

# **ESTIMASI TINGKAT KEASAMAN AIR HUJAN (pH) AKIBAT ABSORPSI GAS NO<sub>2</sub> DAN SO<sub>2</sub> (ESTIMATION OF RAINWATER ACIDITY (pH) DUE TO ABSORPTION OF NO<sub>2</sub> AND SO<sub>2</sub> GASSES)**

**Agusta Kurniawan**

Stasiun Klimatologi Mlati, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)

e-mail: Agusta6872@gmail.com

Diterima 5 April 2018; Direvisi 2 Juni 2019; Disetujui 22 Agustus 2019

## **ABSTRACT**

An estimation of the acidity (pH) of rainwater caused by the effect of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> gases absorption has been conducted. The amount of gas dissolved in rainwater was calculated based on Henry's law. Pearson correlation coefficient ( $R$ ) was used to compare the estimated values of acidity with the observed values. The result of the analysis shows that the estimated values of rainwater acidity (pH) due to the absorption of NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> gases was not consistent with the rainwater acidity which was directly measured. During the 24-month period of data acquisition, strong Pearson correlation values was found only in July 2011, where  $R_{[SO_2]} = 0.85$  and  $R_{[SO_2+NO_2]} = -0.85$ .

Keywords: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, absorption, acidity (pH), rain water, Henry's Law

## **ABSTRAK**

Telah dilakukan perkiraan tingkat keasaman (pH) air hujan akibat pengaruh absorpsi gas [NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub>]. Hukum Henry digunakan untuk menghitung besarnya gas yang terlarut dalam air hujan. Nilai koefisien korelasi Pearson ( $R$ ) digunakan untuk membandingkan nilai estimasi tingkat keasaman dengan hasil observasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai estimasi tingkat keasaman (pH) air hujan akibat pengaruh absorpsi gas NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> tidak sesuai dengan nilai tingkat keasaman (pH) air hujan hasil pengukuran langsung. Selama 24 bulan periode akusisi data, nilai korelasi Pearson yang kuat hanya ditemukan pada bulan Juli 2011, dimana  $R_{[SO_2]} = 0,85$  dan  $R_{[SO_2+NO_2]} = -0,85$ .

Kata kunci: SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, absorpsi, tingkat keasaman (pH), air hujan, Hukum Henry

## **1 PENDAHULUAN**

Stasiun Pemantau Atmosfer Global (SPAG) Bukit Kototabang merupakan salah satu stasiun pengamatan referensi udara bersih. Secara geografis, SPAG Bukit Kototabang terletak pada 100,32 bujur timur dan 0,20 lintang selatan, dengan ketinggian 864,5 meter di atas permukaan laut. Stasiun ini terletak pada lokasi yang jauh dari pemukiman dan aktivitas manusia agar udara yang diukur benar-benar alami sehingga dapat dijadikan referensi udara bersih (Kurniawan, 2010).

Air hujan menjadi komponen pokok pada siklus hidrologi dan

memegang peranan penting dalam siklus pelarutan bahan-bahan kimia di alam. Air hujan juga berperan sebagai pencuci berbagai polutan yang ada di atmosfer, dengan cara membawa polutan tersebut dari udara ke permukaan tanah dan ke permukaan air (Kurniawan, 2010).

Penelitian mengenai emisi gas SO<sub>2</sub> dan gas NO<sub>2</sub> telah banyak dilakukan di berbagai tempat di dunia, termasuk di Indonesia.

Penelitian mengenai hubungan trilateral antara emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dengan ketidaksamaan intensitas energi, dan pertumbuhan ekonomi menggunakan persamaan data model

simultan di 139 kota di India pada periode 2001-2013 dilakukan oleh Sinha (2016). Williston *et al.* (2016) melakukan penelitian menilai resiko secara langsung dan tidak langsung pengaruh emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> terhadap ekosistem daratan dan ekosistem perairan di daerah tampungan air di Kitimat dan di Prince Rupert, British Columbia, Kanada akibat kenaikan kapasitas produksi industri gas alam cair (*liquified natural gas*, LNG). Gersen *et al.* (2014) melakukan pengukuran campuran gas H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dalam pelarut gas CO<sub>2</sub> pada tekanan 1 – 40 bar menggunakan spektroskopi serapan pita lebar pada kisaran panjang gelombang ultraviolet-visual. Kwak *et al.* (2017) menyelidiki pengaruh intensitas hujan secara langsung dan tidak langsung terhadap konsentrasi polusi udara (PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, dan CO) berdasarkan perubahan volume kepadatan lalu lintas dan kecepatan kendaraan di Seoul menggunakan model *path analysis*. Mallik & Lal (2014) melakukan pemantauan lingkungan tentang karakteristik musiman (temporal dan spasial) dari emisi SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> dan CO di enam kota di Dataran *Indo-Gangetic*, India (Delhi, Jodhpur, Kolkata, Durgapur, Guwahati, dan Nagpur).

