

Hujan Asam dan Laju Pengasaman Air Sumur di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Bogor

Sutanto^{1*}, Latifah K Darusman², Syaiful Anwar³ dan Tania June⁴

¹Jurusan kimia FMIPA Universitas Pakuan, Jl. Pakuan, Bogor 16144, Indonesia

²Departemen Kimia, FMIPA Institut Pertanian Bogor, IPB Darmaga 16680, Indonesia

³Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, FAPERTA IPB, IPB Darmaga 16680, Indonesia

⁴Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA IPB, IPB Darmaga 16680, Indonesia

Diterima 27 Februari 2013/Disetujui 28 Februari 2013

Abstract

In the area of Cibinong-Citeureup Bogor has many industries, dusty and there are has been acid rain. About 75.63 % people in this area take well water for drinking. It was studied impact of acid rain for well water degradation in order to know the trend and rate of well water pH change. Preliminary research was done in order to make sure the effect of acid rain to well water using soil column leaching simulation. The main research was done by pH monitoring of acid rain and well water in the specific location. The pH of acid rain was monitored in the first 30 minutes on 12 locations from the year of 1999 to 2009, and the well water pH was measured from the year of 1995 to 2009. The acidity (pH) was measured using pH meter electronic. The rate of pH change was calculated by first order reaction. The result showed that the well water acidity has uptrend (the pH to be lower). The acid rain has a little impact to the acidity of well water ($r = 0.68$). The rate of acidity of well water has constant value, $k = 0.004 \text{ year}^{-1}$.

Keywords: acid rain, pH, acidity, leaching, well water

Pendahuluan

Wilayah Cibinong-Citeureup Bogor merupakan wilayah industri yang padat transportasi. Jumlah industri manufaktur besar-sedang mencapai 423 dengan dua industri semen dan 45 industri tambang/galian, total jumlah usaha mencapai 3.598 perusahaan termasuk usaha jasa, dan total memperkerjakan sebanyak 149.698 tenaga kerja. Kepadatan penduduk di empat kecamatan yaitu Kecamatan Gunung Putri, Kecamatan Citeureup, Kecamatan Cibinong dan Kecamatan Klapanunggal masing-masing mencapai 5.345; 2.594; 5.828; dan 786 jiwa km^{-2} , atau rata-rata 3.638 jiwa

km^{-2} . Berdasarkan data PDAM Kabupaten Bogor di empat kecamatan tersebut terdapat 23.334 rumah tangga pelanggan air minum dari 195.121 rumah tangga. Data tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar keluarga mengandalkan air tanah/air sumur sebagai sumber air untuk keperluan sehari-hari termasuk untuk kebutuhan air minum.

Keasaman air sumur dapat dipengaruhi oleh berbagai hal diantaranya adalah tanah, dan kualitas input air yang merembes ke dalam tanah. Input air sumur terbesar adalah air hujan. Kualitas air hujan yang jatuh disekitar sumur mempengaruhi kualitas air sumur.

* Penulis untuk korespondensi, email: sutanto_psl@yahoo.co.id

Pemantauan kualitas air hujan di kota yang relatif dekat dengan wilayah penelitian menunjukkan terjadinya hujan asam dengan kecenderungan pH air hujan terus menurun. Berdasarkan laporan Eanet 2009, Serpong mengalami hujan asam dengan intensitas paling tinggi (pH 4,63 pada tahun 2001 menjadi 4,62 pada tahun 2008) dan tidak menunjukkan perubahan pH yang berarti selama 8 tahun. Jakarta mengalami hujan asam dengan intensitas tinggi dan pH terus menurun (rata-rata pH 5,18 pada tahun 2000 menjadi 4,65 pada tahun 2008). Kota Bandung memiliki pH air hujan rata-rata tahunan selama 7 tahun sekitar 4,99. Hujan asam juga telah terjadi di Cisarua-Bogor sejak 1989-2004 dengan frekuensi kejadian sebanyak 72% (Budiwati *et al.*, 2006). Pengamatan air hujan di berbagai tempat di daerah kabupaten Bogor menunjukkan bahwa kualitas air hujan memiliki pH rata-rata 5,09 (Diapari, 2009). Data hasil pemantauan ini menunjukkan bahwa daerah Bogor dan sekitarnya telah mengalami hujan asam secara terus-menerus.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) evaluasi dan monitoring keasaman air hujan dan air sumur; (2) mencari korelasi antara keasaman air hujan dan air sumur; (3) menentukan persamaan yang menghubungkan antara pH air hujan dan air sumur; (4) menentukan persamaan laju pengasaman air sumur di wilayah industri industri Cibinong-Citeureup Kabupaten Bogor.

