

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

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 pHmeter 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. Jumlah keluarga yang berlangganan air PDAM hanya mencapai 11,96 % , dan sebanyak 88,04 % penduduk mengkonsumsi air tanah/air sumur, mata air, dan air sungai, yang menggunakan air sumur mencapai 75,63 % (BPS Kabupaten Bogor, 2010). Data tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar keluarga mengandalkan air tanah/air sumur sebagai sumber air untuk

keperluan sehari-hari termasuk untuk kebutuhan air minum.

Kebutuhan air domestik sebuah rumah tangga dapat mencapai 60 liter per hari per orang. Air sumur sebagai sebagai sumber air minum harus memenuhi kualitas air minum sesuai PerMenKES No. 492/MENKES/PER/IV/2010. Tiga syarat yang harus dipenuhi yaitu parameter fisik, kimia, dan parameter biologi. Secara fisik, air bersih adalah jernih, tidak berbau, dan tidak berasa, suhu normal dibawah suhu udara ambien. Secara kimia kandungan konstituen kimia air minum harus dibawah nilai baku mutu yang telah ditetapkan, khusus untuk keasaman (pH) berada pada kisaran antara 6,5-8,5.

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.

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.

Studi kasus hujan asam di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Bogor menunjukkan bahwa hujan asam terjadi dengan intensitas tinggi yaitu mencapai pH 4,7 terkonsentrasi pada daerah sekitar pusat industri dengan radius beberapa km. Intensitas hujan asam semakin menurun dengan semakin jauh jarak dari pusat industri sampai radius 10 km dan kembali normal (pH>5,6) pada jarak >20 km (Sutanto *et al.*, 2002). Sebanyak 24 sumur penduduk yang terdistribusi di wilayah industri Citeureup-Cibinong Kabupaten Bogor pada tahun 1995 memiliki rata-rata pH 5,09 dengan kisaran 3,99–7,15 (Komala *et al.*, 1999). Pada tahun 2000 air sumur penduduk memiliki rata-rata pH 4,63 dengan konsentrasi nitrat 0,25 ppm dan sulfat 4,85 ppm (Sutanto *et al.*, 2000), dan pada tahun 2001 terukur rata-rata pH 4,11 dengan kadar nitrat 6,19 ppm dan sulfat 5,44 ppm (Iryani, 2002). Perubahan penurunan kualitas air sumur di wilayah ini yaitu kecenderungan turunnya nilai pH dan kemungkinan meningkatnya kadar nitrat, sulfat dan logam dalam air sumur dimungkinkan akibat hujan asam yang tinggi terjadi di wilayah ini.

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

Waktu dan Tempat Penelitian.

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.

Alat dan Bahan

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.

Cara Kerja

Sesuai dengan tujuan penelitian, metoda penelitian diuraikan terpisah masing-masing untuk menjawab setiap tujuan khusus penelitian. Masing-masing metoda dijabarkan sebagai berikut:

a. Penelitian Pendahuluan

Dua penelitian pendahuluan dilakukan, pertama: simulasi pengaruh keasaman air hujan dan pengaruhnya terhadap keasaman air sumur menggunakan kolom lindi, dan penelitian pendahuluan kedua: Pengaruh temporal harian terhadap keasaman air sumur. Kolom pelindian dibuat dari paralon Ø 3 inci tinggi 130 cm. Kolom diisi dengan tanah dari wilayah penelitian. Pengisian kolom dengan tanah dilakukan dengan metoda *undisturb*: kolom dimasukkan kedalam tanah perlahan dengan dipandu alat potong tanah sehingga tanah mengisi kolom tanpa ada kerusakan struktur tanah. Kolom selanjutnya dibawa ke laboratorium dan dialiri air hujan buatan dengan keasaman berturut-turut: pH 4,5; 4,0; dan 3,5 dengan metoda askending. Pada setiap pH air hujan

buatan air yang keluar dari kolom (air lindi) disampling dan diukur pH nya pada liter ke 5, 10, 15, dan 20. Data hasil pengukuran di plot untuk melihat kecenderungan perubahan pH air lindi akibat perubahan keasaman air hujan buatan dan dicari pH air lindi pada liter ke 50 (rasio L/S=10) demikian juga untuk setiap pH air hujan buatan yang disimulasikan. Selanjutnya pH air lindi pada liter ke 50 diplot terhadap pH air hujan buatan untuk melihat kecenderungan perubahan pH air lindi akibat perubahan pH air hujan buatan.

