

VARIABILITAS KOEFISIEN PENCUCIAN DARI SULFAT, NITRAT, AMONIUM DAN SODIUM AEROSOL DI KOTOTABANG DAN JAKARTA

Tuti Budiwati , Wlwiek Setyawati ^{*)}, Tuti Mulyani HW ^{**)}, Asri Indrawati ^{*)}

^{*)} Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer Dan Iklim-LAPAN

^{**)} Badan Meteorologi Dan Geofisika

e-mail; tuti_lapan@yahoo.com

ABSTRACT

The increase of SO₂ and NO₂ concentrations will influence wet deposition through atmospheric cleaning process. Wet scavenging coefficient is coefficient number that shows magnitude of atmospheric cleaning or washing process of pollutants by rainrate. The method used to get wet scavenging coefficient is Bulk Method (BM). Dominant elements in aerosol and wet deposition such as sulphate, nitrate, ammonium and sodium are assessed for Jakarta (2005-2006) and Kototabang (2005-2006). Data used are taken from observations of BMG (Meteorology and Geophysics Agency) and LAPAN (National Institute of Aeronautics and Space). Jakarta as a high polluted coastal city and Kototabang as a relatively clean rural area are interesting locations to study. It is found that scavenging coefficient is around scale of 10⁵-10⁷. Correlation numbers between rainrate and scavenging coefficients of sulphate, nitrate, ammonium and sodium vary significantly. In the other hand rainfall amount does not influence scavenging coefficient. Scavenging coefficient average values of SO₄²⁻; NO₃⁻; NH₄⁺ and Na⁺ from 2005-2006 in Jakarta are 8.31x10⁶; 7.31x10⁶; 4.43x10⁶; 7.32x10⁶, respectively. These values are higher than in Kototabang which are 2.65x10⁶ and 3.64x10⁶ for SO₄²⁻ and NH₄⁺, respectively. Nevertheless scavenging coefficient average values of NO₃⁻ and Na⁺ are lower than in Kototabang which are 1.66x10⁷ and 1.64x10⁷, respectively although they have almost similar magnitude i.e. around 10⁶-10⁷.

ABSTRAK

Kenaikan SO₂ dan NO₂ akan berdampak terhadap deposisi basah (*wet deposition*) melalui proses pembersihan di atmosfer. Koefisien pencucian (*scavenging*) merupakan angka koefisien yang menunjukkan besaran dalam proses pencucian atau pembersihan oleh laju curah hujan. Metode yang dipergunakan untuk mendapatkan koefisien pencucian adalah metode Bulk. Unsur-unsur yang dominan dalam aerosol dan deposisi basah seperti sulfat, nitrat, amonium dan sodium/natrium dikaji untuk Jakarta (2005-2006) dan Kototabang (2005-2006). Data yang digunakan berasal dari observasi BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika) dan LAPAN (Lembaga Penerbangan dan

Antariksa Nasional). Jakarta sebagai kota pantai dengan polusi yang tinggi dan Kototabang adalah daerah pedesaan yang relatif bersih merupakan lokasi penelitian yang menarik untuk dibandingkan. Besaran koefisien pencucian berada dalam skala 10^5 - 10^7 . Nilai korelasi antara laju curah hujan dengan koefisien pencucian sulfat, nitrat, amonium dan sodium sangat berbeda, sedangkan jumlah curah hujan tidak mempengaruhi koefisien pencucian. Nilai rata-rata koefisien pencucian SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ dan Na^+ dari 2005 sampai 2006 di Jakarta adalah $8,31 \times 10^6$; $7,31 \times 10^6$; $4,43 \times 10^6$; $7,32 \times 10^6$. Nilai-nilai ini lebih tinggi di Kototabang untuk SO_4^{2-} dan NH_4^+ adalah $2,65 \times 10^6$ dan $3,64 \times 10^6$. Sebaliknya NO_3^- dan Na^+ di Jakarta adalah lebih rendah dibandingkan Kototabang yaitu $1,66 \times 10^7$ dan $1,64 \times 10^7$, meskipun besarnya adalah hampir sama yaitu dalam kisaran 10^6 - 10^7 .