Metode

Penelitian ini didukung data sekunder tahun 1995, 1999, 2001, dan data primer tahun 2006, 2008, dan 2009. Wilayah penelitian adalah Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Kabupaten Bogor pada posisi lintang : 106°50'34"-106°54'46" BT dan 6°25'20"- 6°31'50" LS. Luas wilayah penelitian ±100 km².

Peralatan yang digunakan meliputi peralatan sampling: jas hujan, botol/jerigen sampling kapasitas 3 liter, alat penampung

air hujan dan statif, pH meter LUTRON, buret, dan peralatan gelas lainnya. Bahan-bahan yang digunakan adalah: air suling akuabides, kertas pH universal (Merk), larutan buffer pH 4, larutan buffer pH 7 dan larutan buffer pH 10.

Monitoring hujan asam dilakukan dengan sampling air hujan di wilayah penelitian. Titik atau lokasi sampling sebanyak 12 dan terdistribusi di wilayah penelitian seperti terlihat pada Lampiran 1. Penampungan air hujan dilakukan dengan wadah plastik bersih pada tempat terbuka, bebas dari halangan bangunan maupun pepohonan, dalam waktu 30 menit pertama hujan turun, atau hingga mencapai 2 liter.

Analisis air hujan meliputi parameter fisika yaitu suhu dan daya hantar listrik dan kimia meliputi pH. Pengamatan suhu, dayahantar listrik, dan pH dilakukan dilapangan secara langsung menggunakan pH meter dan konduktometer digital. Data air hujan yang diperoleh di evaluasi dengan cara membandingkan dengan data air hujan kontrol dan data air hujan tiga penelitian sebelumnya (data sekunder) yaitu tahun 1999, 2001, 2006, data primer tahun 2008, dan 2009. Hasilnya disajikan dalam bentuk data *de facto* yang merupakan deskripsi kualitas air hujan lima data seri pengamatan dalam kurun waktu 11 tahun. Analisis data secara rinci meliputi (1) Korelasi Keasaman Air Hujan dengan Keasaman Air Sumur; (2) Persamaan yang Menghubungkan antara Keasaman Air Hujan dan Air Sumur; (3) Laju Pengasaman Air Sumur.

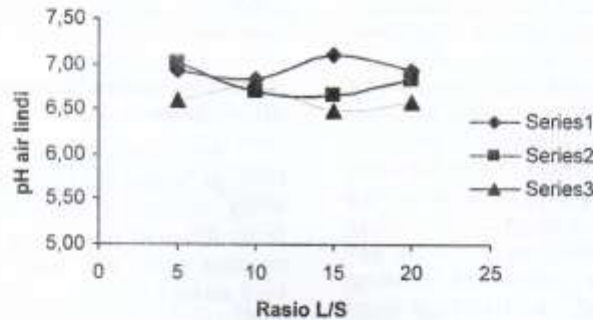
Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan pH pada air lindi tergantung kepada tingkat keasaman air hujan buatan. Gambar 1 memperlihatkan pola perubahan keasaman air lindi pada berbagai keasaman air hujan buatan yang dialirkan ke dalam kolom pelindi.

Pada pengaliran hujan buatan pH 4,5 (Kurva A) menyebabkan pH air lindi berfluktuasi antara 6,94, 6,83, 7,12, dan kembali menjadi 6,94. Hal ini menunjukkan

bahwa tanah memiliki kemampuan menetralkan pH air hujan buatan (pH_{ah}). Fluktuasi pH air lindi tersebut dapat disebabkan sifat buffer tanah yang tidak linier. Pada pengaliran air hujan buatan pH 4,0 (Kurva B) mula-mula menyebabkan pH air lindi menjadi 7,01, selanjutnya pH cenderung menurun menjadi 6,83. Hal ini

dapat disebabkan kemampuan buffer tanah menurun akibat sebagian kation-kation basa yang berperan sebagai buffer terlindi. Pada pengaliran air hujan buatan pH 3,5 (Kurva C), mula-mula pH air lindi 6,61 dan selanjutnya berfluktuasi dan akhirnya menjadi 6,59.



Gambar 1 Pola perubahan pH air lindi pada percobaan kolom akibat semakin bertambahnya nilai L/S pada berbagai pH air hujan buatan. Air Hujan buatan A = pH 4,5; B = pH 4,0; dan C = pH 3,5.

