilai rata-rata sebesar 21,97 ppb. Konsentrasi NO<sub>x</sub> diperoleh sebesar 37,28 – 100,83 ppb dengan nilai rata-rata sebesar 66,43 ppb. Perhitungan konsentrasi NO<sub>x</sub> dan NO melibatkan temperatur dan radiasi matahari, dimana radiasi matahari dan temperatur tidak signifikan mempengaruhi konsentrasi NO, tetapi signifikan mempengaruhi konsentrasi pembentukan O<sub>3</sub>, serta temperatur yang secara signifikan mempengaruhi konsentrasi NO<sub>2</sub>. Hal ini sejalan dengan reaksi fotokimia pembentukan NO, NO<sub>2</sub>, dan O<sub>3</sub>.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kimia LAPAN Bandung yang telah menyediakan data serta Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN untuk dukungan biaya penelitian.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Adon, M., C. Galy-Lacaux, V. Yoboue, C. Delon, J.P. Lacaux, P. Castera, E. Gardrat, J. Pienaar, H. Al Qurabi, D. Laouali, B. Diop, L. Sigha-Nkamdjou, A. Akpo, J.P. Tathy, F. Lavenu, dan E. Mougine, 2010. *Long Term Measurements of Sulfur Dioxide, Nitrogen Dioxide, Ammonia, Nitric Acid and Ozone in Africa Using Passive Samplers*, Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 7467-7487.
- Alghamdi, M.A., M. Khoder, R.M. Harrison, A.P. Hyvärinen, T. Hussein, H. Al-Jeelani, A. S. Abdelmaksoud, M.H. Goknil, I.I. Shabbaj, F.M. Almeahadi, H. Lihavainen, dan K. Hämeri, 2014. *Temporal Variations of O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the Urban Background Atmosphere of the*

- Coastal City Jeddah, Saudi Arabia*, Atmospheric Environment, 94, 205-214.
- Bari, Md.A., R.L.T. Curran, dan W.B. Kindzierski, 2015. *Field Performance Evaluation of Maxxam Passive Samplers for Regional Monitoring of Ambient SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> Concentration in Alberta, Canada*, Atmospheric Environment, 114, 39-47.
- Betss, A.K., R. Desjardins, dan D. Worth, 2013. *Cloud Radiative Forcing of the Diurnal Cycle Climate of the Canadian Prairies*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 8935-8953.
- Budiyono, A., S. Hamdi, N. Komala, dan Sumaryati, 2009. *Analisis Variasi Diurnal Ozon dan Precusornya pada Musim Kemarau dan Musim Hujan di Bandung*, Jurnal Sains Dirgantara, 7(1), 165-175.
- Castaneda, D.M.A., E.C. Teixeira, dan F.N. Pereira, 2014. *Time-Series Analysis of Surface Ozone and Nitrogen Oxides Concentration in an Urban Area at Brazil*, Atmospheric Pollution Research, 5, 411 - 420.
- Cerc, 2012. *NO<sub>x</sub> Chemistry Model. Atmospheric Dispersion Modelling System 5*, diakses [http://www.cerc.co.uk/environmental-software/assets/data/doc\\_techspec/P18\\_02.pdf](http://www.cerc.co.uk/environmental-software/assets/data/doc_techspec/P18_02.pdf), 15 Oktober 2016.
- Daut, I., M.I. Yusoff, S. Ibrahim, M. Irwanto, dan G. Nsurface, 2012. *Relationship between the Solar Radiation and Surface Temperature in Perlis*, Advance Material Research, 512-515 (2012), 143-147.
- Dumas, A., A. Andrisani, M. Bonnici, G. Graditi, G. Leanza, M. Madonia, dan M. Trancossi, 2015. *A New Correlation between Global Solar Energy Radiation and Daily Temperature Variations*, Solar Energy, 116, 117 - 124.
- Gasmi, K., A. Aljalal, W. Al-Basheer, dan M. Abdulahi, 2017. *Analysis of NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> Ambient Levels as a Function of Meteorological Parameters in Dhahran, Saudi Arabia*, WIT Transactions on Ecology and the Environment, 211, 77 - 86.