Kata kunci: Jakarta, Kototabang, Laju curah hujan, Koefisien pencucian, Deposisi basah

1 PENDAHULUAN

Permasalahan peningkatan SO_2 , NO_2 dan aerosol di atmosfer karena peningkatan aktivitas antropogenik atau dari sumber alam akan berdampak terhadap terjadinya hujan asam. Oleh karena itu proses pembersihan di atmosfer melalui deposisi basah (*wet deposition*) adalah menarik untuk dikaji. Untuk memahami proses pembersihan di atmosfer berarti memahami peristiwa berpindahannya gas-gas dan aerosol ke permukaan bumi atau proses *wet removal* atau *scavenging*. Proses pembersihan gas-gas atau aerosol di atmosfer melalui proses dalam awan dan proses pencucian hujan. Proses pembersihan basah (*wet removal*) aerosol atmosfer oleh hujan adalah benar-benar pencucian paling efisien dari aerosol. Proses ini dapat dijelaskan dengan *wet scavenging coefficient* (WSC) (Andronache, 2004) yaitu koefisien pembersihan basah atmosfer oleh hujan, yang menjelaskan pentingnya pemahaman polusi aerosol dan implikasinya pada berbagai skala. Penelitian proses pembersihan basah memberikan pemahaman dari kondisi aerosol atmosfer (Okita et al., 1996), selain dari gas-gas SO_2 dan NO_2 . Komponen atau senyawa kimia yang dominan dalam *wet deposition* maupun aerosol adalah sulfat, nitrat dan amonium. Selain itu, proses pencucian ini tentunya erat kaitannya dengan kecepatan curah hujan, efisiensi tumbukan antara butir-butir hujan dan partikel-partikel aerosol (Andronache, 2004).

Kototabang sebagai daerah monitoring global atmosfer di Indonesia (Global Atmospheric Watch-GAW) dengan fenomena klimatologi yang spesifik sangat menarik untuk dikaji. Menurut Satiadi et al. (2004) tutupan awan di atas Kototabang biasanya meningkat antara jam 12.00 – 19.00 sama dengan curah hujan yang meningkat setelah jam 12.00 waktu lokal. Profil curah hujan maksimum terjadi pada bulan November dan April. Pola curah hujan di Kototabang adalah jenis ekuator (Tjasjono, 1999) yaitu mempunyai dua puncak.

Kota Jakarta sebagai kota pantai dan metropolitan, tentunya mendapat pengaruh aerosol laut dan gas-gas buang yang melimpah dari transportasi dan industri. Kajian terhadap kota Jakarta sangat menarik ditinjau dari segi kota terpolusi di Indonesia (World Bank, 1995). Pengaruh curah hujan atau kecepatan curah hujan pada proses pembersihan atmosfer di Jakarta tentunya menarik juga untuk dikaji, mengingat Jakarta mempunyai pola curah hujan jenis monsun (Tjasjono, 1999).

2 DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN

Berdasarkan penelitian Savoie (1987) di Florida dan Amerika Samoa bahwa proses pencucian aerosol atmosfer oleh air hujan akan menghasilkan pengendapan basah yang tentunya berpengaruh dalam kimia air hujan. Pengendapan atau deposisi basah (*wet deposition*) ini dapat dihitung secara langsung dari konsentrasi konstituen dalam air hujan dengan jumlah curah hujan yaitu konsentrasi konstituen dalam air hujan dikalikan jumlah curah hujan (Barrie, 1985). Tetapi pendekatan perhitungan data konstituen pengendapan basah ini bisa dihitung dengan menggunakan ratio pencucian bila data konstituen aerosol diketahui (Barrie, 1985), yaitu dengan didapatkannya konsentrasi konstituen dalam air hujan dari ratio pencucian kali konstituen aerosol. Pencucian basah gas-gas dan partikel-partikel dari atmosfer disebabkan oleh awan dan hujan. Proses dalam awan disebut *wash-out* dan di bawah awan disebut *rain-out* (Arya, 1999). Proses pencucian diasumsikan bahwa pengendapan basah suatu konstituen yang ada di air hujan dibandingkan dengan konstituen partikel-partikel atmosfer di dekat permukaan, dan pencucian di bawah awan dianggap kecil. Menurut Meszaros (1981) perbandingan *wash-out* dan *rain-out* adalah 75% dan 25 %.

Proses pencucian aerosol atmosfer oleh air hujan adalah perpindahan aerosol dari atmosfer ke permukaan bumi. Selanjutnya akan dicari suatu nilai *wet scavenging coefficient* (L) atau koefisien pencucian basah dengan metode Bulk (BM) (Andronache, 2004) yaitu:

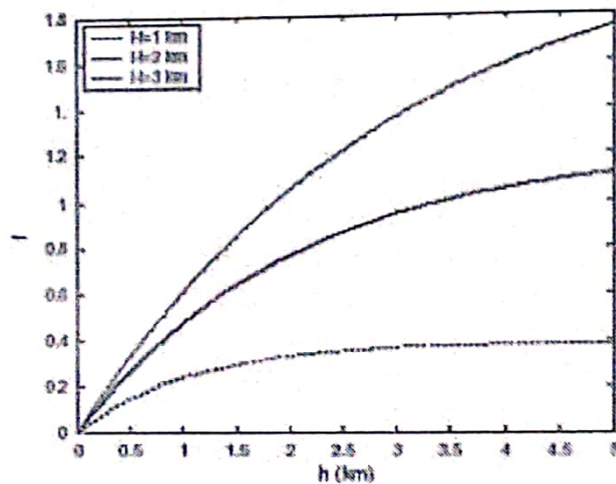
$$L = C_w \cdot R / C_a(0) \cdot f \quad (2-1)$$