Semakin rendah pH air hujan buatan, semakin cepat menurunkan pH air lindi. Namun karena sifat kapasitas buffer tanah tidak linier, maka didapatkan fluktuasi pH air lindi dimana terlihat bahwa pada pH Pada pH air hujan buatan 4,5, mula-mula air hujan dinetralkan menjadi pH >7, kemudian dengan adanya aliran hujan buatan secara terus menerus tanah tak lagi dapat menetralkan air hujan sehingga pH air lindi terus menurun dengan persamaan $pH_{al} = 0,0585 \ln(L/S) + 6,8161$. Kemampuan tanah menetralkan pH air hujan dikarenakan tanah memiliki kation basa yang dapat dipertukarkan dengan kation asam (terutama ion H^+). Kemampuan menetralkan asam oleh tanah dinyatakan dalam istilah ANC (*anion neutralizing capacity*), dalam satuan $meq L^{-1}$, yaitu merupakan selisih jumlah anion dan kation basa dengan anion dan kation asam.

Perhitungan berdasarkan data tanah di lokasi penelitian daerah Gunung Putri dan merujuk perhitungan ANC menurut Rose *et al.* (1991) diperoleh nilai ANC cukup tinggi

sebesar $15,04 \text{ mmol L}^{-1}$. Pada pH air hujan buatan 4,0 perubahan pH air lindi (pH_{al}) menurun lebih tajam dengan persamaan : $pH_{al} = 7,2045(L/S)^{-0,0244}$. Pada pH air hujan buatan 3,5 menyebabkan pola perubahan pH air lindi yang berbeda. Air hujan buatan tak dapat dinetralkan sempurna tetapi air lindi hanya mencapai pH 6,76 kemudian turun menjadi sekitar pH 6,59 mengikuti persamaan $pH_{al} = 6,7565(L/S)^{-0,0091}$.

Pola perubahan yang sangat kecil ini dapat disebabkan hampir tercapainya kesetimbangan atau kesetaraan antara kekuatan asam dan kemampuan tanah menahan laju pengasaman akibat hujan asam. Keasaman air lindi akan konstan atau stabil bilamana rasio air hujan terhadap volume tanah (L/S) mencapai 10 (Sloot *et al.*, 2003). Penambahan volume air hujan buatan melebihi L/S > 10 tidak akan mengubah pH air lindi yang berarti. Apabila memperhitungkan volume tanah sebesar 5 kg maka rasio L/S mencapai 10 pada saat air lindi mencapai 50 liter.

Tabel 1 Hasil Perhitungan pH air lindi berdasarkan persamaan grafik pada Gambar 1

L/S	pH air hujan		
	4,5	4	3,5
1	6,82	7,20	6,76
3	6,88	7,01	6,69
6	6,92	6,90	6,65
8	6,94	6,85	6,63
10	6,95	6,81	6,62

L = volume air hujan yang dialirkan, S = volume tanah (kolom tanah)

Perhitungan pH air lindi dengan persamaan tersebut pada rasio L/S =10, diperoleh pH=6,95 (Kurva A), pH =6,81 (Kurva B), dan pH =6,62 (Kurva C) seperti disajikan pada Tabel 1. Data pH air lindi pada rasio L/S 10 ini diplot terhadap pH air hujan buatan diperoleh grafik dengan persamaan garis yang menyatakan hubungan antara pH al dan pH ah. Hubungan antara keduanya adalah berbanding langsung, artinya semakin tinggi pH air hujan buatan, semakin tinggi juga pH air lindi. Hubungan tersebut kuat mengikuti persamaan $pH_{al} = 1,3155Ln(pH_{ah})+4,9765$ dan 99% dapat diijelaskan ($R^2 = 0,99$).

Hasil Pengamatan Temporal Terhadap pH Air Sumur

Hasil pengamatan pH air sumur pada berbagai waktu sampling di daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi disajikan pada Tabel 2. Variasi pH terhadap waktu ada dalam kisaran sangat kecil antara 0,011 sampai 0,085 (rata-rata $\pm 0,061$ satuan) dimungkinkan karena variasi suhu atau kelarutan karbon dioksida. Sementara itu kesalahan pengukuran alat dalam hal ini pH meter yang digunakan memiliki 2 digit dibelakan koma dengan toleransi nilai ukur adalah $\pm 0,05$. Nilai % RSD dalam kisaran 0,25 sampai 2,47, rata-rata 1,43%. Dari data% RSD ini yang nilainya <3% menjelaskan bahwa pH air sumur tidak dipengaruhi oleh waktu dalam satu hari pengamatan.