Rosario & Francesco (2016) melakukan pemantauan kualitas udara di empat lokasi di kota Catania (Parco Gioeni, Piazza A. Moro, Viale Veneto, Librino) Italia berdasarkan parameter CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> dan SO<sub>2</sub>, serta membagi data menjadi beberapa klas interval sesuai dengan aturan Struge. Mohamad *et al.* (2015) melakukan penilaian awal identifikasi sumber-sumber polusi udara (CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> dan SO<sub>2</sub>) di beberapa lokasi (Port Klang, Petaling Jaya, Shah Alam dan Kuala Lumpur) di Klang Valley, Malaysia, menggunakan dua metode statistik yaitu analisis variansi (ANOVA) dan *Principal Component Analysis* (PCA). Rivera *et al.* (2015) meneliti distribusi spasial dan transpor polutan NO<sub>2</sub> di dua lokasi di Tijuana

(area San Diego) menggunakan data pengamatan permukaan (*Differential Optical Absorption Spectroscopy* dan NO-NO<sub>x</sub>-NO<sub>2</sub> *TS42C Analyzer*) dan pengamatan dari citra satelit Aura (data OMI). Xiao *et al.* (2018) melakukan pemantauan polusi udara (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> dan CO) untuk mengetahui karakteristik spasial dan temporalnya di Kota Chengdu, Barat daya Cina, serta untuk mengetahui hubungan polusi udara tersebut dengan parameter meteorologi (temperatur udara, tekanan udara, kelembaban udara, arah dan kecepatan angin).

Di Indonesia, Sudalma *et al.* (2015) meneliti efek emisi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang berasal dari kendaraan bermotor (sumber bergerak) dan cerobong pabrik (sumber tidak bergerak) terhadap konsentrasi ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan ion NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dalam air hujan di daerah Semarang. Syafei *et al.* (2015) melakukan penelitian analisis temporal dan spasial waktu puncak konsentrasi NO dan NO<sub>2</sub> pada pagi dan siang hari di lima lokasi di kota Surabaya (Ketabang Kali, Perak, Sukomanunggal, Gayungsari, dan Sukolilo). Noftri *et al.* (2017) meneliti kualitas udara di lima lokasi di kota Palembang (Persimpangan Charitas, Persimpangan Patal, Bundaran Mesjid Agung, Persimpangan Lemabang, dan Persimpangan Plaju) berdasarkan tiga parameter gas CO, NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub>.

Melihat terbatasnya penelitian yang membahas mengenai pengaruh polusi udara khususnya gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> terhadap tingkat keasaman air hujan, maka penelitian ini lebih difokuskan pada pengukuran besarnya tingkat keasaman air hujan akibat absorpsi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> serta perbandingannya dengan tingkat keasaman air hujan hasil pengukuran.

## 2 LANDASAN TEORI

### 2.1 Tingkat Keasaman (pH)

Salah satu parameter air hujan yang diukur adalah pH, yang

didenifikasikan sebagai logaritma negatif aktivitas ion hidrogen (Andrews *et al.*, 1996):

$$\text{pH} = -\log_{10} a\text{H}^+. \quad (2-1)$$

Untuk larutan encer, aktivitas ion  $\text{H}^+$  sama dengan konsentrasi ion  $\text{H}^+$ , sehingga pH air hujan dikatakan sebagai logaritma negatif konsentrasi  $\text{H}^+$  (Andrews *et al.*, 1996):

$$\text{pH} = -\log_{10} \text{H}^+. \quad (2-2)$$

## 2.2 Kelarutan Gas dalam Air

Kelarutan gas dalam larutan berair dinyatakan dengan konstanta Hukum Henry atau biasa dikenal dengan konstanta Henry. Besarnya konstanta Henry dirumuskan sebagai berikut (Miroslav & Vladimír, 1999):

$$K_H = \frac{[\text{Gas}] (\text{aq})}{P_{\text{Gas}}}, \quad (2-3)$$

$$P_{\text{Gas}} = X P_{\text{tot}}, \quad (2-4)$$

dengan  $K_H$  menyatakan konstanta Henry pada keadaan standar (suhu  $25^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$ ),  $[\text{Gas}] (\text{aq})$  menyatakan konsentrasi gas dalam Molar,  $P_{\text{Gas}}$  menyatakan tekanan parsial gas dalam atm,  $X$  menyatakan fraksi mol gas dalam %, sedangkan  $P_{\text{tot}}$  menyatakan tekanan total gas atau tekanan udara sekitar.

Hasil percobaan menunjukkan bahwa temperatur berpengaruh terhadap besarnya kelarutan suatu gas, sesuai dengan formula berikut (Sander, 1999):

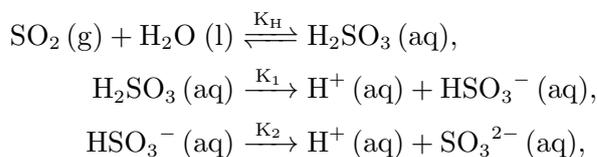
$$K_{H,1} = K_H \exp \left[ -\frac{\Delta H_{\text{pelarutan}}}{R} \times \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (2-5)$$

dengan  $K_{H,1}$  menyatakan konstanta Henry pada temperatur  $T_1$  (dalam Kelvin),  $\Delta H_{\text{pelarutan}}$  menyatakan entalpi pelarutan,  $T$  menyatakan temperatur standar (293,15 K).

