

Kinetika Formaldehida (HCHO) Dan Ozon (O₃) Di Daerah Urban (Studi Kasus: Jakarta)

*Formaldehyde Kinetics (HCHO) And Ozone (O₃)
In Urban Areas (Case Study: Jakarta)*

Nadiyah R. Wasi'ah^{1*)}, Driejana²

^{1*)} Program Studi Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email: wasiah@tl.itb.ac.id, Tlp : +6222 2502647

²⁾ Kelompok Keahlian Pengelolaan Udara dan Limbah, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email: driejana@tl.itb.ac.id

ABSTRAK

Formaldehida (HCHO) merupakan senyawa karbonil yang toksik dan berperan penting dalam reaksi kimia atmosfer sebagai sumber radikal dan menjadi prekursor oksidan (terutama ozon). HCHO berasal dari sumber primer (kendaraan bermotor) dan sumber sekunder (reaksi fotokimia). Namun pemantauan dan penelitian tentang konsentrasi senyawa karbonil dan perannya dalam reaksi kimia (pembentukan ozon) pada udara perkotaan di Indonesia masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kontribusi dan hubungan antara hidrokarbon (formaldehida) dengan ozon di daerah urban. Data yang digunakan merupakan data primer dan data sekunder. Pengukuran formaldehida dilakukan selama dua minggu dengan prinsip absorpsi dan dianalisa secara spektrofotometri. Dua metode empiris yang digunakan untuk memprediksi produksi ozon yaitu metode MIR (*maximum incremental reactivity*) dan metode propana ekuivalen. MIR adalah metode untuk menghitung reaktivitas senyawa organik terhadap pembentukan ozon. Sedangkan metode propana-ekuivalen bertujuan mengetahui ozon berdasarkan laju oksidasi hidrokarbon (formaldehida dan propana). Berdasarkan variasi diurnal ozon, metode MIR memberikan prediksi *overestimate* sedangkan metode propana ekuivalen memberikan prediksi *underestimate*. Nilai rerata konsentrasi ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) yang dihitung yaitu 34,39 (acuan data), 83,93 (metode MIR) dan 9,92 (metode propana ekuivalen). RMSE (*Root Mean Squared Error*) digunakan untuk menghitung rentang kesalahan kedua metode sebesar $81,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MIR) dan $31,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (propana ekuivalen). Kedua metode ini sangat mudah diaplikasikan dan cukup baik untuk digunakan dalam memprediksi konsentrasi ozon ketika data hidrokarbon yang dimiliki sangat terbatas. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kemampuan model prediksi, dibutuhkan pengembangan alternatif metode prediksi ozon dengan menambah data meteorologis dan konsentrasi hidrokarbon lainnya.

Kata kunci: Pencemar udara toksik, pencemar sekunder, prekursor ozon, reaktivitas Hidrokarbon

ABSTRACT

Formaldehyde (HCHO) is a toxic compound and plays an important role in atmospheric chemical reactions as a source of radicals and precursor of oxidants (mainly ozone). HCHO generates from primary sources (motor vehicles) and secondary sources (photochemical reactions). However, carbonyl compounds monitoring and research on their roles in a chemical reaction (ozone production) in Indonesia is still limited. This research investigated the contribution and relationship of hydrocarbons (formaldehyde) and ozone in urban areas. Formaldehyde measurements were carried out for two weeks using the absorption method, and samples were analyzed by spectrophotometric. Two

empirical methods were used to predict ozone production, namely MIR (maximum incremental reactivity) method, and the propane equivalent method. MIR is a method to calculate organic compounds reactivity in ozone formation. Meanwhile, the propane-equivalent method aims to determine the ozone estimate using the rate of hydrocarbons oxidation (formaldehyde and propane). The MIR method provided overestimation based on diurnal ozone variation, while the propane equivalent method show underestimates predictions. The mean value of ozone concentrations as the reference data in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ was 34.39, while estimates resulted in 83.93 (MIR method) and 9.92 (propane equivalent method), respectively. RMSE (Root Mean Squared Error) calculated the error range of the two methods found the values of $81.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MIR) and $31.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (propane equivalent). It is found that these methods did not predict ozone well. However, both methods were easy to apply and could estimate ozone concentration, although the information of hydrocarbons data was limited. It is suggested that alternative methods were applied by adding meteorological data and other hydrocarbons concentrations to produce a better prediction ozone model.