Tabel 2 Data pengamatan pH air sumur pada berbagai waktu dalam sehari

Jam sampling	Lokasi Sumur				
	1	2	3	4	5
08.00-09.00	4,24	4,30	4,01	4,78	4,37
10.00-11.00	4,24	4,17	4,05	4,80	4,34
13.00-14.00	4,10	4,11	3,92	4,92	4,36
16.00-17.00	4,30	4,12	4,04	4,75	4,36
19.00-20.00	4,24	4,20	3,93	4,69	4,36
Rata-rata	4,22	4,18	3,99	4,79	4,36
Minimum	4,1	4,11	3,92	4,69	4,34
Maksimum	4,3	4,3	4,05	4,92	4,37
Simpangan baku	0,074	0,076	0,061	0,085	0,011
% RSD	1,75	1,83	1,53	1,77	0,25

Keterangan : 1 = Kranggan Puspasari; 2 = Kranggan G. Putri 1; 3 = Kranggan G Putri 2; 4 = Tlajung Udik ; 5 = Ps. Citeureup Puspanegara
Rata-rata SD = 0,061 dan rata-rata RSD = 1,43%

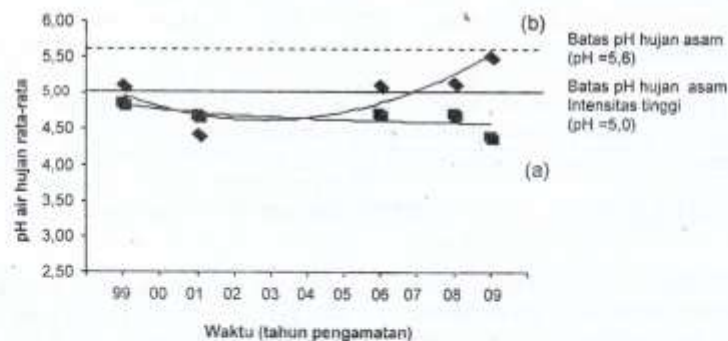
Hasil pemetaan distribusi hujan asam dengan peta isopleth pH (Sutanto *et al.*, 2009) menunjukkan bahwa terdapat daerah yang secara terus-menerus mengalami hujan asam intensitas tinggi dan terdapat pula daerah yang hanya sesekali mengalami hujan asam intensitas tinggi. Daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi yaitu Desa Cibinong (sebagian), Desa Kranggan (sebagian), Desa Puspasari, Desa Gunung Putri (sebagian), Desa Citeureup, Desa Karanga Asem Barat (sebagian), dan Karang asem timur. Daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi meliputi: Desa Sentul, Klapanunggal (Narogong), Wanaherang, Tajur, Cibinong bagian barat, dan Desa Cilangkap Kabupaten Bogor.

Evaluasi dan Monitoring Hujan Asam dan Keasaman Air Sumur

Perubahan keasaman air hujan (pH) di setiap lokasi di wilayah penelitian pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi, rata-rata berubah dari 4,86 pada tahun 1999 menjadi 4,40 pada tahun 2009. Penurunan pH rata-rata terjadi selama 10 tahun sebesar 0,46 satuan pH. Meskipun perubahan pH ini tidak nampak nyata ($P=0,315$) namun cenderung semakin asam. Penurunan pH dimungkinkan akibat semakin buruknya kondisi atmosfer di atas wilayah penelitian. Semakin menurunnya

pH berarti semakin tinggi kadar polutan penyebab asam. Data kadar debu di daerah ini antara 200-315 $\mu\text{g m}^{-3}$, dan kadar NO_2 mencapai 700 $\mu\text{g m}^{-3}$, sedangkan kadar SO_2 relatif kecil, dan kadar debu mencapai 555,6 $\mu\text{g m}^{-3}$ (DTRLH, 2009). Polutan NO_2 bereaksi dengan air hujan membentuk hujan asam. Semakin tinggi kadar polutan NO_2 tingkat keasaman air hujan semakin tinggi, pH air hujan semakin rendah.

Daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi meliputi Desa Wanaherang, Cibinong, Sentul, dan Narogong Klapanunggal. Pada daerah ini pH hujan asam relatif stabil sekitar lima bahkan terjadi kecenderungan meningkat. Rata-rata pH air hujan daerah ini meningkat dari 5,12 pada tahun 1999 menjadi 5,52 pada tahun 2009. Penurunan keasaman air hujan ini (kenaikan pH) terjadi karena penurunan kadar polutan akibat polusi udara mengalami penyebaran terbatas. Kadar polutan NO_2 pada daerah ini berkisar antara 16,34 $\mu\text{g m}^{-3}$ sampai 26,12 $\mu\text{g m}^{-3}$, dan kadar polutan SO_2 berkisar antara 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ sampai 94,90 $\mu\text{g m}^{-3}$, serta kadar debu berkisar antara 17,12 $\mu\text{g m}^{-3}$ sampai 118,87 $\mu\text{g m}^{-3}$ (DTRLH, 2009). Gambar 2 memperlihatkan perbedaan pola perubahan dan tingkat keasaman air hujan pada daerah yang sering dan yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi.



Gambar 2 Grafik perubahan pH air hujan di wilayah penelitian pada daerah yang sering (a) maupun yang jarang (b) mengalami hujan asam intensitas tinggi.

Kualitas air sumur dipantau dari tahun 1999 sampai 2009 disajikan pada Tabel 3, yaitu menyajikan data seri pH air sumur pada berbagai lokasi sampling pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi. Nampak bahwa pH air sumur sangat bervariasi, dan yang paling ekstrim terendah terukur pH = 3,46 yaitu air sumur di Puspanegara II pada tahun 2006.

Pada tahun 2008 hanya terdapat 2 sumur yang memiliki pH air sumur >5,0, selebihnya air sumur memiliki pH dibawah 5. Pada tahun 2009 akhir semua air sumur memiliki pH < 5,0. Rendahnya pH air sumur berkaitan erat dengan rendahnya pH air hujan di daerah ini, dan rendahnya pH air hujan berkaitan erat dengan tingginya kadar polutan penyebab hujan asam termasuk kadar.

Berdasarkan ketentuan syarat air minum menurut PerMenKES No. 492/

MENKES/PER/IV/2010 dan Peraturan Pemerintah RI PP No. 82 tahun 2001 tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air untuk klas I bahwa syarat air yang dapat diminum adalah memiliki pH antara 6-8. Berarti hampir seluruh sumur di wilayah penelitian tidak memenuhi syarat sebagai air minum dilihat dari evaluasi parameter pH.

Daerah-daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi di wilayah penelitian teridentifikasi dari hasil pemetaan hujan asam. Pada daerah ini memiliki pola kecenderungan perubahan keasaman air sumur yang berbeda. Rata-rata pH air sumur berubah dari pH 5,12 pada tahun 1999 menjadi 5,52 pada tahun 2009. Peningkatan pH atau penurunan keasaman air sumur dapat disebabkan oleh input hujan asam yang rendah

Tabel 3 Data rata-rata pH air sumur pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Kabupaten Bogor

Lokasi sampling	Nilai pH terukur air sumur						
	1999	2001	2006	2008 (I)	2008 (II)	2009 (I)	2009 (II)
Karangasem Barat	4,35	4,62	3,79	3,88	5,33	4,58	4,64
Puspanegara I	6,37	4,74	3,67	4,49	5,1	4,32	4,87
Puspanegara II	4,37	4,77	3,46	4,11	4,02	4,37	4,22
Babakan tarikolot*	-	-	4,28	5,38	5,58	5,10	4,70
Jl. Raya G.Putri	4,50	4,71	4,89	4,40	4,10	4,11	4,76
Ds. Tlajung Udik	4,22	4,02	4,89	5,55	5,23	4,95	4,68
Jln. Nurdin (ITC Cbn)	4,35	4,34	4,42	4,91	4,80	4,93	4,84
Cikaret Cibinong	-	-	3,88	4,08	3,88	5,28	4,50
Rata-rata pH	4,68	4,53	4,16	4,6	4,76	4,71	4,64
Rata-rata [H ⁺]	3,09	3,66	1,21	4,80	4,30	2,88	2,51
	E-05	E-05	E-04	E-05	E-05	E-05	E-05
pH rata-rata	4,51	4,44	3,92	4,32	4,37	4,54	4,60

Keterangan : - Tidak disampling, kosong : belum disampling, I. sampling bulan kering (Juni), II. sampling bulan basah (November)

