



## Pendugaan Tingkat Keasaman Air Hujan Berdasarkan Konsentrasi Pencemar Udara Ambien (Studi Kasus : DKI Jakarta)

The Estimation of Rainwater Acidity Level based on the Ambient Air Pollutants Concentration (Case Study: DKI Jakarta)

**Ana Turyanti\* dan Chaerunnisa**

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 28 January 2017

Received in revised from 13 June 2017

Accepted 29 September 2017

doi: 10.29244/j.agromet.31.2.71-79

#### Keywords:

Acid rain  
Air quality model  
Henry's law  
Wet deposition  
WRF-Chemistry

### ABSTRACT

Nowadays, acid rain is a common phenomenon occurring in metropolitan city, such as Jakarta. Human activities including transportation and industries in and surrounding this city have increased pollutants in the atmosphere, which lead to an increased of acid rain events. Analyzing on rainwater pH is common approach to assess whether an acid rain occurs or not. However, information on this pH value for greater Jakarta is limited. Here we used a combined of Henry's law approach and Weather Research Forecasting-Chemistry (WRF-Chem) to estimate rainwater pH in Jakarta. The WRF-Chem was employed to generate SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations. Results showed that rainwater pH is below the threshold (pH = 5.6) in observation and modeling (Henry's approach) throughout greater Jakarta. Rainwater pH showed a diurnal fluctuation with low value during night and morning, but high value at afternoon. Likely, season contributed to distribution of acid rain. Based on Henry's approach, some regions (Bundaran HI, Kebon Jeruk, and Jagakarsa) revealed a high potency of acid rain for rainy season as indicated by the H<sup>+</sup> concentration. On other hand, a high potency of acid rain during dry season was observed in Kelapa Gading and Bundaran HI. Our findings indicated that traffic may influence on rain acid events as shown by a high H<sup>+</sup> concentration in Bundaran HI both dry and wet seasons.

## PENDAHULUAN

Atmosfer terdiri dari beberapa gas dengan jumlah yang bervariasi dari waktu ke waktu, dan beberapa gas berjumlah konstan. Beberapa jenis gas dengan komposisi berubah-ubah yaitu H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, dan CO, sedangkan gas dengan komposisi sangat berubah-ubah antara lain O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, COS, dan H<sub>2</sub>O (Fowler David et al., 2013; Monks et al., 2015; Nesaratnam and Taherzadeh, 2014). Gas tersebut dapat dihasilkan oleh alam (Thangarajan et al., 2013; Vanderkluysen et al., 2014; Werner et al., 2013) maupun aktivitas manusia (Cook et al., 2013; May et al., 2014; Miller et al., 2013). Apabila gas-gas yang berubah-ubah di atmosfer meningkat secara lokal maupun global dan dapat menurunkan kualitas udara ambien (Brauer et al., 2016), atau disebut sebagai pencemaran udara.

Pencemaran udara yang terjadi akan berpengaruh pada proses fisik maupun kimia pada lapisan atmosfer, salah satunya yaitu deposisi asam (Vet et al., 2014). Konsentrasi pencemar di lapisan atmosfer dapat berkurang melalui deposisi, yaitu penurunan konsentrasi pencemar karena pindah ke permukaan, baik sebagai deposisi kering maupun deposisi basah (Connan et al., 2013; Kryza et al., 2012; Pan et al., 2012; Pan and Wang, 2015). Deposisi basah dapat menyebabkan masalah baru yaitu hujan asam. Hujan asam dapat menyebabkan korosi (Chen et al., 2013; Gerengi et al., 2016; Yang et al., 2012), berdampak buruk terhadap kesehatan (Pagano et al., 2015), kerugian dalam bidang lingkungan atau kehutanan (Wang et al., 2013), pertanian (Wang et al., 2014), dan material (Chen et al., 2013).

Salah satu indikator dalam menganalisis hujan asam adalah nilai pH air hujan. Batas normal pH air

\* Corresponding author. aturyanti@gmail.com

hujan adalah 5.6, apabila air hujan memiliki pH di bawah 5.6 dianggap sebagai hujan asam (Charlson and Rodhe, 1982). Sumber utama hujan asam adalah jenis zat pencemar  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , karena gas tersebut dapat membentuk asam kuat yang dapat mempengaruhi kualitas air hujan di suatu wilayah. Wilayah Indonesia yang berpotensi tinggi mengalami hujan asam adalah kawasan kota besar (Jakarta, Bandung, Kototabang) dan kawasan industri (Cikarang dan Serpong). Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta merupakan wilayah yang padat penduduk, transportasi, dan kegiatan industri sehingga wilayah tersebut memiliki konsentrasi zat asam yang tinggi di atmosfer (Both et al., 2013; Santoso et al., 2013). Gas  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  merupakan sumber pencemar utama yang dapat menyebabkan hujan asam (Dubey, 2013). Hal ini menjadikan wilayah DKI Jakarta sebagai salah satu wilayah yang perlu dikaji tingkat keasaman pada air hujan.