Percobaan pendahuluan kedua bertujuan untuk melihat pengaruh temporal harian terhadap pH air sumur. Disampling 5 sumur di lokasi yang berbeda pada jam 8, 10, 11, 13, 16, dan 19 dan diukur pH secara langsung. Data pH diolah secara statistik sederhana untuk mencari besarnya variasi data dengan menghitung simpangan baku standar dan relatif simpangan baku standar (% RSD) guna mengevaluasi apakah variasi data cukup berarti. Variasi data dianggap berarti apabila nilai % RSD >3 %.

b. Pelaksanaan Penelitian

b.1. Evaluasi dan Monitoring Hujan asam Metoda Pengambilan Data.

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.

Parameter yang Dianalisis. 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.

Metoda Analisis Data. 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.

b.2. Menentukan Korelasi Keasaman Air Hujan dengan Keasaman Air Sumur

Hasil analisis parameter fisika dan kimia air sumur dan air hujan masing-masing di kelompokkan sehingga diperoleh data series dari tahun 1999, 2001, 2006, 2008, dan 2009. Setiap data series setiap parameter dibuat plot antara parameter air sumur vs parameter air hujan pada 5 tahun pengamatan (dalam kurun waktu 11 tahun) dengan menggunakan bantuan program komputer *excel/minitab* baik untuk mendapatkan persamaan matematik kurva, nilai korelasi, dan visualisasi grafik. Interpretasi korelasi didasarkan pada koefisien korelasi. Korelasi dianggap baik jika nilai koefisien korelasi >0,7 dan yang dapat menyatakan bahwa kualitas air sumur benar-benar dipengaruhi oleh kualitas air hujan.

b.3. Menentukan Persamaan yang Menghubungkan antara Keasaman Air Hujan dan Air Sumur Metoda Pengambilan Data dan Pengukuran pH.

Sampling air sumur dilakukan dua tahap, tahap pertama dilakukan pada bulan-bulan kering antara bulan Juni sampai Agustus, dan tahap kedua dilakukan pada bulan-bulan basah antara bulan September sampai Januari. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah faktor pengenceran cukup berarti dalam perubahan kualitas air. Jumlah sumur yang disampling adalah sebanyak 16 buah tersebar secara acak pada berbagai desa di wilayah penelitian. Pengukuran pH air hujan dan air sumur dilakukan dengan metoda elektrometri menggunakan alat ukur pH elektronik (pHmeter). Alat dikalibrasi dengan larutan buffer pH 4, 7, dan 10 dengan mengatur seksama tombol kalibrasi, tombol slope dan kompensasi suhu. Kertas pH universal digunakan sebagai pengontrol/pembanding.

Nilai rata-rata pH air sumur pada wilayah penelitian dari tahun 1995 sampai 2009 diplot terhadap waktu dengan bantuan komputer program excel dan ditentukan

persamaan matematika sehingga diperoleh pola kecenderungan perubahan pH air sumur terhadap waktu.

b.4. Menentukan Laju Pengasaman Air Sumur

Laju pengasaman air sumur dicari dengan menggunakan model persamaan laju reaksi tingkat pertama :

$$\frac{dpH_{as}}{dt} = kpH_{ah}$$

Dengan asumsi keasaman air tanah merupakan akibat langsung dari keasaman air hujan, dan pengaruh keasaman tanah diabaikan terhadap keasaman air hujan. Persamaan tersebut diturunkan menjadi :

$$\ln pH_t = \ln pH_0 + kt$$

yang merupakan persamaan linier pangkat 1 yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai tetapan laju pengasaman air sumur, k, dengan metoda grafik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