- Hagenbjörk, A., A. Malmqvist, K. Mattisson, N.J. Sommar, dan L. Modiq, 2017. *The Spatial Variation of O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and the Relation between Them in Two Swedish Cities*. Environ Monit Assess, 189, 161-172.
- Hamdi, S. dan Sumaryati, 2015. *Model Sederhana Radiasi Matahari Global di BPD Watukosek, Jawa Timur*, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIX HFI Jateng & DIY 2015. Yogyakarta, 25 April 2015.
- Han, S., H. Bian, Y. Feng, A. Liu, X. Li, F. Zeng, dan X. Zhang, 2011. *Analysis of the Relationship between O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> in Tianjin, China*. Aerosol and Air Quality Research, 11, 128-139.
- Han, J., M. Lee, X. Shang, G. Lee, dan L.L. Emmons, 2017. *Decoupling Peroxyacetyl Nitrate from Ozone in Chinese Outflows Observed at Gosan Climate Observatory*, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 10619 -10631.
- Lee H., 2016. *Analysis of Carbon Dioxide and Cloud Effect on Temperature in Northeast China*. Procedia Computer Science 91, 690-699.
- Mavroidis, I. dan A. Chaloulakou, 2011. *Long-term Trends of Primary and Secondary NO<sub>2</sub> Production in the Athens Area. Variation of the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Ratio*, Atmospheric Environment, 45, 6872-6879.
- NASA, 2005. *The Balance of Power in the Earth-Sun System*, diakses [https://www.nasa.gov/pdf/135642main\\_balance\\_trifold21.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/135642main_balance_trifold21.pdf), 21 Mei 2018.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 41, 1999. *Pengendalian pencemaran udara*.
- Powell, J., 2007. *Chemlab Wet Chemistry Measurement, Work Instructional Manual for NATA Accredited Laboratories*, CMAR-NATA-WC-2.0.2<sup>nd</sup> Edition.
- Qu, Y., J. An, Y. He, dan J. Zheng, 2016. *An Overview of Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and the Long-Range Transport of Oxidized Sulfur and Nitrogen Pollutants in East Asia*, Journal of Environmental Sciences, 44, 13 - 25.

- Salem, A.A., A.A Soliman, dan I.A. El-Haty, 2009. *Determination of Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, Ozone, and Ammonia in Ambient Air using the Passive Sampling Method Associated with Ion Chromatographic and Potentiometric Analysis*. Air Qual. Atmos. Health., 2(3), 133-145.
- Seok, B., D. Helmig, L. Ganzeveld, M.W. Williams, dan C.S. Vogel, 2013. *Dynamics of Nitrogen Oxides and Ozone Above and within a Mixed Hardwood Forest in Northern Michigan*. Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 7301 – 7320.
- Sharma, S.K., H. Pathak, A. Datta, M. Saxena, T. Saud, dan T.K. Mandal, 2011. *Study on Mixing Ratio of Atmospheric Ammonia and Other Nitrogen Components*, Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Science, 1(1), 26 – 35.
- Song, F., J.Y. Shin, R.J. Atresino, dan Y. Gao, 2011. *Relationships among the Springtime Ground-Level NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and NO<sub>3</sub> in the Vicinity of Highways in the US East Coast*, Atmospheric Pollution Research, 2, 374 – 383.
- Sumaryati dan G.A. Nugroho, 2015. *Konsentrasi CO<sub>2</sub> Permukaan sebagai Fungsi Radiasi Matahari di Bandung*, Proseding Seminar Nasional Sains Atmosfer 2015. Bandung, 22 April 2015.
- Tanti, D.A., 2016. *Perbandingan Metode Sampling secara Aktif dan Pasif dalam Pengukuran Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>) dan Ammonia (NH<sub>3</sub>) dalam Sampel Udara*. Skripsi Universitas Jendral Achmad Yani.
- Wang, J., J. Xu, Y. He, Y. Chen, dan F. Meng, 2016. *Long Range Transport of Nitrate in the Low Atmosphere over Northeast Asia*, Atmospheric Environment, 144, 315 – 324.
- Zainordin, N.S., N.A. Ramli, dan M. Elbayoumi, 2017. *Distribution and Temporal Behaviour of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> Near Selected Schools in Seberang Perai, Pulau Pinang and Parit Buntar, Perak, Malaysia*, Sains Malaysia, 46(2), 197 – 207.