## 2.3 Pengaruh Absorpsi Gas $\text{SO}_2$

Terdapat sulfurdioksida ( $\text{SO}_2$ ) dalam kadar kecil di atmosfer, tetapi

memiliki konstanta disosiasi dan kelarutan dalam air yang besar (Miroslav & Vladimír, 1999) mengikuti persamaan kesetimbangan berikut:



dengan konstanta Henry:

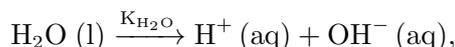
$$K_H = \frac{[\text{H}_2\text{SO}_3]}{P_{\text{SO}_2}}, \quad (2-6)$$

dan konstanta disosiasi

$$K_1 = \frac{[\text{H}^+] \times [\text{HSO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{SO}_3]}, \quad (2-7)$$

$$K_2 = \frac{[\text{H}^+] \times [\text{SO}_3^{2-}]}{[\text{HSO}_3^-]}. \quad (2-8)$$

Selain itu, air sendiri mengalami reaksi disosiasi:



dengan konstanta disosiasi

$$K_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{[\text{H}^+] \times [\text{OH}^-]}{[\text{H}_2\text{O}]}. \quad (2-9)$$

Dari semua reaksi tersebut terjadi keseimbangan muatan karena larutan bersifat netral dan berlaku hubungan

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{HSO}_3^-] + [\text{SO}_3^{2-}]. \quad (2-10)$$

Karena larutan bersifat asam, maka konsentrasi ion hidroksi  $[\text{OH}^-]$  dapat dieliminasi mengingat  $[\text{H}^+] \ll [\text{OH}^-]$ . Kemudian, dapat dipertimbangkan bahwa konsentrasi ion sulfat  $[\text{SO}_3^{2-}]$  jauh lebih kecil dibandingkan dengan ion bisulfat  $[\text{HSO}_3^-]$ , karena nilai  $K_2 \ll K_1$ , maka konsentrasi ion sulfat dapat dihilangkan. Dengan menghilangkan komponen ion hidroksi  $[\text{OH}^-]$  dan ion sulfat  $[\text{SO}_3^{2-}]$ , maka diperoleh:

$$[\text{H}^+] = [\text{HSO}_3^-]. \quad (2-11)$$

Oleh karena itu,  $K_1$  pada Persamaan 2-7 dapat dinyatakan

sebagai:

$$K_1 = \frac{[H^+]^2}{[H_2SO_3]},$$

$$[H^+] = \sqrt{K_1 \times [H_2SO_3]}. \quad (2-12)$$

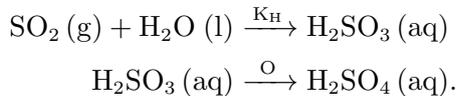
Besarnya konsentrasi  $[H_2SO_3]$  dapat dicari berdasarkan nilai konstanta Henry dengan persamaan:

$$[H_2SO_3] = K_H \times P_{SO_2}. \quad (2-13)$$

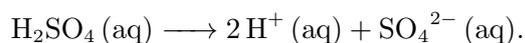
Kemudian, konsentrasi  $[H^+]$  dapat dicari dengan memasukkan Persamaan 2-13 ke dalam Persamaan 2-12 sehingga didapatkan:

$$[H^+] = \sqrt{K_1 \times K_H \times P_{SO_2}}. \quad (2-14)$$

Apabila gas  $SO_2$  mengalami oksidasi sempurna maka seluruh asam sulfit ( $H_2SO_3$ ) yang tergolong sebagai asam lemah akan berubah menjadi asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) yang merupakan asam kuat.



Asam sulfat di dalam air akan terdisosiasi membentuk dua proton  $H^+$  sesuai dengan reaksi berikut (Miroslav & Vladimir, 1999):



sehingga konsentrasi proton sama dengan dua kali konsentrasi asam sulfat.

$$[H^+]^1 = 2 \times [H_2SO_4] = 2[H_2SO_3],$$

$$= 2[H^+]. \quad (2-15)$$

Konsentrasi  $H^+$  akibat gas  $SO_2$  yang larut menjadi asam sulfat, dihitung dengan persamaan:

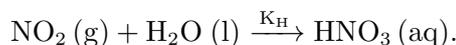
$$[H^+]_1 = \sqrt{K_1 \times K_H \times P_{SO_2}}. \quad (2-16)$$

Terakhir, tingkat keasaman (pH) air hujan akibat gas  $SO_2$  yang larut menjadi asam sulfat adalah:

$$pH = -0,5 \log_{10} (K_1 \times K_H \times P_{SO_2}). \quad (2-17)$$

## 2.4 Pengaruh Absorpsi Gas $NO_2$

Pengaruh absorpsi gas  $NO_2$  di atmosfer terhadap pH air hujan secara kimia adalah sebagai berikut:



$NO_2$  sedikit larut dalam air. Konstanta Henry untuk pelarutan gas  $NO_2$  dalam air adalah  $1,0 \times 10^{-2}$  mol/atm (Miroslav & Vladimir, 1999).

$$K_H = \frac{[HNO_3]}{P_{NO_2}},$$

$$[HNO_3] = K_H \times P_{NO_2}. \quad (2-18)$$

Asam nitrat ( $HNO_3$ ) tergolong asam kuat dan di dalam air akan terdisosiasi membentuk satu proton  $H^+$ , sesuai dengan reaksi:



Sehingga konsentrasi proton sama dengan konsentrasi asam nitrat. Konsentrasi proton dapat dicari dengan persamaan:

$$[H^+] = [HNO_3] = K_H \times P_{NO_2} \quad (2-19)$$

Tingkat keasaman (pH) air hujan akibat gas  $NO_2$  yang larut menjadi asam nitrat diperoleh dengan persamaan:

$$pH = -\log_{10} (K_H \times P_{NO_2}). \quad (2-20)$$

## 3 METODOLOGI

### 3.1 Lokasi dan Data

Lokasi penelitian dilakukan di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang, Sumatera Barat. Periode data yang digunakan dalam penelitian ini adalah 24 bulan, mulai Januari 2011 sampai Desember 2012.

Data jumlah hari hujan bulanan dan curah hujan bulanan didapatkan dari penakar hujan observasi (OBS), sementara data tekanan dan temperatur dari MAWS Vaisala. Selama 24 bulan, hari hujan bervariasi dari 7 hari (Juli 2011) sampai 25 hari (September 2011, November 2011 dan November 2012).



Gambar 3-1: pH meter INOLAB pH Level 1 (atas) dan *Ultrapure Water System* (bawah).

### 3.2 Pengukuran Curah Hujan dan Tingkat Keasaman Air Hujan

Sampel air hujan diambil satu hari sekali menggunakan penakar hujan Observasi (Obs). Pengukuran pH dilakukan dengan menggunakan alat pH meter INOLAB pH Level 1 (Gambar 3-1). Pengukuran pH air hujan dilakukan dengan cara mencelupkan elektroda pH meter ke dalam sampel, nilai pH akan terbaca pada display alat. Pengukuran curah hujan menggunakan gelas ukur 25 mm sesuai standar Badan Meteorologi Klimatologi Geofisika (untuk corong 100 cm<sup>2</sup>).

Untuk menjaga kualitas data hasil pengukuran, minimal seminggu sekali sebelum pengukuran pH instrumen dikalibrasi dengan larutan *buffer* pH 4,0 dan pH 7,0, tanpa ada pengaturan suhu larutan. Kalibrasi instrumen pH meter INOLAB pH Level 1 dilakukan secara otomatis. Larutan *buffer* pH

7,0 dimasukkan ke dalam gelas piala, lalu dicatat pH dan tegangannya (mV), kemudian hal yang sama juga dilakukan untuk larutan *buffer* pH 4,0.

Penggunaan akuades sebagai bahan pelarut dan pencuci alat-alat gelas dikontrol secara ketat. Untuk menjaga kebersihan dan menghindari kontaminasi dari alat-alat, akuades yang digunakan merupakan hasil pemrosesan *Ultrapure Water System* dengan konduktivitas yang dijaga maksimum sampai 0,055 S/cm, sehingga kontaminasi menjadi sangat minimal (SG Wasseraufbereitung und Regenerierstation GmbH, 2005).

### 3.3 Pengukuran Konsentrasi Gas

Ada dua jenis gas yang diukur konsentrasinya dalam keadaan kering, yaitu gas NO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub>. *Mixing ratio* dinyatakan dalam *part permillion volume* (ppmv) atau *part perbillion volume* (ppbv).

Data gas SO<sub>2</sub> merupakan data rata-rata 5 menitan yang kemudian diolah menjadi agregat harian. Data mentah diambil dari instrumen *TS43i-Trace Level Enhance* menggunakan *software* IPORT dengan kabel RS232. Metode pengukuran yang digunakan instrumen ini adalah *UV Fluorescence*. Instrumen ini juga sudah dilengkapi dengan sistem kalibrasi *Dynamic Gas Calibrator TS146i* dan *Zero Air Supply*



Gambar 3-2: NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> Analyzer TS42iTL (kiri atas), SO<sub>2</sub> Analyzer TS43i-TLE (kanan atas), *Dynamic Gas Calibrator* TS146i (kiri bawah), dan *Zero Air Supply* TS111 (kanan bawah).



Gambar 3-3: *Meteorological Automatic Weather Station (MAWS) Vaisala* di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang.

TS111 serta gas standar  $\text{SO}_2$  (Gambar 3-2).

Data gas  $\text{NO}_2$  juga merupakan data rata-rata 5 menit yang kemudian diolah menjadi agregat harian. Data mentah dari instrumen *TS42i-Trace Level* diperoleh dengan cara yang sama dengan sebelumnya. Metode pengukuran yang digunakan adalah *Chemiluminescence*. Instrumen ini juga sudah dilengkapi dengan sistem kalibrasi serta gas standar  $\text{NO}_2$  (Gambar 3-2).

### 3.4 Kondisi Udara Ambien

Kondisi udara ambien berupa tekanan dan temperatur diperoleh dari data MAWS Vaisala (Gambar 3-3) dengan resolusi 1 menit yang kemudian diolah menjadi agregat data harian.

### 3.5 Skema Penelitian

Pada penelitian ini diasumsikan semua gas ( $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$ ) larut sempurna dalam air hujan menjadi asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) dan asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ).