Keterangan:

- L = koefisien pencucian (jam^{-1}),
- C_w = konsentrasi konstituen dalam air hujan (mg/l),
- R = laju curah hujan (mm jam^{-1}),
- $C_a(0)$ = konsentrasi konstituen dalam aerosol di permukaan (mg/l),
- f = faktor yang tergantung karakteristik tinggi dasar awan (h_1), tinggi puncak awan (h_2) dan skala tertinggi konsentrasi aerosol (H)

$$f = H \exp\left(\frac{h_1}{H}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{h_2}{H}\right)\right] \quad (2-2)$$

Dengan $h = h_2 - h_1$, atau dengan mengasumsikan tebal awan yang aktif dalam proses pencucian (*scavenging*) $h = 1$ km (Andronache, 2004) dan skala tertinggi konsentrasi aerosol (H) adalah 2 km di Jakarta (Pinandito et al., 2000), maka berdasarkan Gambar 2-1 dalam paper Andronache (2004) didapatkan nilai f adalah 0,48. Jadi koefisien scavenging (L) dapat dihitung berdasarkan persamaan 2-1.



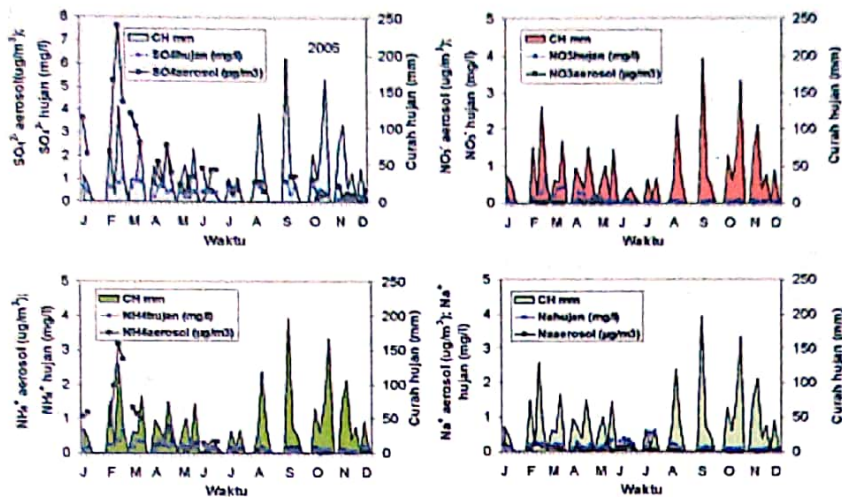
Gambar 2-1: Faktor f versus ketinggian (h) lapisan awan yang aktif dalam pencucian aerosol oleh hujan. H adalah skala tinggi aerosol di udara (Andronache, 2004)

Lingkup kegiatan penelitian meliputi data kimia air hujan (deposisi basah), kimia aerosol, laju curah hujan (*rain rate*), curah hujan di Kototabang dan Jakarta selama 2005-2006 yang dikumpulkan oleh BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika). Sedang data laju curah hujan di Kototabang berasal dari pengukuran ORG-815 Optical Precipitation Gauge dari Stasiun LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