Ketersediaan data derajat keasaman air hujan di berbagai kota di Indonesia yang masih kurang, terutama DKI Jakarta, menjadi salah satu masalah dalam proses analisis hujan asam lokal. Daerah urban seperti kawasan industri, pemukiman dan transportasi memiliki peluang yang lebih besar terjadi hujan asam dibandingkan dengan daerah rural (Ge et al., 2016), sehingga diperlukan data yang lengkap untuk analisis lanjutan. Dalam mengatasi masalah tersebut, pendekatan hukum Henry (Mackay and Shiu, 1981) dapat digunakan untuk menganalisis keasaman air hujan berdasarkan data kualitas udara ambien. Namun, data kualitas udara ambien juga tidak tersedia dalam periode yang mencukupi untuk analisis, sehingga

digunakan pemodelan kualitas udara untuk mensimulasikan data zat pencemar yang mempengaruhi kualitas udara. Salah satu pemodelan kualitas udara adalah WRF-Chem, yaitu model Weather and Research Forecasting (WRF) yang mensimulasikan emisi, transportasi, pencampuran dan transformasi gas kimia dan aerosol di atmosfer bersamaan dengan kondisi meteorologinya. Penelitian ini melakukan pendugaan konsentrasi zat pencemar udara di DKI Jakarta menggunakan WRF-Chem, dan analisis tingkat keasaman air hujan dengan pendekatan hukum Henry.

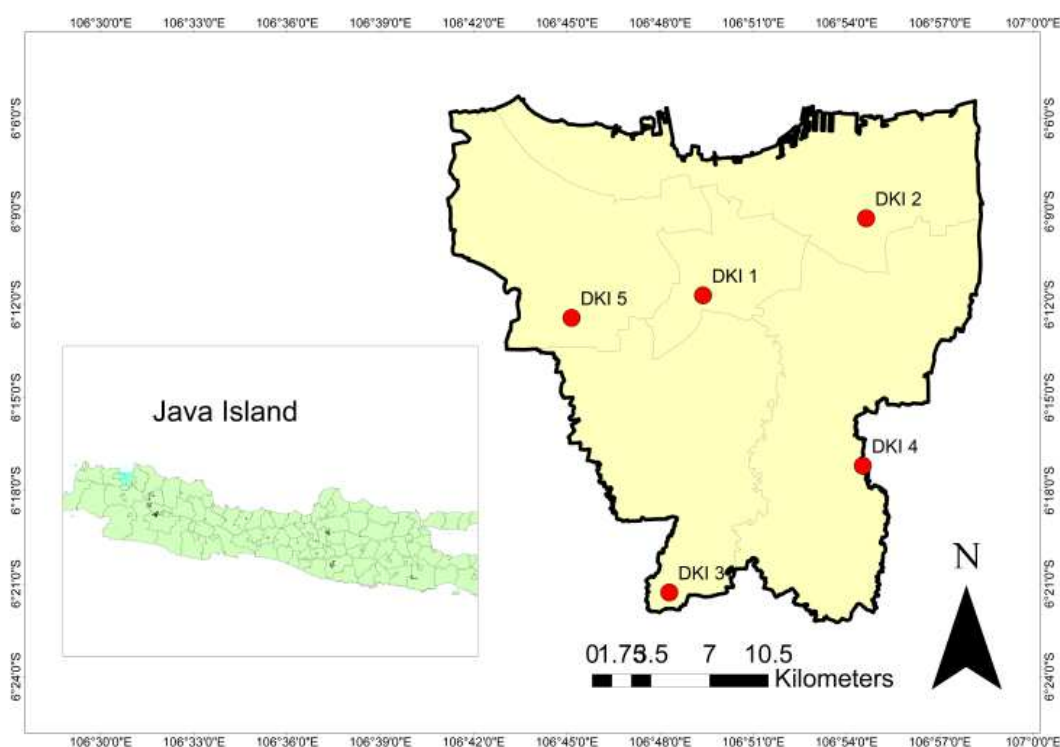
## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Tempat Penelitian

Wilayah kajian penelitian ini adalah DKI Jakarta dengan letak geografis  $106^{\circ}22'42''$  –  $106^{\circ}58'18''$  BT dan  $5^{\circ}19'12''$  –  $6^{\circ}23'54''$  LS (Gambar 1). DKI Jakarta memiliki lima Stasiun Pemantau Kualitas Udara (SPKU) dibawah pengelolaan Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) DKI Jakarta yaitu DKI 1 (Bundaran HI), DKI 2 (Kelapa Gading), DKI 3 (Jagakarsa), DKI 4 (Lubang Buaya), dan DKI 5 (Kebon Jeruk). Periode penelitian pada tanggal 10-15 Februari (musim hujan) dan 8-13 Agustus (musim kemarau) tahun 2010-2013.

### Bahan dan Alat Penelitian

Jenis data yang digunakan untuk penelitian ditampilkan dalam Tabel 1. Alat yang digunakan dalam pengolahan data dan analisis adalah seperangkat komputer yang dilengkapi dengan perangkat lunak Ms. Office 2016, WRF-Chem dan GrADS.