Keywords: Toxic air pollutant, a secondary pollutant, ozone precursor, Hydrocarbon Reactivity

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang sering terjadi di daerah urban. Aktifitas antropogenik dan biogenik mengemisikan pencemar udara ke atmosfer. Sumber antropogenik meliputi kendaraan bermotor, aktifitas industri, dan domestik. Sedangkan sumber biogenik didominasi oleh aktivitas tumbuhan, dekomposisi senyawa organik oleh bakteri dsb. Di daerah urban seperti Jakarta, mayoritas sumber pencemar udara berasal dari sumber antropogenik (sektor transportasi atau kendaraan bermotor). Pada Tahun 2014, tercatat lebih dari 13 juta unit kendaraan bermotor di DKI Jakarta dengan penambahan sepeda motor per tahun sebesar 10,54%¹. Dalam 40 tahun terakhir, laju pertumbuhan kendaraan bermotor di dunia diprediksi akan terus meningkat di masa depan melebihi lajunya pertumbuhan populasi manusia². Hal ini akan berimplikasi langsung pada konsentrasi pencemar dari emisi gas buang.

Konsentrasi pencemar di daerah urban bervariasi dan dipengaruhi oleh kuantitas emisi dari sumber, kemampuan dispersi di atmosfer dan

karakteristik pencemar. Menurut penelitian di Amerika Serikat, kendaraan bermotor merupakan sumber yang mengemisikan lebih dari 50% CO dan 35% Hidrokarbon dan NO_x ³. Semua polutan primer yang diemisikan oleh kendaraan bermotor dapat bereaksi secara kimiawi di atmosfer dan berpotensi menghasilkan polutan sekunder. Perubahan kondisi meteorologi dan topografi dapat mempengaruhi konsentrasi pencemar udara primer dan sekunder secara spasial dan temporal⁴.

Di perkotaan, terutama Jakarta, senyawa karbonil dapat dihasilkan langsung melalui proses pembakaran pada kendaraan bermotor. Bensin dan solar yang digunakan sebagai bahan bakar kendaraan bermotor terbukti menghasilkan senyawa karbonil. Kontribusi tiga senyawa utama golongan karbonil/aldehida yaitu formaldehida sebesar 47,9%, acetaldehida sebesar 21,0% dan propanal sebesar 9,9% dari total emisi solar yang diukur⁵. Di kota Nanning, China urutan konsentrasi aldehida yang terukur di udara adalah asetaldehida > formaldehida > aseton > benzaldehida > propionaldehida >

syklohexanon > butiraldehida > hexaldehida > valeraldehida⁶.

Senyawa karbonil merupakan pencemar toksik yang mudah ditemukan di udara perkotaan dan mendapat perhatian khusus. Rute paparan formaldehida (HCHO) melalui pernapasan (inhalasi) dalam fase gas, pencernaan akibat tertelan benda yang mengandung HCHO dan terpapar melalui kulit⁷. Senyawa karbonil dapat berdampak buruk jangka pendek terhadap kesehatan yaitu dengan menyebabkan batuk, pusing dan mata berair ketika terjadi proses inhalasi formaldehida pada konsentrasi 0,1 ppm_v di udara⁸. HCHO bersifat iritasi pada jaringan tubuh saat terjadi paparan. Gejala paling umum akibat terpapar formaldehida di udara adalah iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokkan pada konsentrasi formaldehida 0,4-3 ppm_v di udara ambien dan membahayakan kesehatan atau kehidupan ketika konsentrasi formaldehida 20 ppm_v⁹. Formaldehida berpotensi untuk menyebabkan kejadian asma pada anak¹⁰. Formaldehida bersifat karsinogenik pada sistem pernapasan manusia⁸.

Senyawa aldehida memiliki peran penting dalam reaksi fotokimia di atmosfer, salah satunya adalah senyawa formaldehida yang dapat berperan sebagai prekursor pembentukan oksidan (ozon). Senyawa ozon merupakan oksidan terpenting yang dihasilkan dari reaksi fotokimia di troposfer ataupun sejumlah kecilnya bersumber dari O₃ di stratosfer. Pembentukan ozon berasal dari proses fotodisiasi senyawa hidrokarbon di atmosfer serta dipengaruhi oleh senyawa radikal. Pembentukan ini merupakan proses kompleks karena banyak VOCs yang berasal dari antropogenik dan biogenik diemisikan ke atmosfer sehingga VOCs akan bereaksi dengan OH pada siang hari dan dengan NO₃ pada malam hari¹⁰.