Besarnya pH air hujan hasil perhitungan (estimasi) akan dibandingkan dengan pH air hujan hasil pengukuran langsung. Korelasi Pearson digunakan untuk menilai kesesuaian besarnya pH air hujan hasil estimasi terhadap hasil pengukuran.

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data rata-rata/agregat harian. Pengolahan data dilakukan dengan mengasumsikan bahwa semua gas terlarut ke dalam air hujan sesuai dengan Hukum Henry dan menjadi tekanan parsial gas. Data *mixing ratio* gas dalam ppb/ppm harus diubah terlebih dahulu menjadi fraksi mol dalam persen. Nilai tekanan parsial masing-masing gas diperoleh dengan mengalikan fraksi mol gas dengan tekanan udara saat itu.

Data tekanan udara diperoleh dari MAWS Vaisala dan dibuat menjadi data agregat harian. Fase gas diubah menjadi fase larutan dengan menggunakan Hukum Henry, sehingga diperoleh konsentrasi ion hidrogen dalam larutan.

Data pengukuran pH air hujan diperoleh dari INOLAB pH level 1 dengan sampel air hujan yang berasal dari penakar hujan observasi. Instrumen pH meter INOLAB pH Level 1 masih berfungsi dengan baik jika gradien mV/pH berada dalam kisaran  $-60,5$  sampai  $-58,0$ . Selama proses kalibrasi gradien mV/pH selalu terbaca dalam kisaran tersebut, dan dari kalibrasi terakhir nilai gradien mV/pH diperoleh sebesar  $-59,0$ .

Jumlah hari pengukuran pH selama periode penelitian tidak selalu sama dengan jumlah hari hujan. Seperti misalnya pada bulan Januari 2011, terdapat 17 hari hujan, namun hanya 11 hari yang dapat diukur tingkat keasamannya (pH). Hal ini karena adakalanya curah hujan yang terjadi sangat sedikit (tidak terukur) sehingga tidak cukup membuat elektroda pH

TABEL 4-1: KETERSEDIAAN DATA HARIAN SELAMA 24 BULAN, DARI JANUARI 2011 HINGGA DESEMBER 2012. KOLOM PALING KANAN BERISIKAN RATA-RATA CURAH HUJAN DALAM MM.

Bulan	P	T	Hari Hujan	pH	[SO <sub>2</sub> ]	[NO <sub>2</sub> ]	Curah Hujan
Jan 11	31	31	17	11	31	13	138,4
Feb 11	28	28	13	12	28	18	136,5
Mar 11	31	31	21	20	31	13	199,9
Apr 11	30	30	16	15	30	16	326,3
Mei 11	31	31	12	12	31	29	238,8
Jun 11	30	30	11	8	30	28	71,0
Jul 11	31	31	7	5	31	31	64,5
Ags 11	31	31	15	10	31	31	271,4
Sep 11	30	30	25	19	30	30	361,0
Okt 11	30	30	16	15	31	31	256,0
Nov 11	30	30	25	23	30	30	578,8
Des 11	31	30	16	10	28	31	358,2
Jan 12	31	28	9	9	31	31	85,1
Feb 12	29	28	19	20	29	29	344,6
Mar 12	31	29	19	12	31	31	180,1
Apr 12	30	30	19	18	30	30	252,6
Mei 12	31	31	10	9	31	31	108,9
Jun 12	30	30	14	14	30	30	241,3
Jul 12	31	31	12	12	31	30	177,4
Ags 12	29	29	15	13	31	30	318,4
Sep 12	30	21	11	11	30	30	92,3
Okt 12	31	29	15	15	31	31	601,5
Nov 12	30	20	25	25	30	29	480,1
Des 12	31	31	21	21	31	31	336,4

tercelup.

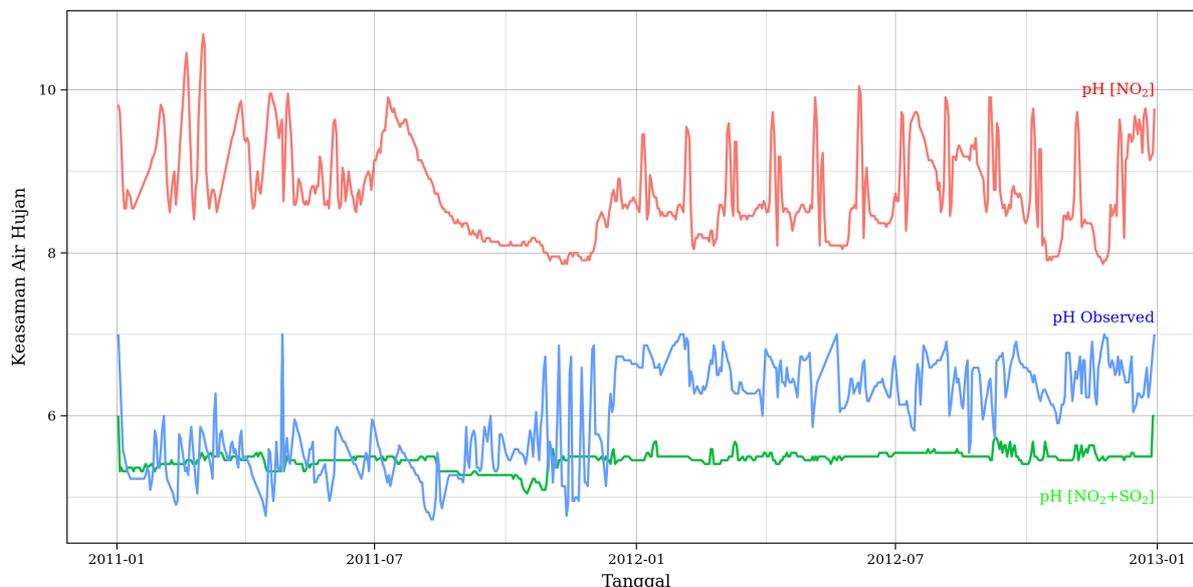
Ketersediaan data temperatur dan data tekanan, yang berasal dari MAWS Vaisala, hampir mendekati 100%, yang berarti jumlah hari pada bulan itu sama dengan dengan jumlah hari banyaknya data. Kehilangan data selama 1 hari biasanya disebabkan kesalahan teknis, misalnya data logger penuh, listrik mati, atau baterai kehabisan tegangan.