**Gambar 1** Wilayah kajian penelitian

**Tabel 1** Jenis dan sumber data penelitian

No	Jenis data	Sumber data
1	Data kualitas udara ambien SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub>	Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) DKI Jakarta
2	Data emisi global tahun 2010	<i>Emission Database for Global Atmospheric Research</i> (EDGAR) HTAP
3	<i>Global Forecasting Systems</i> (GFS) tahun 2010	NCDC-NOAA

### Pemodelan Kualitas Udara menggunakan WRF-Chem

Pada penelitian ini digunakan WRF-Chem 3.5 yang terdiri dari tiga program utama, yaitu WRF *Pre-Processing System* (WPS) untuk tahap *pre-processing*, WRFV3 untuk mengkopel dengan data emisi, dan ARW*post* untuk tahap *post-processing*. Simulasi dilakukan menggunakan domain yang beresolusi 4 km wilayah DKI Jakarta dengan posisi geografis 106°22'42" – 106°58'18" BT dan 5°19'12" – 6°23'54" LS. Periode yang dilakukan pada pemodelan yaitu tanggal 10-15 Februari 2010 dan 8-13 Agustus 2010. Data input yang digunakan dalam pemodelan ini adalah data meteorologi dan emisi global. Data meteorologi global berupa *Global Forecasting Systems* (GFS) periode 10-15 Februari 2010 dan 8-13 Agustus 2010 dengan resolusi 0.5° serta inisial data jam 00 UTC. Data emisi global menggunakan data emisi yang didapat dari *Emission Database for Global Atmosphere Research* (EDGAR) HTAP tahun 2010.

### Ekstraksi Output Model

Data keluaran model WRF-Chem diekstrak dengan menggunakan *software* GrADS untuk mendapatkan data berupa angka konsentrasi pencemar di setiap titik berdasar lima Stasiun Pemantau Kualitas Udara yang ada di DKI Jakarta. Data-data ini kemudian digunakan untuk menduga nilai pH air hujan.

### Pendugaan Nilai pH Air Hujan

Nilai pH merupakan indikator keasaman air. Pendugaan nilai pH air hujan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pendekatan hukum Henry, menggunakan data observasi kualitas udara ambien SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari lima SPKU BPLHD DKI Jakarta. Selain itu, digunakan pula data konsentrasi pencemar SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> hasil luaran model WRF-Chem yang telah diekstrak. Pendugaan dilakukan pada musim hujan dan musim kemarau. Musim hujan diwakili oleh bulan Februari, dan musim kemarau diwakili oleh bulan Agustus.

Nilai pH merupakan nilai logaritma dari konsentrasi H<sup>+</sup> yang terkandung dalam larutan.

Penentuan nilai konsentrasi H<sup>+</sup> menggunakan hukum Henry pada Persamaan (1) sampai (3) (Kurniawan, 2011).

$$SO_2 : [H^+] = 2 \times (K_1 \times K_H \times pSO_2)^{0.5} \quad (1)$$

$$NO_2 : [H^+] = K_H \times pNO_2 \quad (2)$$

$$Akumulasi [H^+] = [2 \times (K_1 \times K_H \times pSO_2)^{0.5}] + (K_H \times pNO_2) \quad (3)$$

Dimana  $pSO_2$  adalah tekanan gas SO<sub>2</sub> (atm),  $pNO_2$  tekanan gas NO<sub>2</sub> (atm), [H<sup>+</sup>] adalah konsentrasi H<sup>+</sup>,  $K_1$  konstanta disosiasi atau konstanta kesetimbangan (mol/l),  $K_H$  konstanta Henry atau konstanta pelarutan gas (mol/l/atm). Nilai konstanta Henry dan konstanta disosiasi dalam penelitian ini menggunakan konstanta pada suhu standar yaitu suhu 25°C. Tabel konstanta Henry dan konstanta disosiasi tercantum pada Tabel 2.

**Tabel 2** Konstanta Henry dan konstanta disosiasi pada suhu 298 K (25°C)

Gas	K <sub>H</sub> (mol/l/atm)	K <sub>1</sub>
NO <sub>2</sub>	0.01	-
SO <sub>2</sub>	1.23	1.3 x 10 <sup>-2</sup>

Sumber : Seinfeld and Pandis (2006)

Konsentrasi pencemar udara bervariasi selama 24 jam, oleh karena itu pendugaan nilai pH dilakukan 24 jam sesuai data yang didapatkan dari hasil observasi maupun pemodelan. Nilai konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dirata-ratakan menjadi data per jam selama 24 jam, sehingga fluktuasi nilai keasaman air hujan dapat dianalisis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Nilai pH Air Hujan berdasar data SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> luaran model WRF-Chem

Berdasar luaran model WRF-Chem berupa konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, nilai pH air hujan di 5 titik stasiun pemantauan kualitas udara (SPKU) DKI Jakarta dianalisis, baik secara spasial maupun temporal. Secara temporal dari waktu ke waktu menunjukkan pola yang sama di semua SPKU, pH rendah pada malam hingga pagi hari dan meningkat pada siang hari. Hal ini berarti apabila terjadi hujan, keasaman curah hujan yang turun

pada sore hari cenderung lebih asam daripada siang hari. Hasil estimasi pH menunjukkan nilai maksimum 5 di semua SPKU baik pada bulan Februari maupun Agustus. Hal ini menunjukkan fenomena hujan asam sudah terjadi.