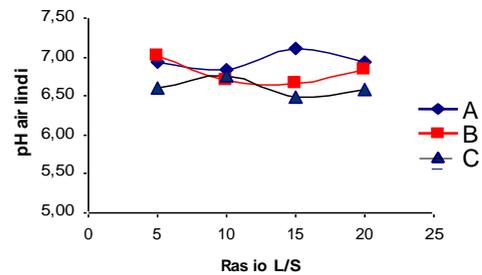
a. Hasil Penelitian Pendahuluan

a.1. Hasil Percobaan Kolom Pelindi

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}= 0,0585Ln(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 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 | | | L = volu me air huj n |
|-----------|--------------|-------------|-------------|---|
| | 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 | |

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 $pH_{al} = 1,3155 \ln(pH_{ah}) + 4,9765$ dan 99 % dapat dijelaskan ($R^2 = 0,99$).

a.2. 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 %

b. Hasil Penelitian Utama

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.

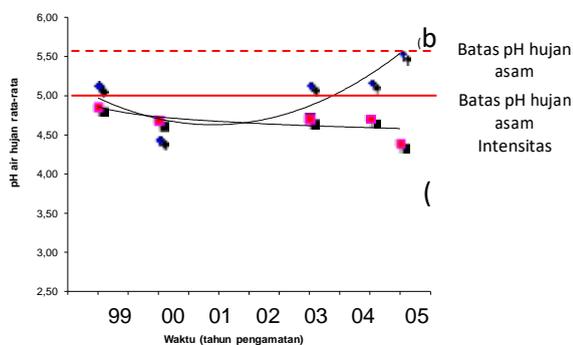
b.1. Evaluasi dan Monitoring Hujan Asam dan Keasaman Air Sumur

b.1.1. Hujan Asam di Wilayah Penelitian

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 ($P=0,315$). 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. 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.

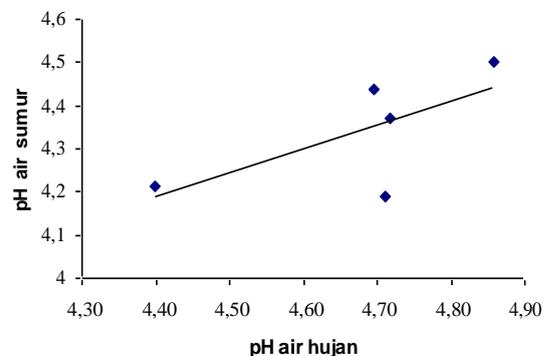
b.1.2. Keasaman Air Sumur

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 $\text{pH} = 3,46$ 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 $\text{pH} < 5,0$. 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.

Daerah-daerah yang jarang mengalami hujan asam intensitas tinggi di wilayah penelitian teridentifikasi dari hasil pemetaan hujan asam. 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.

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

| Lokasi sampling | Nilai pH terukur | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1999 | 2001 | 2006 | 2008 (I) | 2008 (II) | 2009 (I) | 2009 (II) |
| Griya Rukir Iava | - | - | 5,34 | 4,44 | 5,6 | 5,43 | 5,60 |
| Kranggan, | 4,0 | 4,32 | 4,10 | 5,64 | 4,77 | 4,42 | 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.

b.3. Hubungan Matematis Antara pH Air Sumur Dengan pH Air Hujan

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 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 ($r=0,48$).

DAFTAR PUSTAKA

- [APHA]. American Public Health Association, 2005. Standart Methods For the Examination of Water and Waste Water. Washington DC.
- [BLH]. Badan Lingkungan Hidup. 2009. Laporan kegiatan unit pelaksana teknis laboratorium lingkungan tahun 2009. Badan Lingkungan Hidup Kabupaten Bogor.

- [BPS Kabupaten Bogor]. Biro Pusat Statistik Kabupaten Bogor. 2000. *Kabupaten Bogor dalam Angka*
- [BPS Kabupaten Bogor]. Biro Pusat Statistik Kabupaten Bogor. 2010. *Kabupaten Bogor dalam Angka*.
- [DTRLH]. Dinas Tata Ruang dan Lingkungan Hidup. 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/data rep/datarep07/datarep2009>. [2 Maret 2009].
- 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, Wheater 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.
- 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, Meeussen 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.