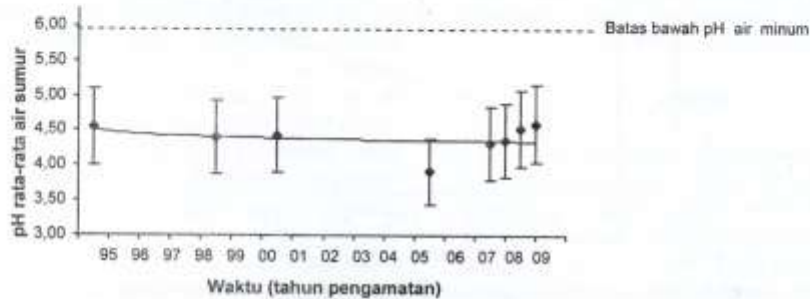
Daerah-daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi di wilayah penelitian teridentifikasi dari hasil pemetaan hujan asam. Pada daerah ini memiliki pola kecenderungan perubahan

keasaman air sumur yang berbeda. Rata-rata pH air sumur berubah dari pH 5,12 pada tahun 1999 menjadi 5,52 pada tahun 2009. Peningkatan pH atau penurunan

keasaman air sumur dapat disebabkan oleh input hujan asam yang rendah.

Gambar 3 memperlihatkan pola perubahan tingkat keasaman (pH) air sumur

pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi. Perubahan pH pada daerah ini tidak beda nyata ($P=0,315$) namun pH cenderung menurun.



Gambar 3 Grafik perubahan pH air sumur di wilayah penelitian pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi dari tahun 1999 sampai tahun 2009 (error bar 10%).

Fluktuatif nilai pH air sumur disebabkan tanah disekitar air sumur yang dilalui oleh air hujan menuju ke sumur memiliki sifat penyangga atau penetral asam yang disebut ANC (*acid neutralising capacity*).

Menurut Hruska dan Pavel (2003) kapasitas penetral asam dalam tanah merupakan perbedaan jumlah kation basa ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$) dengan jumlah anion anorganik penyebab asam kuat ($\text{SO}_4^- + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{F}^-$) dalam satuan miliekivalen per liter (mek L^{-1}). Semakin besar nilai ANC berarti semakin banyak kation basa dibandingkan anion penyebab asam. Menurut Chapman *et al.* (1995) nilai ANC dapat berubah-ubah dengan musim terutama pada horizon O. nilai ANC maksimum pada bulan Juli (bulan kering) dan nilai minimum pada bulan Februari. Hal ini disebabkan perbedaan curah hujan, pertukaran kation Na^+ dan H^+ , dan juga adanya senyawa organik yang bersifat asam lemah. Hasil analisis tanah dari wilayah Cibinong-Citeureup dapat dihitung bahwa nilai ANC tanah antara $10,00 \text{ mmol L}^{-1}$ sampai $15,04 \text{ mmol L}^{-1}$. Artinya tanah di wilayah penelitian masih memiliki kemampuan menyangga pH (*buffer*).

Kecenderungan menurun pH air sumur ini seiring dengan perubahan pH air hujan yang juga semakin menurun. Meskipun pada dasarnya tanah dimana sumur-sumur berada masih memiliki kemampuan menyangga pH namun input ion nitrat dan ion sulfat dari air hujan akan memperbanyak anion asam dalam tanah sehingga kemampuan tanah menyangga pH menjadi rendah.

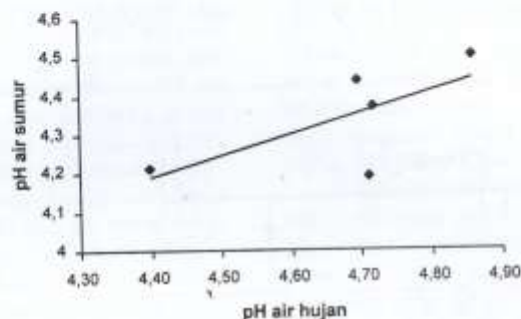
Sumur-sumur yang menjadi obyek penelitian adalah sumur dangkal dengan kedalaman antara 8 m sampai 16 meter. Air hujan merupakan input utama bagi air sumur, oleh karena itu kualitas air hujan berpengaruh terhadap kualitas air sumur. Pada daerah yang secara terus-menerus mengalami hujan asam nilai ANC kecil karena input asamnya tinggi sehingga kemampuan menetralkan asam rendah.

Korelasi Antara Keasaman Air Sumur dan Air Hujan

Gambar 4 memperlihatkan plot antara pH air hujan dengan pH air sumur yang dibuat berdasarkan data tahun 1999 sampai tahun 2008. Nilai koefisien determinasi $R^2=0,46$, atau nilai koefisien korelasi linier

$r=0,68$. Koefisien korelasi (r) sebesar 0,68 menjelaskan bahwa terdapat hubungan

langsung antara pH air sumur dengan pH air hujan.