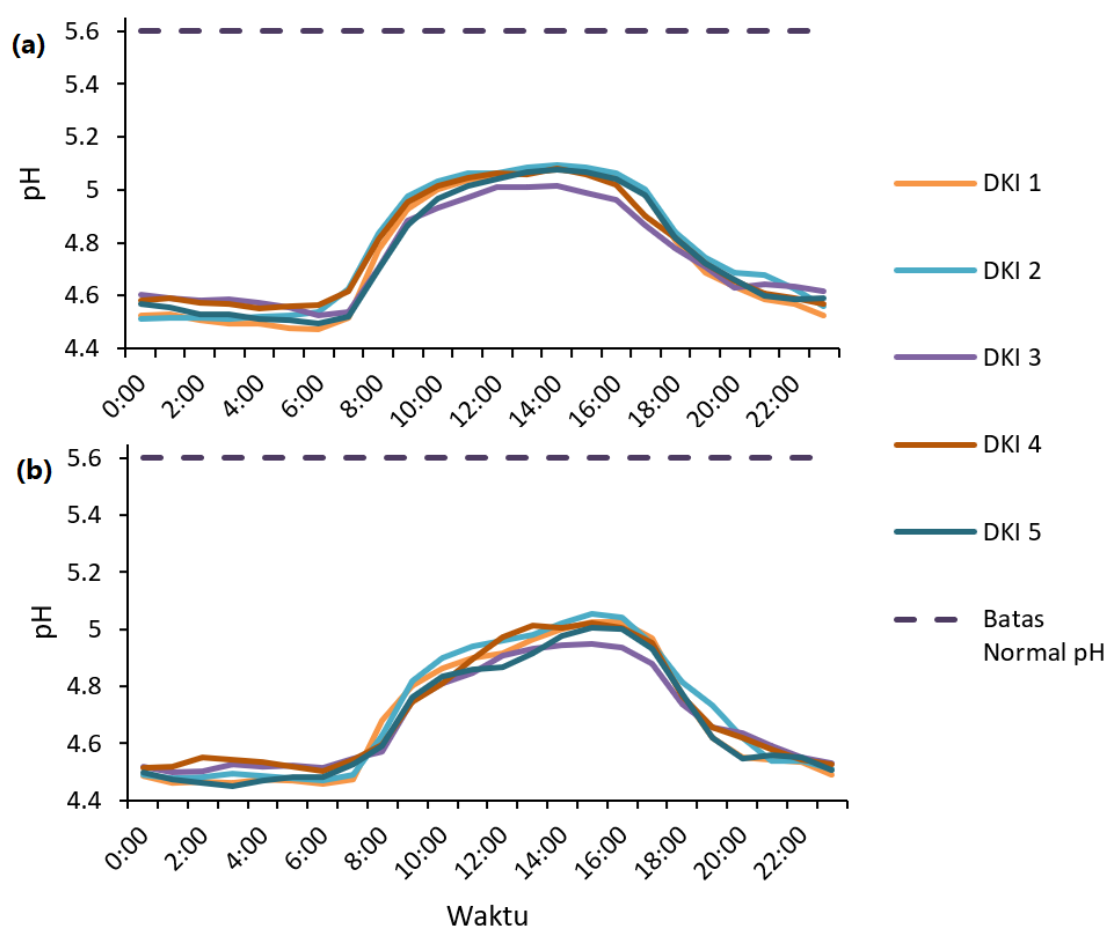
### Fluktuasi diurnal pH air hujan

Potensi hujan asam dapat dianalisis dari tingkat keasaman air hujan di suatu daerah. Kondisi rata-rata per jam pH air hujan untuk melihat potensi hujan asam selama periode pemodelan di lima SPKU ditunjukkan pada Gambar 2. Fluktuasi pH air hujan rata-rata per jam selama periode pemodelan pada bulan Februari menunjukkan pola yang sama di semua SPKU (Gambar 2a). Namun nilai pH terendah di setiap jam pemodelan tidak selalu pada SPKU yang sama. Rata-rata pH pada malam hingga pagi hari, yaitu pukul 22:00 sampai 6:00, terendah berada di daerah Bundaran HI (DKI1) dengan pH terendah sebesar 4.47. Pada pukul 10:00 sampai

20:00 WIB, pH terendah berada di daerah Jagakarsa (DKI3) dengan pH terendah sebesar 4.63.

Pada bulan Agustus (Gambar 2b) fluktuasi rata-rata pH per jam selama periode pemodelan juga cenderung memiliki pola yang cenderung sama di setiap SPKU. Nilai pH rendah pada pukul 20:00-07:00 WIB dan meningkat pada pukul 08:00 serta mulai menurun pada pukul 20:00 WIB. Pada pukul 00:00-07:00 WIB dan 21:00-24:00 WIB hampir semua SPKU memiliki nilai pH yang sama namun pada pukul 13:00-19:00 WIB daerah Jagakarsa memiliki pH terendah.

Terdapat sedikit perbedaan pola antara bulan Agustus dengan Februari. Pada bulan Agustus peningkatan nilai pH terjadi pukul 08.00 WIB, dengan peningkatan perlahan, hingga maksimum tercapai pada sekitar pukul 16.00 WIB, sedangkan pada bulan Februari, nilai pH sudah terjadi peningkatan pada pukul 07.00 WIB dengan pola yang cepat hingga pukul 10.00 WIB, lalu stabil besarnya sampai sekitar pukul 17.00 WIB.