Gambar 4-1 menyajikan plot deret waktu dari tingkat keasaman yang terukur serta tingkat keasaman yang diestimasi berdasarkan skema absorpsi NO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> + SO<sub>2</sub>.

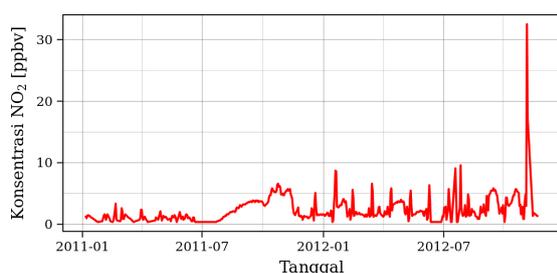
#### 4.1 Perbandingan pH Air Hujan Hasil Pengukuran dan Estimasi Berdasarkan Skema Absorpsi NO<sub>2</sub>

Selama periode pengukuran data dari 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2012, konsentrasi gas NO<sub>2</sub> harian di Bukit Kototabang sangat kecil dengan rata-rata harian 1,30 ppbv, minimum 0,01 ppbv dan maksimum 22,72 ppbv (lihat Gambar 4-2).

Konsentrasi gas NO<sub>2</sub> yang sangat rendah didukung dengan konstanta pelarutan gas NO<sub>2</sub> yang sangat kecil menghasilkan konsentrasi proton [H<sup>+</sup>] yang juga sangat kecil atau di bawah konsentrasi proton [H<sup>+</sup>] akibat disosiasi

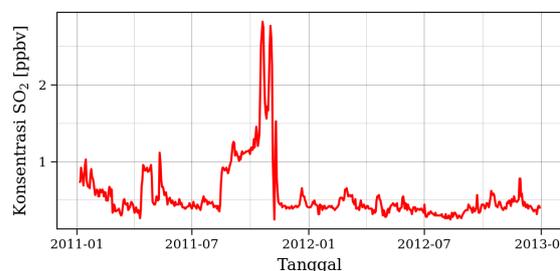


Gambar 4-1: Tingkat keasaman (pH) air hujan harian hasil pengukuran langsung (*Observed*) dan hasil estimasi berdasarkan skema absorpsi gas  $\text{NO}_2$ , skema absorpsi campuran gas  $\text{NO}_2$  dengan  $\text{SO}_2$  di Stasiun Pemantau Atmosfer Global periode dari 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2012.



Gambar 4-2: Konsentrasi harian gas  $\text{NO}_2$  (dinyatakan dalam ppbv) di Stasiun Pemantau Atmosfer Global periode dari 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2012.

di Bukit Kototabang rendah dengan rata-rata harian 0,57 ppbv, minimum 0,28 ppbv dan maksimum 2,82 ppbv (lihat Gambar 4-3).



Gambar 4-3: Konsentrasi harian gas  $\text{SO}_2$  (dinyatakan dalam ppbv) di Stasiun Pemantau Atmosfer Global periode dari 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2012.

air (peruraian  $\text{H}_2\text{O}$  menjadi  $\text{H}^+$  dan  $\text{OH}^-$ ).

Karena  $[\text{H}^+]_{\text{NO}_2}$  jauh lebih kecil daripada  $[\text{H}^+]_{\text{H}_2\text{O}}$ , maka tingkat keasaman (pH) air hujan akibat absorpsi gas  $\text{NO}_2$  dari hasil perhitungan selalu berada di atas 7, lebih besar daripada pH air hujan hasil pengukuran.

#### 4.2 Perbandingan pH Air Hujan Hasil Pengukuran dan Estimasi Berdasarkan Skema Absorpsi $\text{SO}_2$

Selama periode pengukuran data dari 1 Januari 2011 sampai 31 Desember 2012, konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  harian

Berbeda dengan gas  $\text{NO}_2$ , gas  $\text{SO}_2$  memiliki konstanta pelarutan dalam air yang besar, sehingga menghasilkan konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  lebih besar daripada konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  akibat disosiasi air.