Reaksi fotokimia di atmosfer menghasilkan berbagai macam molekul

seperti oksidan kuat (ozon) yang berpotensi merusak tanaman and mengiritasi sistem pernafasan. Ozon merupakan masalah pencemaran lingkungan di berbagai daerah. Paparan ozon dalam jangka lama menyebabkan penyakit asma¹¹. Selain itu, terdapat korelasi antara konsentrasi ozon dengan kejadian penyakit kardiovaskular di Iran¹². Peningkatan konsentrasi ozon di ambien memiliki hubungan yang erat dengan kejadian penyakit pernapasan¹³. Kematian dini sangat mungkin diakibatkan oleh pencemar ozon dan tindakan untuk meningkatkan kualitas udara mampu menurunkan kejadian kematian dini di Amerika Serikat¹⁴.

Ozon merupakan polutan sekunder yang berasal dari interaksi fotokimia senyawa volatil organik dan nitrogen oksida. Berbagai jenis senyawa organik diemisikan ke atmosfer memiliki kemampuan reaksi kimia dengan mekanisme reaksi dan laju reaksi yang berbeda. Perbedaan ini menyebabkan senyawa organik memiliki kemampuan yang berbeda terhadap pembentukan ozon berdasarkan "reaktivitas" hidrokarbon.

Hal ini menjadi faktor yang penting untuk diperhatikan dalam pemodelan kualitas udara untuk memprediksi ozon. Model yang menginvestigasi hubungan antara formaldehida dengan pembentukan ozon salah satunya adalah observation based model¹⁵. Namun metode ini membutuhkan banyak input dan/atau parameter yang sulit dipastikan untuk menghitung konsentrasi hidrokarbon dan NO_x. Metode ini maka berpotensi memiliki kesalahan yang signifikan. Selain itu model ini sangat bergantung pada keakuratan inventarisasi untuk emisi hidrokarbon¹⁵. Penelitian Wasi'ah dan Driejana (2017) untuk kasus Jakarta menggunakan metode multivariat dengan hidrokarbon sebagai salah satu parameter independen dapat memprediksi konsentrasi ozon sebesar 46,32% di wilayah Thamrin. Hasil ini

menunjukkan masih cukup banyak proporsi dari variasi konsentrasi yang belum dapat dijelaskan dengan model tersebut¹⁶. Oleh karena itu, dibutuhkan variabel/metode lain untuk memperoleh hubungan ozon dan senyawa prekursor. Pada penelitian ini, data pemantauan langsung digunakan untuk menganalisa keterkaitan hubungan antar prekursor (formaldehida) dan produk (Ozon) dengan menggunakan metode reaktivitas yang spesifik untuk jenis hidrokarbon tertentu.

METODE

Metode sampling udara yang digunakan pada penelitian ini adalah metode sampling aktif. Metode sampling ini bertujuan untuk mengumpulkan sampel formaldehida di udara dilakukan dengan memasukkan udara ke dalam *impinger* yang telah berisi larutan penyerap berupa aquades sebanyak 25 ml. Botol *impinger* dihubungkan dengan *rotameter* dan pompa vakum dengan menggunakan selang silikon. Kecepatan aliran udara yang masuk kedalam tabung *impinger* diatur pada debit 1 L/menit. Metode ini merujuk pada metode pengambilan sampel formaldehida di udara berdasarkan prinsip absorpsi gas^{17,18}.

Daerah studi yang terpilih adalah DKI Jakarta karena wilayah tersebut memiliki pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang tinggi dan padat aktivitas manusia. Pengambilan sampel dilakukan pada wilayah studi dengan jam pengukuran selama 15 jam dari pukul 07.00 - 22.00 WIB. Sampel akan diganti setiap satu jam sekali. Pengambilan sampel dilakukan selama dua minggu (22 Juli - 4 Agustus 2016). Parameter yang diukur di lapangan (data primer) adalah senyawa hidrokarbon yang diwakili oleh konsentrasi rata-rata per jam formaldehida. Sedangkan data sekunder yang digunakan pada penelitian ini adalah konsentrasi ozon

per jam. Data sekunder diperoleh dari BPLHD DKI Jakarta.

Skenario ke-1 adalah model dengan Metode MIR/ *maximum incremental reactivity* untuk menghitung reaktivitas senyawa organik terhadap pembentukan ozon. MIR menentukan potensi jumlah ozon yang terbentuk akibat keberadaan senyawa organik. Nilai MIR HCHO adalah 7,2 (g O₃/g HCHO)¹⁹. Maka, konsentrasi ozon prediksi diestimasi sebagai perkalian antara konsentrasi HCHO dengan MIR HCHO. Potensi konsentrasi ozon tersebut dapat dihitung dengan MIR berdasarkan persamaan 1¹⁹.