**Gambar 2** Rata-rata per jam pH air hujan pada periode pemodelan (a) bulan Februari dan (b) bulan Agustus. DKI1 menunjukkan daerah Bundaran HI, DKI2 daerah Kelapa Gading, DKI3 daerah Jagakarsa, DKI4 daerah Lubang Buaya, DKI5 daerah Kebon Jeruk.

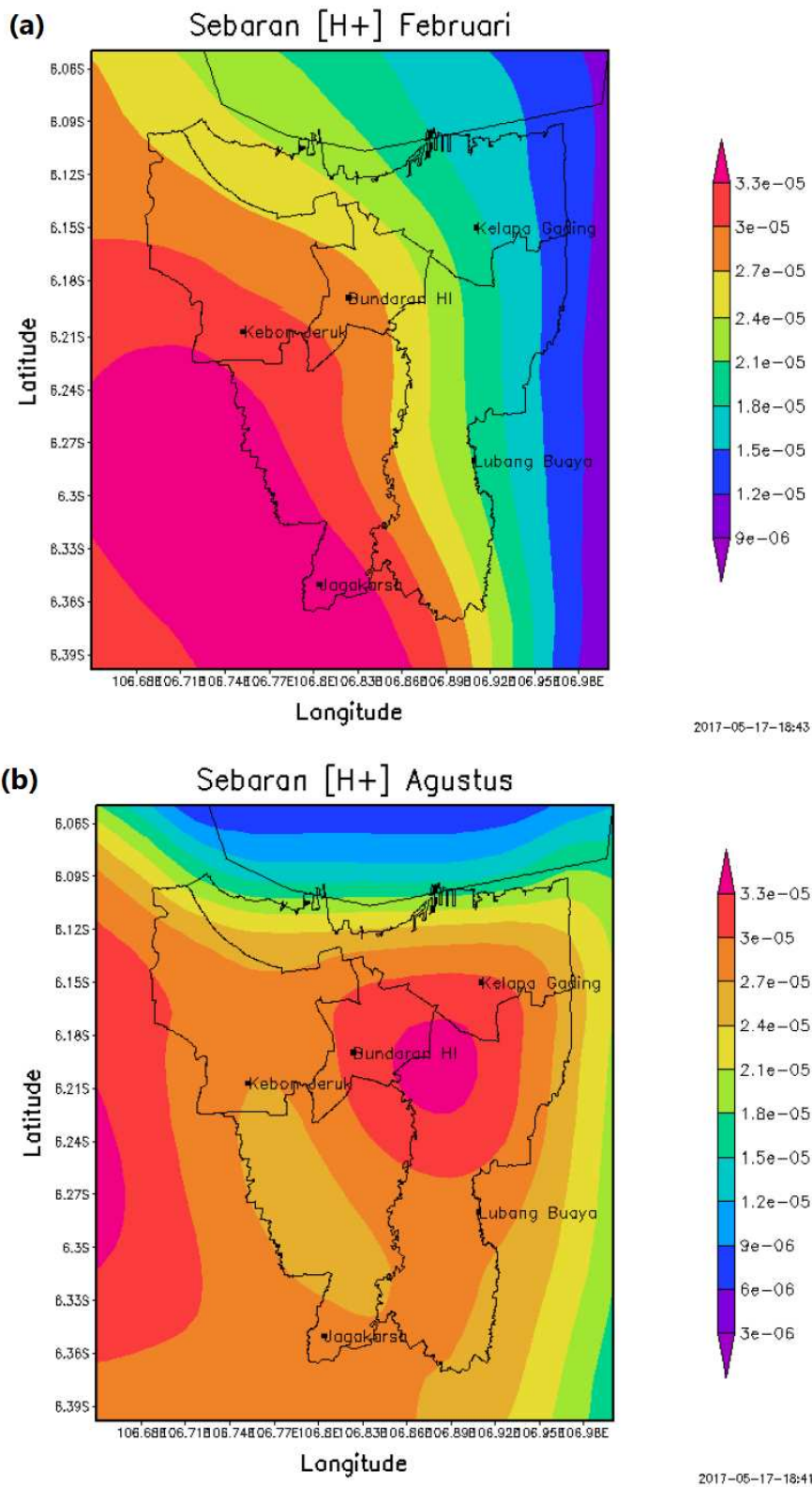
### Sebaran Spasial Tingkat Keasaman Air Hujan

Pola sebaran spasial potensi hujan asam di wilayah DKI hasil luaran model WRF-Chem ditunjukkan pada Gambar 3. Pada luaran ini digunakan nilai

konsentrasi  $H^+$  sebagai parameter untuk menduga potensi hujan asam. Hasil luaran model WRF-Chem berupa data konsentrasi gas  $SO_2$  dan  $NO_2$  yang kemudian diolah menjadi konsentrasi  $H^+$  untuk melihat

sebaran potensi hujan asam menggunakan pendekatan hukum Henry. Sebaran konsentrasi  $H^+$  rata-rata selama periode pemodelan bulan Februari dan Agustus disajikan dalam Gambar 3(a) dan 3(b). Nilai konsentrasi

$H^+$  rendah (biru) menunjukkan nilai pH besar, sehingga potensi hujan asam tinggi pada peta dengan warna merah.