Karena  $[\text{H}^+]_{\text{SO}_2}$  lebih besar dibandingkan  $[\text{H}^+]_{\text{H}_2\text{O}}$ , tingkat keasaman air hujan akibat absorpsi gas  $\text{SO}_2$  hasil perhitungan selalu berada di bawah 7 (pH akibat disosiasi air). Tingkat

keasaman (pH) air hujan akibat absorpsi gas  $\text{SO}_2$  hasil perhitungan ini bervariasi lebih besar atau lebih kecil dibandingkan tingkat keasaman (pH) hasil pengukuran air hujan, tergantung konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  hariannya.

#### 4.3 Perbandingan pH Air Hujan Hasil Pengukuran dan Estimasi Berdasarkan Skema Absorpsi $\text{NO}_2$ dan $\text{SO}_2$

Karena gas  $\text{SO}_2$  memiliki konstanta pelarutan gas dalam air yang jauh lebih besar daripada gas  $\text{NO}_2$ , konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  yang dihasilkan campuran gas  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  dapat dikatakan sama dengan konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  yang dihasilkan oleh gas  $\text{SO}_2$  saja. Konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  campuran ini masih lebih besar daripada konsentrasi proton  $[\text{H}^+]$  akibat disosiasi air.

$$[\text{H}^+]_{\text{NO}_2+\text{SO}_2} \simeq [\text{H}^+]_{\text{SO}_2} > [\text{H}^+]_{\text{H}_2\text{O}} > [\text{H}^+]_{\text{NO}_2}$$

Tingkat keasaman air hujan dari hasil perhitungan akibat absorpsi campuran kedua gas tidak jauh berbeda dengan nilai pH akibat absorpsi campuran gas  $\text{SO}_2$  saja, namun lebih besar dari 7 (pH akibat disosiasi air). Nilai ini juga lebih besar daripada tingkat keasaman air hujan akibat absorpsi gas  $\text{NO}_2$ . Tingkat keasaman air hujan akibat absorpsi campuran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  bervariasi lebih besar atau lebih kecil dibandingkan tingkat keasaman (pH) hasil pengukuran, yang dipengaruhi oleh konsentrasi gas hariannya.

#### 4.4 Evaluasi Hasil Estimasi

Untuk melihat pengaruh gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  terhadap tingkat keasaman air hujan pengukuran digunakan nilai korelasi Pearson ( $R$ ) antara nilai pH perhitungan dengan pH pengukuran. Penilaian kesesuaian didasarkan pada nilai  $R$  tersebut, semakin linier ( $|R| \simeq 1$ ), berarti nilai pH perhitungan mendekati pH pengukuran.

Hasil perhitungan nilai korelasi antara tingkat keasaman air hujan

TABEL 4-2: NILAI KOEFISIEN KORELASI PEARSON ( $R$ ) ANTARA PH AIR HUJAN HASIL PENGUKURAN LANGSUNG DAN HASIL ESTIMASI BERDASARKAN TIGA SKEMA ABSORPSI BERBEDA.

Bulan	Koefisien Korelasi ( $R$ )		
	$[\text{NO}_2]$	$[\text{SO}_2]$	$[\text{SO}_2 + \text{NO}_2]$
Jan 11	-0,22	0,58	-0,58
Feb 11	-0,30	0,17	0,17
Mar 11	-0,16	0,00	0,00
Apr 11	-0,06	0,16	-0,16
Mei 11	0,08	0,14	0,14
Jun 11	-0,55	0,11	0,11
Jul 11	-0,64	0,85	-0,85
Ags 11	-0,38	0,52	-0,52
Sep 11	-0,19	0,38	0,38
Okt 11	-0,35	0,45	-0,45
Nov 11	0,24	0,07	-0,07
Des 11	0,03	0,30	-0,30
Jan 12	0,08	0,42	-0,42
Feb 12	0,36	0,40	0,40
Mar 12	0,31	0,20	-0,20
Apr 12	0,47	0,29	0,29
Mei 12	0,00	0,27	-0,27
Jun 12	-0,38	0,08	0,08
Jul 12	0,18	0,63	0,63
Ags 12	-0,29	0,06	0,06
Sep 12	-0,11	0,44	-0,44
Okt 12	0,48	0,17	-0,17
Nov 12	-0,15	0,08	-0,08
Des 12	-0,03	0,33	-0,33

hasil perhitungan yang dibandingkan dengan tingkat keasaman hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4-2. Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh bahwa secara umum nilai korelasi pH air hujan selama periode pengukuran adalah rendah. Korelasi yang kuat hanya diperoleh satu kali, yaitu pada bulan Juli 2011, di mana  $R = 0.85$  atau  $R = -0.85$ . Nilai korelasi Pearson yang tinggi ini kemungkinan disebabkan oleh rendahnya curah hujan bulanan pada bulan Juli 2011 dibandingkan dengan bulan lain selama periode penelitian.

Selain itu, jumlah hari hujan pada bulan tersebut juga merupakan yang paling sedikit selama Januari 2011 sampai Desember 2012.