[O₃]=koefisien MIR x [senyawa organik] (1)

Metode ke-2 untuk mengkuantifikasi reaktivitas senyawa organik volatil adalah metode propana-ekuivalen. Metode ini mengukur konsentrasi senyawa organik terhadap reaktivitas senyawa organik dengan radikal hidroksil (*OH) dan reaktivitas propana. Reaksi oksidasi hidrokarbon biasanya diinisiasi oleh reaksi hidrokarbon dengan *OH. Laju oksidasi hidrokarbon sebanding dengan laju produksi ozon di lokasi dan waktu tersebut¹⁵. Metode ini membutuhkan nilai konstanta OH-Formaldehida dan Konstanta OH-propana. Nilai KOH C₃H₆ pada 298 K adalah 26,3 x 10¹² cm³/molekul.detik sedangkan KOH HCHO pada 298 K adalah sebesar 9,37 x 10¹² cm³/molekul.detik²⁰. Untuk menghitung potensial ozon dengan menggunakan metode propana-ekuivalen, maka digunakan persamaan 2 sebagai berikut:

**propena-ekuivalen(j) =
[senyawa organik(j)] x (K_{OH(j)}/K_{OH C₃H₆(j)}) (2)**

Koefisien *spearman* merupakan uji statistik non parametrik untuk mengkuantifikasi kekuatan hubungan

antara data terukur dengan hasil model metode MIR atau metode propana ekuivalen. Metode RMSE (*Root Mean Squared Error*) dapat digunakan untuk membandingkan antara hasil konsentrasi ozon dari perhitungan kedua metode tersebut (Y_1) dengan nilai konsentrasi ozon yang terukur dari stasiun monitoring (Y_2). Perhitungan RMSE ditunjukkan oleh persamaan 3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Y_2 - Y_1)^2}{\text{Jumlah data}}} \quad (3)$$

HASIL

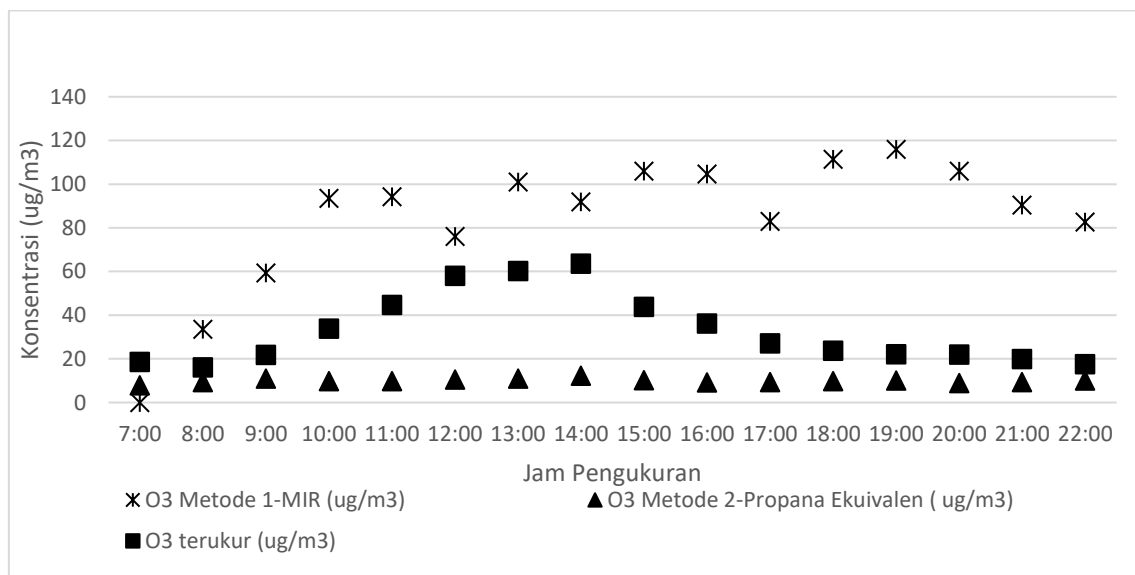
Nilai rerata konsentrasi ozon berdasarkan data sekunder pengukuran adalah 34,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil estimasi dengan kedua metode adalah 83,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (metode MIR) dan 9,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(metode propana ekuivalen). Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai pengukuran dan estimasi model. Nilai RMSE setiap metode dihitung menggunakan persamaan 3 dan persen kesalahan untuk setiap metode ditunjukkan pada Tabel 1.

Variasi diurnal ozon mendeskripsikan perubahan rerata konsentrasi ozon setiap jam dari data dan kedua metode selama periode pengukuran di wilayah studi. Variasi diurnal ozon ditunjukkan oleh Gambar 1. Tabel korelasi *spearman* dari tiga metode di lokasi studi ditunjukkan oleh Tabel 2. Perbandingan antara hasil prediksi konsentrasi ozon dibanding data konsentrasi ozon ditunjukkan oleh Gambar 2.