**Gambar 3** Sebaran rata-rata konsentrasi  $H^+$  DKI Jakarta (a) bulan Februari dan (b) bulan Agustus

Pada bulan Februari, lokasi dengan konsentrasi  $H^+$  yang rendah berada di sekitar Jakarta bagian utara. Daerah Kelapa Gading dan Lubang Buaya memiliki

konsentrasi  $H^+$  yang rendah sehingga daerah-daerah ini memiliki rendahnya potensi hujan asam. Sedangkan daerah yang memiliki konsentrasi  $H^+$  yang tinggi

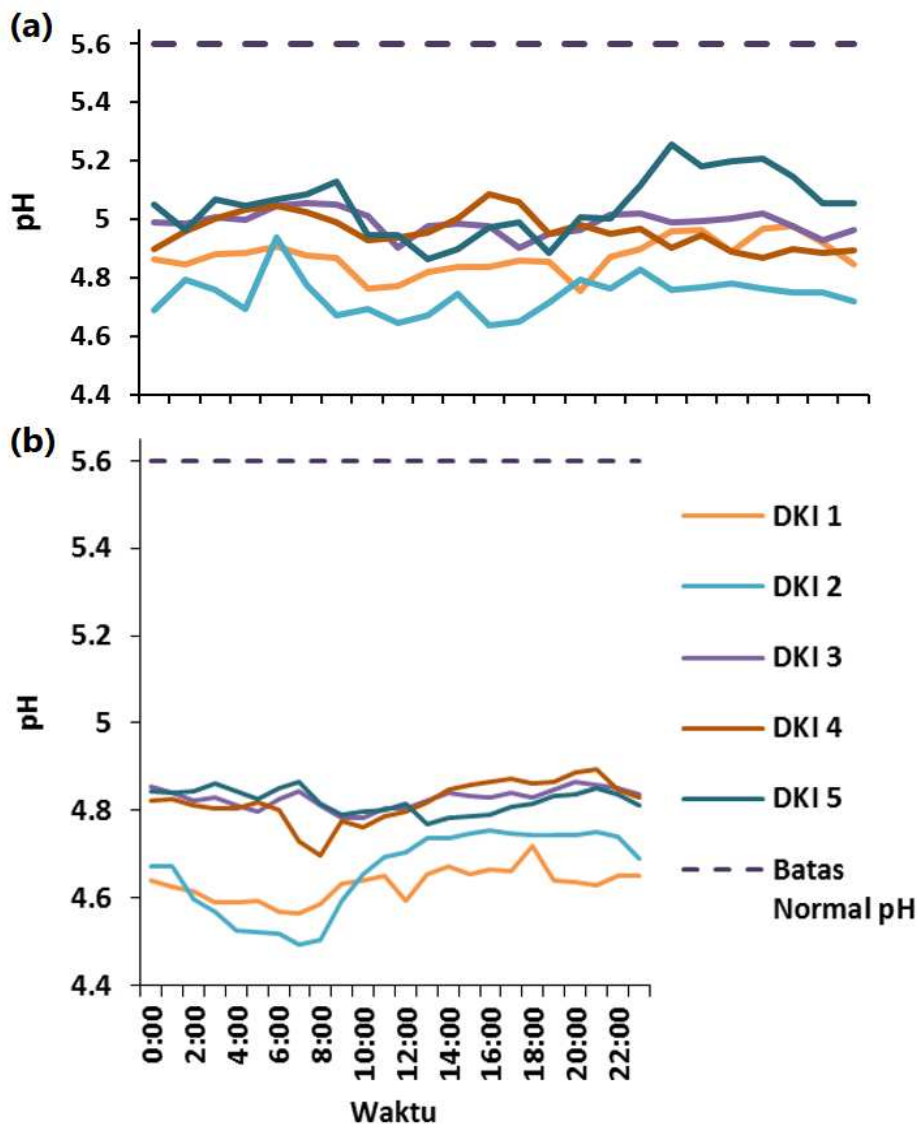
berada di sekitar Jakarta bagian tengah dan selatan. Daerah ini berada di Bundaran HI, Kebon Jeruk, dan Jagarkasa. Hal ini menunjukkan daerah-daerah tersebut memiliki potensi yang lebih tinggi terjadinya hujan asam.

Pada bulan Agustus, lokasi dengan konsentrasi  $H^+$  yang tinggi berada hampir di seluruh daerah Jakarta. Hal ini menunjukkan pada musim kemarau konsentrasi  $SO_2$  dan  $NO_2$  tinggi, sehingga apabila terjadi hujan potensi terjadi hujan asam terjadi di semua wilayah. Berdasar Gambar 3 (b), daerah Bundaran HI dan Kelapa Gading memiliki konsentrasi  $H^+$  tertinggi dibanding dengan SPKU lainnya, sehingga daerah-daerah ini lebih berpotensi terjadinya hujan asam pada musim kemarau.