Bukit Kototabang yang menjadi lokasi penelitian merupakan daerah yang masih bersih dari polusi, ditunjukkan dengan konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan konsentrasi NO<sub>2</sub> harian yang kecil, yang berada dalam orde ppbv. Hal ini membuat proton [H<sup>+</sup>] terlarut dalam air yang dihasilkan oleh absorpsi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> juga sangat kecil, sehingga pH yang dihasilkan tidak sesuai dengan pH air hujan pengukuran. Ini menunjukkan tingkat keasaman air hujan di Bukit Kototabang tidak hanya dipengaruhi oleh konsentrasi gas SO<sub>2</sub> atau NO<sub>2</sub> saja, yang membentuk asam-asam kuat seperti asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) dan asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), namun masih ada komponen lain seperti gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>), garam asam dan garam basa, serta asam-asam lemah dan basa-basa lemah yang perlu diperhitungkan untuk menentukan konsentrasi proton [H<sup>+</sup>].

## 5 KESIMPULAN

Tingkat keasaman (pH) air hujan dari hasil perhitungan akibat absorpsi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> tidak sesuai dengan tingkat keasaman (pH) air hujan hasil pengukuran. Hal ini ditunjukkan oleh nilai korelasi yang rendah antara hasil perhitungan dengan hasil pengukuran selama periode penelitian. Korelasi yang tinggi hanya tercatat pada bulan Juli 2011, yakni dengan koefisien korelasi  $R_{[SO_2]} = 0,85$  dan  $R_{[SO_2+NO_2]} = -0,85$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih atas masukan konstruktif dari mitra bestari.

## DAFTAR RUJUKAN

Andrews, J. E., Brimblecombe, P., Jickells, T. D., & Liss, P. S. (1996). *An Introduction to Environmental Chemistry*. London: Blackwell Sciences.  
Gersen, S., Essen, M. V., Visser, P., Ahmad,

- M., Mokhov, A., Sepman, A., Alberts, R., Douma, A., & Levinsky, H. (2014). Detection of H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in CO at pressures ranging from 1-40 bar by using broadband absorption spectroscopy in the uv/vis range. *Energy Procedia*, 63, 2570.
- Kurniawan, A. (2010). Verifikasi data hasil pengukuran dari rain water sampler (rws) dengan penakar hujan observasi (obs), di SPAG Bukit Kototabang bulan maret 2010. *Buletin Megasains*.
- Kwak, H. Y., Ko, J., Lee, S., & Joh, C. H. (2017). Identifying the correlation between rainfall, traffic flow performance and air pollution concentration in Seoul using a path analysis. *Transportation Research Procedia*, 25, 3552.
- Mallik, C. & Lal, S. (2014). Seasonal characteristics of SO<sub>2</sub>, NO, and CO emissions in and around the Indo-Gangetic plain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 1295.
- Miroslav, R. & Vladimir, B. N. (1999). *Practical Environmental Analysis*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Mohamad, N. D., Ash'aari, Z. H., & Othman, M. (2015). Preliminary assessment of air pollutant sources identification at selected monitoring stations in Klang Valley, Malaysia. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 121.
- Noftri, S., Faizal, M., & Mohadi, R. (2017). Air quality analysis of SO<sub>2</sub>, NO and CO in Palembang City. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 2, 58.
- Rivera, C., Stremme, W., Barrera, H., Fliedrich, M. M., Grutter, M., Yee, J. G., Jardon, R. T., & Suarez, L. G. R. (2015). Spatial distribution and transport patterns of no<sub>2</sub> in the Tijuana San Diego area. *Atmospheric Pollution Research*, 6, 230-238.
- Rosario, L. & Francesco, S. P. (2016). Analysis and characterization of the predominant pollutants in the Catania's air quality monitoring stations. *Energy Procedia*, 101, 337.
- Sander, R. (1999). Compilation of henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry. Technical report, Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry, Germany.
- SG Wasseraufbereitung und Regenerierstation GmbH (2005). Operator's manual ultra-pure water system ultra clear. Technical report, SG Wasseraufbereitung und Regenerierstation GmbH.
- Sinha, A. (2016). Trilateral association between SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> emission, inequality in energy intensity, and economic growth: A case

- of Indian cities. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 647.
- Sudalma, S., Purwanto, P., & Santoso, L. W. (2015). The effect of SO<sub>2</sub> and NO from transportation and stationary emissions sources to SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in rain water in Semarang. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 247.
- Syafei, A. D., Fujiwara, A., & Zhang, J. (2015). Temporal and spatial analysis of peak-concentration time for NO and NO<sub>2</sub> in morning and evening events: a case study of Surabaya City. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 509.
- Williston, P., Aherne, J., Watmough, S., Marmorek, D., Hall, A., Bueno, P. C., Murray, C., Henolson, A., & Laurence, J. A. (2016). Critical levels and loads and the regulation of industrial emissions in northwest British Columbia, Canada. *Atmospheric Environment*, 146, 311.
- Xiao, K., Wang, Y., Wu, G., Fu, B., & Zhu, Y. (2018). Spatiotemporal characteristics of air pollutants (*pm*<sub>10</sub>, *pm*<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and CO) in the inland basin city of Chengdu, Southwest China. *Atmosphere*, 9, 74.