Tabel 1. Rerata Konsentrasi, RMSE, % Kesalahan dari 3 metode

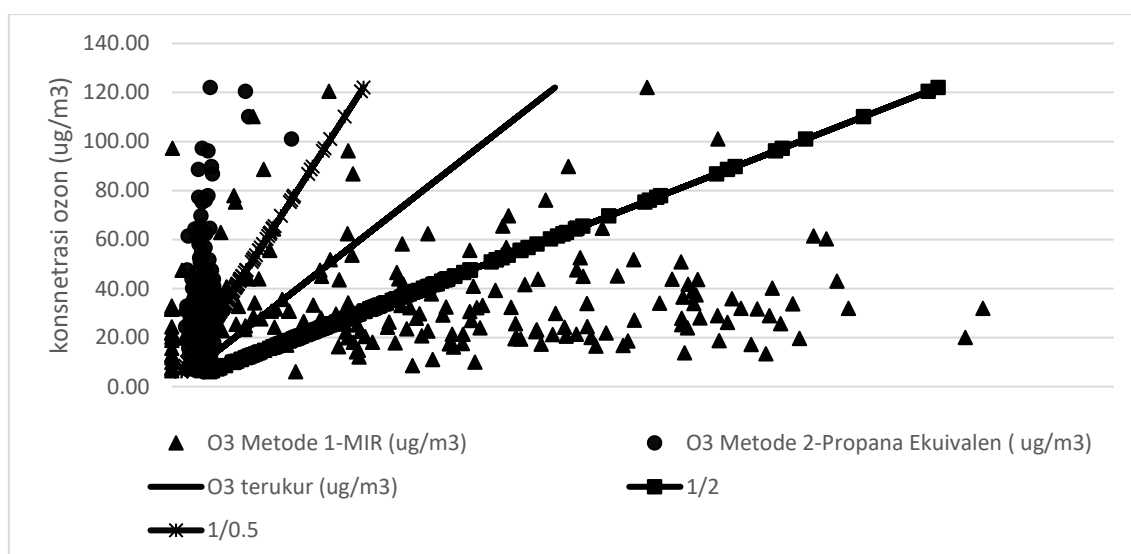
Kategori	Data (jumlah data =192)	Metode 1 MIR	Metode 2 propana ekuivalen
Rerata Konsentrasi Ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34,39	83,93	9,92
RMSE	0	81,23	31,90
%kesalahan	0	236%	93%



Gambar 1. Variasi Diurnal Ozon dari Metode Terukur, Metode 1-MIR dan Metode 2-Propana Ekuivalen

Tabel 2. Korelasi Spearman dari 3 metode

Korelasi Spearman	Data	Metode 1 MIR	Metode 2 propana ekuivalen
Data	1	0,397	0,497
Metode 1 MIR		1	0,059
Metode 2 propana ekuivalen			1



Gambar 2. Hasil Prediksi Konsentrasi Ozon Terukur Terhadap Model

PEMBAHASAN

Reaksi pembentukan ozon di troposfer sangat dipengaruhi oleh kehadiran senyawa hidrokarbon atau *volatile organic compound* (VOC). Proses fisik deposisi basah dan kering mampu menyisihkan senyawa organik. VOC mengalami transformasi melalui reaksi kimia fotolisis, reaksi dengan radikal hidroksil, reaksi dengan radikal nitrat dan reaksi dengan O_3 ²⁰.

Kehadiran VOCs, NO_x , dan sinar matahari dapat menginisiasi pembentukan oksidan ozon. Sinar matahari akan menyediakan radiasi UV yang memecah molekul stabil sehingga menghasilkan radikal *OH . Dengan kehadiran NO_x , radikal *OH akan

mengkatalis oksidasi senyawa VOC, lalu menghasilkan CO_2 dan uap air. Senyawa organik secara parsial akan teroksidasi menghasilkan produk *intermediat* hasil oksidasi seperti aldehida, keton dan karbon monoksida serta O_3 sebagai *by-product*²¹. Formaldehida juga merupakan produk dalam fotolisis di atmosfer. Aldehida dan keton merupakan produk utama dari fotooksidasi dari senyawa hidrokarbon di atmosfer²². Oleh karena itu, senyawa aldehida memiliki peran ganda sebagai prekursor ozon dan juga produk dari hasil fotokimia.