**Estimasi Tingkat Keasaman Air Hujan di DKI Jakarta berdasar Data Observasi Konsentrasi  $SO_2$  dan  $NO_2$**

Tingkat keasaman air hujan yang didapat dari perhitungan menggunakan pendekatan hukum Henry

berdasar data kualitas udara ambien di lima SPKU DKI Jakarta disajikan dalam Gambar 4. Gambar ini menunjukkan pH air hujan di DKI Jakarta memiliki nilai di bawah 5.6, sesuai dengan hasil estimasi menggunakan model WRF-Chem. Hal ini menunjukkan DKI Jakarta, terutama di lima daerah SPKU, air hujan pada periode observasi bulan Februari dan Agustus telah masuk kategori hujan asam. Berdasar observasi pada bulan Februari, daerah yang memiliki pH air hujan terendah di DKI Jakarta adalah daerah Kelapa Gading dengan pH terendah 4.75 pada pukul 14:00 dan daerah yang memiliki pH air hujan tertinggi adalah Kebon Jeruk dengan pH tertinggi 5.25 pada pukul 17:00 (Gambar 4a). Pada bulan Agustus, daerah yang memiliki pH air hujan terendah pada saat pada pagi hari adalah Kelapa Gading (DKI2) dengan nilai pH terendah 4.49, dan pada siang hingga malam hari adalah daerah Bundaran HI (DKI1) dengan pH terendah sebesar 4.56.



**Gambar 4** Nilai pH air hujan rata-rata per jam pada (a) bulan Februari dan (b) bulan Agustus. DKI1 menunjukkan daerah Bundaran HI, DKI2 daerah Kelapa Gading, DKI3 daerah Jagarkasa, DKI4 daerah Lubang Buaya, DKI5 daerah Kebon Jeruk.

Pada siang hari kondisi konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> terakumulasi di sekitar Bundaran HI. Hal ini dapat terjadi karena daerah Bundaran HI secara umum merupakan daerah terbangun dengan banyak gedung sehingga jenis permukaan didominasi oleh permukaan beton. Kondisi ini pada siang hari berpotensi menyebabkan suhu udara tinggi dan tekanan udara lebih rendah, sehingga massa udara akan bergerak dan terkumpul di pusat kota. Jika terjadi pembentukan awan yang intensif dan turun hujan, maka potensi reaksi asam akan lebih besar, terbentuk hujan asam. Hal ini dapat terjadi dengan asumsi adveksi awan tidak jauh dari sekitar Bundaran HI.

### KESIMPULAN

Tingkat keasaman air hujan yang dihasilkan dari *output* model WRF-Chem memiliki variasi diurnal yang sama pada saat musim hujan dan musim kemarau. Nilai pH air hujan rendah pada saat pagi dan malam hari, sedangkan pada saat siang dan sore hari pH air hujan cenderung tinggi. Sebaran konsentrasi H<sup>+</sup> yang didapat menunjukkan bahwa daerah Bundaran HI, Kebon Jeruk, dan Jagarkasa memiliki potensi hujan asam yang tinggi pada saat musim hujan, serta pada musim kemarau semua SPKU memiliki potensi hujan asam yang tinggi. Sedangkan tingkat keasaman air hujan yang dihasilkan dari data observasi konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> didapat nilai pH di bawah 5.6 untuk lima SPKU di DKI Jakarta.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada pihak Badan Pengelola Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) DKI Jakarta atau saat ini disebut sebagai Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Provinsi DKI Jakarta, untuk penggunaan data kualitas udara ambien sebagai pembanding pada penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

Both, A.F., Westerdahl, D., Fruin, S., Haryanto, B., Marshall, J.D., 2013. Exposure to carbon monoxide, fine particle mass, and ultrafine particle number in Jakarta, Indonesia: Effect of commute mode. *Science of The Total Environment* 443, 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.082>

Brauer, M., Freedman, G., Frostad, J., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Dentener, F., Dingenen, R. van, Estep, K., Amini, H., Apte, J.S., Balakrishnan, K., Barregard, L., Broday, D., Feigin, V., Ghosh, S., Hopke, P.K., Knibbs, L.D., Kokubo, Y., Liu, Y., Ma, S., Morawska, L., Sangrador, J.L.T., Shaddick, G., Anderson, H.R., Vos, T., Forouzanfar, M.H.,

Burnett, R.T., Cohen, A., 2016. Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environ. Sci. Technol.* 50, 79–88. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03709>

Charlson, R.J., Rodhe, H., 1982. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature* 295, 683.

Chen, M.-C., Wang, K., Xie, L., 2013. Deterioration mechanism of cementitious materials under acid rain attack. *Engineering Failure Analysis* 27, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.08.007>

Connan, O., Maro, D., Hébert, D., Roupsard, P., Goujon, R., Letellier, B., Le Cavelier, S., 2013. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France. *Atmospheric Environment* 67, 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.029>

Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S.A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., Skuce, A., 2013. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters* 8, 024024.

Dubey, D.S., 2013. Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects and Solution. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 4.