Gambar 4 Grafik hubungan antara tingkat keasaman air hujan terhadap keasaman air sumur pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi.

Air sumur di wilayah penelitian adalah air sumur dangkal dengan kedalaman antara 10 sampai 15 m. Kedalaman sumur ini belum mencapai lapisan batuan dimana air dapat tersimpan cukup lama, akan tetapi keberadaan air sumur sangat tergantung air hujan. Dengan demikian air hujan merupakan input utama air sumur, dan oleh karena itu kualitas air

hujan berpengaruh terhadap kualitas air sumur.

Tabel 4 menunjukkan data rata-rata pH air sumur di daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi. Pola perubahan peningkatan keasaman air sumur di daerah ini berbeda dengan daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi.

Tabel 4 Data rata-rata pH air sumur pada daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Kabupaten Bogor

Lokasi sampling	Nilai pH terukur						
	1999	2001	2006	2008 (I)	2008 (II)	2009 (I)	2009 (II)
Griya Bukit Jaya,	-	-	5,34	4,44	5,6	5,43	5,60
Kranggan,	4,9	4,32	4,19	5,64	4,77	4,43	5,30
Babakan Sentul	-	-	4,57	4,52	4,22	5,12	5,08
Tarikolot, Tajur	6,37	5,66	5,1	6,39	6,52	6,35	6,45
Narogong Km 28	-	-	5,89	6,63	6,51	6,63	6,50
Nambo	-	-	4,85	4,44	4,67	4,83	4,51
Cimpaeun Cilangkap	-	-	5,06	4,90	5,28	5,00	4,85
Rata-rata pH	5,64	4,99	5,00	5,28	5,37	5,34	5,33
Rata-rata $[H^+]$	5,10 E-06	2,01 E-05	1,73 E-05	1,54 E-05	1,39 E-05	9,81 E-06	8,28 E-06
pH	5,29	4,70	4,76	4,8	4,86	5,01	5,08

Keterangan: - Tidak disampling, kosong : belum disampling, I. sampling bulan kering (Juni), II. sampling bulan basah (Nopember)

Hasil plot pH terhadap waktu diperoleh koefisien korelasi $r=0,48$, artinya pH air sumur pada daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi belum dapat dikatakan dipengaruhi oleh pH air hujan. Hal ini dapat disebabkan oleh dua hal, pertama pada daerah yang jarang mengalami hujan asam memiliki kesempatan melakukan penetralan keasaman air hujan oleh tanah yang lebih baik karena waktu yang tersedia untuk penetralan cukup lama dibandingkan pada daerah yang terus-menerus mengalami hujan asam intensitas tinggi, dan kedua, input asam dari atmosfer (nitrat dan sulfat) sedikit tidak sebanyak di daerah yang hujan asamnya intensitas tinggi, nilai ANC tinggi, maka keasaman air hujan tidak berkorelasi kuat dengan keasaman air sumur.

Daerah yang sering mengalami intensitas hujan asam tinggi memiliki hubungan yang cukup kuat antara perubahan keasaman air hujan terhadap perubahan keasaman air sumur. Plot antara keasaman air hujan dan air sumur pada daerah yang sering mengalami hujan asam intensitas tinggi di wilayah industri Cibinong-Citeureup Kabupaten Bogor menghasilkan kurva yang menggambarkan hubungan antara perubahan keasaman air sumur dengan keasaman air hujan. Hubungan antara tingkat keasaman air hujan dan air sumur berbanding langsung. Ketergantungan pH air sumur terhadap pH air hujan mengikuti persamaan $pH_{as} = 2,39e^{0,128(pH_{ah})}$ dengan $R^2 = 0,46$ atau $r = 0,68$. Meskipun hubungan antara pH air sumur dengan air hujan belum terlalu kuat namun ada faktor lain yang berpengaruh terhadap keasaman air sumur selain keasaman air hujan, misalnya hidrolisis ion aluminium dalam air sumur. Kadar Al dalam air sumur rata-rata $0,806 \text{ mg L}^{-1}$ (Lampiran 10). Ion aluminium terhidrolisis menghasilkan ion H^+ yang dapat mengasamkan air sumur, berdasarkan reaksi: $Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$.

Pada daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi hubungan

antara pH air sumur dengan pH air hujan lemah $r=0,48$. Hal ini dapat disebabkan input asam dari air hujan rendah, nilai ANC cukup tinggi dan sehingga memiliki sifat *buffer* lebih baik dari tanah pada daerah hujan asam tinggi terus menerus.