Laju pembentukan ozon dipengaruhi oleh jumlah senyawa organik volatil (VOCs) yang hadir di atmosfer, konstanta laju reaksi untuk masing-

masing VOC, jumlah *OH dan spesies lainnya yang mungkin bereaksi dengan senyawa organik. Pembentukan ozon akan terus berlangsung selama prekursor utama NO_x dan radikal utama yaitu *OH dan radikal peroksi/alkil radikal (RO₂) tersedia. Alkil radikal merupakan produk reaksi *OH dengan senyawa organik volatil. Reaksi ozon akan berhenti setelah konsentrasi prekursor sangat kecil.

Metode MIR (*Maximum Incremental Reactivity*) dan propena-ekuivalen merupakan metode untuk memperkirakan potensial konsentrasi ozon yang terbentuk berdasarkan kereaktifan satu senyawa hidrokarbon. Metode pendekatan pertama yang dapat digunakan adalah MIR. MIR tidak memiliki dimensi dan mendeskripsikan berapa gr ozon yang terbentuk tiap gram hidrokarbon.

Metode MIR ini merujuk pada pendekatan model EKMA (*The Empirical Kinetic Modeling Approach*). EKMA mengasumsikan jika model *single-box* mensimulasi perubahan konsentrasi prekursor (NO_x dan senyawa organik), perubahan tinggi inversi, temperatur dan laju fotolisa yang bervariasi. Untuk skenario MIR maka konsentrasi NO_x diatur supaya konsentrasi hidrokarbon menghasilkan reaktivitas paling tinggi

Metode MIR ini telah dipakai di beberapa penelitian sebelumnya untuk menentukan senyawa organik yang paling potensial untuk pembentukan ozon. Senyawa paling potensial menghasilkan ozon adalah senyawa formadehida, *xylenes*, *trimethyl-benzenes*, asetaldehida dan *propene* di Beijing²³, senyawa *xilene* dan *toluene* di Roma²⁴. Senyawa formaldehida ditemukan berkontribusi sebanyak 34% konsentrasi ozon di Roma²⁵.

Metode kedua adalah metode propena-ekuivalen. Metode propena-ekuivalen merupakan metode untuk

mengetahui konsentrasi hidrokarbon berdasarkan skala kereaktifan radikal OH terhadap kereaktifan propena²³. Metode ini mengestimasi kontribusi relatif setiap jenis hidrokarbon terhadap pembentukan ozon dalam satu massa udara di wilayah dan waktu tertentu. Metode ini melibatkan dua faktor utama dalam pembentukan ozon adalah kereaktifan hidrokarbon terhadap OH dan konsentrasi senyawa hidrokarbon di ambien. Metode propena-ekuivalen lebih akurat untuk mengetahui kontribusi setiap hidrokarbon yang teroksidasi dibanding hanya mempertimbangkan konsentrasi saja. Laju produksi ozon sebanding dengan laju karbon organik yang teroksidasi dan tidak bergantung terhadap jenis hidrokarbon^{15,26}. Metode propena-ekuivalen sebanding dengan ppb atau µg/m³ konsentrasi HCHO, konstanta laju reaksi HCHO terhadap OH serta berbanding terbalik dengan konstanta laju pertumbuhan OH dan propena^{6,27,28}.

Jika memiliki data spesies hidrokarbon yang lebih banyak maka dapat diurutkan hidrokarbon yang paling potensial dalam penentuan ozon dengan kedua metode ini, sehingga dapat dilakukan pengontrolan terhadap sumber yang menghasilkan hidrokarbon tersebut.

Hasil prediksi konsentrasi ozon dilakukan dengan dua metode (MIR dan propena-ekuivalen) dapat ditunjukkan oleh Gambar 1. Hasil perhitungan konsentrasi ozon oleh metode MIR ditunjukkan dengan ozon prediksi satu sedangkan hasil perhitungan ozon oleh metode propena ditunjukkan oleh ozon prediksi dua. Jika hasil keduanya dibandingkan dengan ozon terukur maka metode MIR melebihi prediksi ozon terukur (*overestimate*) sedangkan metode propena ekuivalen cenderung *underestimate* atau lebih kecil dibanding dengan ozon metode terukur. Variasi diurnal ozon ini menunjukkan jika konsentrasi ozon bersifat fluktuatif

sepanjang waktu pengukuran. Ozon yang merupakan pencemar sekunder yang terbentuk pada kondisi meteorologis yang sesuai (sinar matahari yang cukup, temperatur tinggi dan kecepatan angin rendah)²⁹. Sedangkan kedua metode hitung ini mengasumsikan tidak ada faktor meteorologis yang mempengaruhi sehingga hasil prediksi kurang baik yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

Nilai rangking *spearman* dihitung untuk mengetahui korelasi antara metode MIR dan propana ekuivalen terhadap metode terukur. Koefisien korelasi yang dihasilkan adalah 0,397 (metode MIR) dan 0,497 (metode propana ekuivalen). Kedua nilai tersebut mendeskripsikan hubungan positif yang lemah antara metode terukur dan kedua metode yang digunakan³⁰. Namun, hal ini menunjukkan jika metode pertama dan kedua mampu menghasilkan pola data ozon cenderung sama dengan data terukur. Ketika data ozon terukur mengalami kenaikan maka hasil prediksi ozon juga mengalami kenaikan.