Fowler David, Coyle Mhairi, Skiba Ute, Sutton Mark A., Cape J. Neil, Reis Stefan, Sheppard Lucy J., Jenkins Alan, Grizzetti Bruna, Galloway James N., Vitousek Peter, Leach Allison, Bouwman Alexander F., Butterbach-Bahl Klaus, Dentener Frank, Stevenson David, Amann Marcus, Voss Maren, 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130164. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>

Ge, B., Wang, Z., Gbaguidi, A.E., Zhang, Q., 2016. Source Identification of Acid Rain Arising over Northeast China: Observed Evidence and Model Simulation. *Aerosol and Air Quality Research* 16, 1366–1377. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0294>

Gerengi, H., Bereket, G., Kurtay, M., 2016. A morphological and electrochemical comparison of the corrosion process of aluminum alloys under simulated acid rain conditions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 58, 509–516. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.05.023>

Kryza, M., Werner, M., Dore, A.J., Błaś, M., Sobik, M., 2012. The role of annual circulation and precipitation on national scale deposition of

- atmospheric sulphur and nitrogen compounds. *Journal of Environmental Management* 109, 70–79.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.048>
- Kurniawan, A., 2011. PEMBUATAN MODEL SEDERHANA PENGARUH GAS CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> DAN NO<sub>2</sub> TERHADAP TINGKAT KEASAMAN AIR HUJAN. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 12, 43–52.
- Mackay, D., Shiu, W.Y., 1981. A critical review of Henry's law constants for chemicals of environmental interest. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 10, 1175–1199.  
<https://doi.org/10.1063/1.555654>
- May, A.A., Nguyen, N.T., Presto, A.A., Gordon, T.D., Lipsky, E.M., Karve, M., Gutierrez, A., Robertson, W.H., Zhang, M., Brandow, C., Chang, O., Chen, S., Cicero-Fernandez, P., Dinkins, L., Fuentes, M., Huang, S.-M., Ling, R., Long, J., Maddox, C., Massetti, J., McCauley, E., Miguel, A., Na, K., Ong, R., Pang, Y., Rieger, P., Sax, T., Truong, T., Vo, T., Chattopadhyay, S., Maldonado, H., Maricq, M.M., Robinson, A.L., 2014. Gas- and particle-phase primary emissions from in-use, on-road gasoline and diesel vehicles. *Atmospheric Environment* 88, 247–260.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.01.046>
- Miller, S.M., Wofsy, S.C., Michalak, A.M., Kort, E.A., Andrews, A.E., Biraud, S.C., Dlugokencky, E.J., Eluszkiewicz, J., Fischer, M.L., Janssens-Maenhout, G., Miller, B.R., Miller, J.B., Montzka, S.A., Nehrkorn, T., Sweeney, C., 2013. Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proc Natl Acad Sci USA* 110, 20018.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1314392110>
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., Schneidemesser, E. von, Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L., 2015. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 8889–8973.
- Nesaratnam, S.T., Taherzadeh, S., 2014. *Air Quality Management*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Pagano, G., Aliberti, F., Guida, M., Oral, R., Siciliano, A., Trifuoggi, M., Tommasi, F., 2015. Rare earth elements in human and animal health: State of art and research priorities. *Environmental Research* 142, 215–220.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.039>
- Pan, Y.P., Wang, Y.S., 2015. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 951–972.  
<https://doi.org/10.5194/acp-15-951-2015>
- Pan, Y.P., Wang, Y.S., Tang, G.Q., Wu, D., 2012. Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 6515–6535.  
<https://doi.org/10.5194/acp-12-6515-2012>
- Santoso, M., Lestiani, D.D., Markwitz, A., 2013. Characterization of airborne particulate matter collected at Jakarta roadside of an arterial road. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 297, 165–169. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-2350-5>
- Seinfeld, J., Pandis, S., 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change* Second Edition, 2nd ed. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- Thangarajan, R., Bolan, N.S., Tian, G., Naidu, R., Kunhikrishnan, A., 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Science of The Total Environment* 465, 72–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031>
- Vanderkluysen, L., Burton, M.R., Clarke, A.B., Hartnett, H.E., Smekens, J.-F., 2014. Composition and flux of explosive gas release at LUSI mud volcano (East Java, Indonesia). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 15, 2932–2946.  
<https://doi.org/10.1002/2014GC005275>
- Vet, R., Artz, R.S., Carou, S., Shaw, M., Ro, C.-U., Aas, W., Baker, A., Bowersox, V.C., Dentener, F., Galy-Lacaux, C., Hou, A., Pienaar, J.J., Gillett, R., Forti, M.C., Gromov, S., Hara, H., Khodzher, T., Mahowald, N.M., Nickovic, S., Rao, P.S.P., Reid, N.W., 2014. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment* 93, 3–100.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060>
- Wang, L., Wang, W., Zhou, Q., Huang, X., 2014. Combined effects of lanthanum (III) chloride and acid rain on photosynthetic parameters in rice. *Chemosphere* 112, 355–361.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.069>
- Wang, X., Liu, Z., Niu, L., Fu, B., 2013. Long-term effects of simulated acid rain stress on a staple forest plant, *Pinus massoniana* Lamb: a proteomic analysis. *Trees* 27, 297–309.  
<https://doi.org/10.1007/s00468-012-0799-z>
- Werner, C., Kelly, P.J., Doukas, M., Lopez, T., Pfeffer, M., McGimsey, R., Neal, C., 2013. Degassing of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>S associated with the 2009 eruption



of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 259, 270–284.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.012>

Yang, L., Zhang, Y., Zeng, X., Song, Z., 2012. Corrosion behaviour of superplastic Zn–Al alloys in simulated acid rain. *Corrosion Science* 59, 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.013>