Kesimpulan

Hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa pada daerah yang secara terus menerus mengalami hujan asam intensitas tinggi, keasaman air hujan terus meningkat mencapai rata-rata pH 4,40 pada tahun 2009. Keasaman air sumur cenderung meningkat mencapai rata-rata pH 4,60. Tingkat keasaman air sumur berbanding langsung dengan tingkat keasaman air hujan dengan hubungan yang tidak terlalu kuat ($r=0,68$). Persamaan laju pengasaman menurut reaksi order pertama dengan nilai konstanta laju, $k=0,004 \text{ tahun}^{-1}$. Pada daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi pH air sumur tidak tergantung kepada pH air hujan ($r=0,48$).

Ucapan Terimakasih. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Departemen Pendidikan Nasional melalui DP2M Dikti atas hibah dana penelitian Fundamental multi tahun, 2008-2009, yang diberikan untuk pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [APHA]. American Public Health Association, 2005. Standart Methods For the Examination of Water and Waste Water. Washington DC.
- [BPS]. Biro Pusat Statistik Kabupaten Bogor. 2000. *Kabupaten Bogor dalam Angka*.
- [BPS]. Biro Pusat Statistik Kabupaten Bogor. 2010. *Kabupaten Bogor dalam Angka*.

- [BLH]. Badan Lingkungan Hidup. 2009. Laporan kegiatan unit pelaksana teknis laboratorium lingkungan tahun 2009. Badan Lingkungan Hidup Kabupaten Bogor.
- Budiwati T, Sri KP, Tuti M HW, Pariyatmo M, Mulyono. 2006. *Karakteristik Kimia Air Hujan di Pulau Jawa*. LAPAN. www.dirgantara-lapan.or.id/index.php: [27 Juli 2009].
- Chapman PJ, Reynolds B, Wheeler HS. 1995. The seasonal variation in soil water acid neutralizing capacity in peaty podzols in Mid-Wales. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 1089-1094.
- Diapari D. 2009. Dampak Pencemaran Timbal (Pb) Akibat Hujan Asam Terhadap Produksi Ternak Domba Lokal Jantan. *Disertasi*. Sekolah Pascasarjana, IPB. Bogor.
- [DTRLH]. Dinas Tata Ruang dan Lingkungan Hidup Kabupaten Bogor. 2009. Laboran Kerja tahun 2009. Dinas Tata Ruang dan Lingkungan Hidup Kabupaten Bogor.
- [Eanet]. East Asean Network. 2009. Acid Deposition Monitoring in East Asia, Data report. <http://www.eanet.cc/product/datarep/datarep07/datarep2009>. [2 Maret 2009].
- Hruska J, Pavel K, 2003. Modelling long term changes in streamwater and soil chemistry in catchments with contrasting vulnerability to acidification. *Hydrology and Earth System Sciences* 7: 525-539.
- Iryani A. 2002. Pengaruh pencemaran udara terhadap kualitas air sumur penduduk (studi kasus air sumur penduduk wilayah industri Cibinong-Citeureup, kab. Bogor, Jawa Barat), *Tesis*, UI, Jakarta.
- Komala O, Sutanto, Ani I, Eka H. 1999. Pemeriksaan kualitas air sumur penduduk di wilayah kompleks industri Citeureup-Bogor, ditinjau dari aspek fisika, kimia dan biologi, *J. hasil penelitian*, LPP, Univ. Pakuan, Bogor.
- Rose KA, Cook EB, Brenkert AL, Gardner RH, Hettelingh JP. 1991. Systematic Comparison of ILWAS, MAGIC, and ETD. Watershed Acidification Models. 1. Mapping Among Model Inputs and Deterministic Results, *Water Resources Research* 27:2577-2589.
- Sloot van der, van Zomeren A, Seignette P, Comans RNJ, Dijkstra JJ, Meeussert H, Kosson DS, Hjelmar O. 2003. Evaluation of environmental aspects of alternative material using an integrated approach assisted by a database/expert system. *Advances in Waste Management and Recycling, September 2003*, Dundee.
- Sutanto, Ani I, Yusnira. 2002. Profil hujan asam di wilayah industri Citeureup-Cibinong Bogor, *Ekologia* 2 (2):1-6.
- Sutanto, Latifah K Darusman, Syaiful Anwar, Tania June, 2009, Distribusi Spasial Hujan Asam di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Bogor, *Jendela Kota* 2 (5):12-22.