Untuk membandingkan antara metode tersebut dihitung nilai RMSE terhadap konsentrasi rata-rata ozon hasil pengukuran stasiun otomatis. Rentang kesalahan metode MIR adalah sebesar 81,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan rentang kesalahan propana ekuivalen lebih kecil yaitu sebesar 31,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Metode propana ekuivalen menunjukkan hasil yang relative lebih baik dibandingkan dengan metode MIR. Namun, dibutuhkan pendekatan dengan pemodelan lain untuk mengetahui lebih rinci hubungan formaldehida (senyawa organik) dengan pembentukan ozon, misalnya pemodelan kinetika dan pemodelan statistika/matematis yang mempertimbangkan faktor meteorologis³¹. Selain itu juga diperlukan penambahan data

konsentrasi prekursor lainnya seperti NO_2 dan hidrokarbon jenis lainnya³².

SIMPULAN

Nilai rerata konsentrasi ozon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 34,39 yang diperoleh dari data pengukuran, sedangkan metode MIR, dan propana ekuivalen menghasilkan 83,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 9,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Rentang kesalahan yang dihitung menggunakan RMSE (*Root Mean Squared Error*) adalah 81,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (MIR) dan 31,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (propana ekuivalen). Kedua metode belum menggambarkan prediksi ozon secara baik, karena hanya menggunakan data input hidrokarbon yang sederhana. Spesies VOC dan metode pemodelan lainnya seperti metode kinetika/statistik diperlukan untuk menghasilkan estimasi konsentrasi ozon yang lebih baik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari riset "*Dampak Emisi Transportasi Terhadap Konsentrasi Ambien Pencemar Udara Bersifat Toksik dan Karsinogen di Perkotaan*", Riset Unggulan Perguruan Tinggi ITB, 2016.

DAFTAR RUJUKAN

1. BPS DKI Jakarta(2016). Statistik Transportasi: Jakarta
2. Coper,C.David And F.C.Alley(1986). Air Poluution Control: A Design Approach. Wiley: US
3. Never, Noel de (1995) Air Pollution Control Engineering.Wiley: USYao, Z., Jiang, X., Shen, X., Ye, Y., Cao, X., Zhang, Y., dan He, K. (2015). On-road emission characteristics of carbonyl compounds for heavy-duty diesel trucks. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(3), 915–925. <http://doi.org/10.4209/aaqr.2014.10.0261>
4. Lai, H., Cai, Q.-Y., Wen, S., Chi, Y., Guo, S., Sheng, G., dan Fu, J. (2010). Seasonal and diurnal

- variations of carbonyl compounds in the urban atmosphere of Guangzhou, China. *The Science of the Total Environment*, 408(17), 3523–3529.
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.013>
5. Yao, Z., Jiang, X., Shen, X., Ye, Y., Cao, X., Zhang, Y., dan He, K. (2015). On-road emission characteristics of carbonyl compounds for heavy-duty diesel trucks. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(3), 915–925.
<http://doi.org/10.4209/aaqr.2014.10.0261>
 6. Guo, S., Chen, M., He, X., Yang, W., dan Tan, J. (2013). Seasonal and Diurnal Characteristics of Carbonyls in Urban Air in Qinzhou, China, 2, 1–12.
<http://doi.org/10.4209/aaqr.2013.12.0351>
 7. Kim, K. H., Jahan, S. A., & Lee, J. T. (2011). Exposure to formaldehyde and its potential human health hazards. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 29(4), 277-299.
<https://doi.org/10.1080/10590501.2011.629972>
 8. National Toxicology Program (June 2011). Report on Carcinogens, Twelfth Edition. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program. Retrieved June 10, 2011, from:
<http://ntp.niehs.nih.gov/go/roc12>.
 9. IARC (1982). IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Vol. 29 International Agency for Research on Cancer: France. 345-389.
 10. Kley, D., Kleinmann, M., Sanderman, H., dan Krupa, S. (1999). Photochemical oxidants : state of the science. *Environmental Pollution*, 100, 19–42.
 11. WHO, 2006. Air Quality Guidelines – Global Update 2005. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark
 12. Goudarzi, G., Zallaghi, E., Neissi, A., Ahmadi, A. K., Saki, A., BABAEI, A. A., ... & Mohammadi, M. J. (2013). Cardiopulmonary mortalities and chronic obstructive pulmonary disease attributed to ozone air pollution.
 13. Kalantzi, E. G., Makris, D., Duquenne, M. N., Kaklamani, S., Stapountzis, H., & Gourgoulisanis, K. I. (2011). Air pollutants and morbidity of cardiopulmonary diseases in a semi-urban Greek peninsula. *Atmospheric environment*, 45(39), 7121-7126.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.032>
 14. Fann, N., & Risley, D. (2013). The public health context for PM 2.5 and ozone air quality trends. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1007/s11869-010-0125-0>
 15. Chameides, W. L., Fehsenfeld, F., M. O. Rodgers., C. Cardelino., J. Martinez, Parrish., D., W. Lonneman, A. R. Lawson, R. A. Rasmussen, P. Zimmerman, J. G., Dan P. Middleton, A. T. W. (1992). Ozone Precursor Relationships in the Ambient Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 97(91), 6037–6055.
 16. Wasi'ah, N. R., & Driejana, D. (2017). Modelling of Tropospheric Ozone Concentration in Urban Environment. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 3(6).
<http://dx.doi.org/10.12962/j23546026.y2017i6.3279>

17. Lodge Jr, J. P. (1988). *Methods of air sampling and analysis*. CRC Press: US
18. Wight, G. D. (1994). *Fundamentals of air sampling*. CRC press: US
19. Carter, W. P. L. (1994). Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds. *Air dan Waste*, 44(7), 881–899.
<https://doi.org/10.1080/1073161X.1994.10467290>
20. Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO(x). *Atmospheric Environment*, 34(V), 2063–2101.
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00460-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4)
21. Jenkin, M. E., dan Clemitshaw, K. C. (2002). Chapter 11 Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. *Developments in Environmental Science*, 1, 285–338.
22. Grosjean, D. (1991). Ambient Levels of Formaldehyde, Acetaldehyde, and Formic Acid in Southern California: Results of a One-Year Base-Line Study. *Environmental Science dan Technology*, 25(4), 710–715.
<https://doi.org/10.1021/es00016a016>
23. Duan, J., Tan, J., Yang, L., Wu, S., dan Hao, J. (2008). Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing. *Atmospheric Research*, 88(1), 25–35
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.09.004>
24. Fanizza, C., Manigrasso, M., Inconato, F., Schirò, R., dan Avino, P. (2011). Temporal trend and ozone formation potential of aromatic hydrocarbons in urban air of Rome, 539–544.
<http://hdl.handle.net/11695/73411>
25. Possanzini, M., Tagliacozzo, G., dan Cecinato, A. (2007). Ambient Levels and Sources of Lower Carbonyls at Montelibretti, Rome (Italy). *Water, Air, and Soil Pollution*, 183(1–4), 447–454.
<https://doi.org/10.1007/s11270-007-9393-1>
26. Atkinson, R., dan Arey, J. (2003). Atmospheric Degradation of Volatile Organic Compounds. *Chemical Reviews*, 103(3), 4605–4638.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.001>
27. So, K. L., dan Wang, T. (2004). C3-C12 non-methane hydrocarbons in subtropical Hong Kong: Spatial-temporal variations, source-receptor relationships and photochemical reactivity. *Science of the Total Environment*, 328(1–3), 161–174.
<https://doi.org/10.1016/j.scitoten.v.2004.01.029>
28. Guo, S., Chen, M., dan Tan, J. (2016). Seasonal and diurnal characteristics of atmospheric carbonyls in Nanning, China. *Atmospheric Research*, 169(July 2012), 46–53.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.028>
29. Comrie, A. C. (1997). Comparing Neural Networks and Regression Models for Ozone Forecasting, 47(June), 653–663.
30. Sudarno. (2017). *Data Analysis*. Departemen Statistika Fakultas Sains dan Matematika UNDIP: Semarang
31. Hosseinibalam, F., dan Hejazi, A. (2012). Influence of Meteorological Parameters on Air Pollution in Isfahan, 3rd international

- conference on biology, Environment and chemistry.46.
32. Abdul-Wahab, S. A., Bakheit, C. S., & Al-Alawi, S. M. (2005). Principal component and multiple regression analysis in modelling of ground-

level ozone and factors affecting its concentrations. *Environmental Modelling & Software*, 20(10), 1263-1271.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.001>