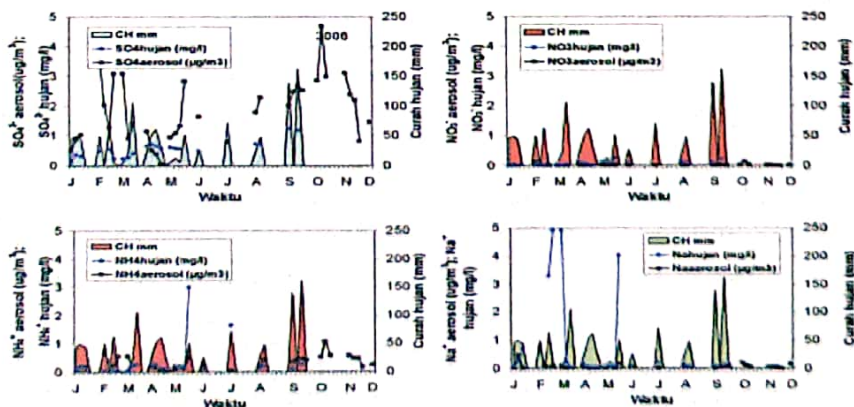
3.1 Variasi Kimia Aerosol dan Hujan

Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Kototabang pada tahun 2005 diperlihatkan dalam Gambar 3-1a. Konsentrasi SO_4^{2-} (sulfat) dan NH_4^+ (amonium) sebagai unsur anion (asam) dan kation (basa) terlihat mendominasi aerosol dan deposisi basah dalam air hujan dibandingkan unsur lainnya seperti NO_3^- (nitrat) dan Na^+ (natrium). Konsentrasi SO_4^{2-} , NH_4^+ dan NO_3^- terlihat tinggi pada Januari sampai Juni 2005 baik dalam aerosol maupun deposisi basah. Variasi SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- dan Na^+ dalam aerosol tahun 2005 adalah $0,140\text{-}7,634 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $0,023\text{-}3,174 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $0,004\text{-}0,078 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $0,008\text{-}0,216 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Adapun variasi konsentrasi SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- dan Na^+ dalam air hujan tahun 2005 adalah $0,075\text{-}1,038 \text{ mg}/\text{l}$; $0,001\text{-}0,642 \text{ mg}/\text{l}$;



Gambar 3-1a: Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Kototabang pada tahun 2005

0,016-0,593 mg/l dan 0,006-0,538 mg/l. Kebakaran hutan pada tanggal 15, dan 17 Juni 2004 yang terekam oleh sensor MODIS (*the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers*) dari satelit Aqua NASA memperlihatkan kawasan kebakaran di Sumatera, terlihat titik-titik api terbanyak di Riau (Budiwati, 2007). Kejadian kebakaran hutan pada musim kemarau dari Juni sampai Oktober 2004 di Kalimantan Selatan, Kalimantan Tengah dan Sumatera (Riau sampai Sumatera Selatan) akan menyebabkan tingginya konsentrasi aerosol. Musim kering angin bertiup dari timur dan tenggara (Gregor and Nieuwolt, 1998), dampaknya akan membawa polutan yang mempengaruhi wilayah (lokasi pemantauan) di bagian barat dan barat laut seperti Kototabang. Dari data yang dikeluarkan Direktorat Jenderal Perlindungan Hutan dan Konservasi Alam (Ditjen PHKA) dari tahun 2001 sampai 2005 rata-rata titik panas yang muncul setiap tahunnya mencapai 48 ribu titik. Titik tertinggi terjadi pada tahun 2002 yang mencapai 83 ribu. Angka ini menurun pada tahun 2005 menjadi 39 ribu titik (Herlianto, 2006).



Gambar 3-1b: Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Kototabang pada tahun 2006

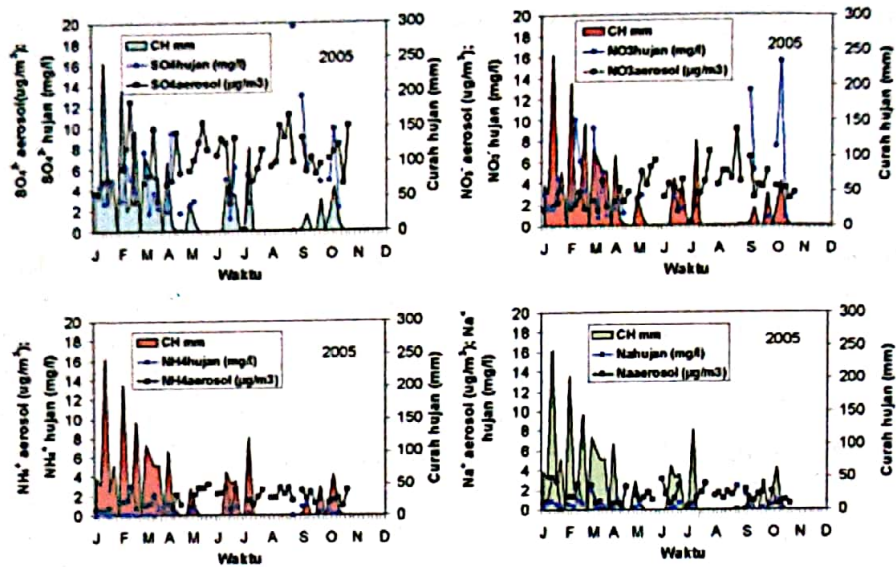
Dampak dari kebakaran hutan adalah turunnya jarak pandang dan meningkatnya gas-gas hasil pembakaran *biomass* seperti CO₂, CO, NH₃, NO_x, CH₄, CH₃Cl, hidrokarbon lainnya dan aerosol ke udara. Peningkatan gas-gas dan aerosol ini akan mengalami reaksi kimia di atmosfer untuk membentuk ozon dan hujan asam. Konsentrasi Na⁺ dalam air hujan terlihat meningkat pada musim kemarau, peningkatan ini signifikan dengan penguapan laut yang tinggi di musim kemarau. Jadi ada kemungkinan partikel-partikel laut Na⁺ berasal dari laut di sebelah barat Sumatera yaitu laut Hindia.

Gambar 3-1b memperlihatkan variasi mingguan konsentrasi sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Kototabang pada tahun 2006. Kondisi konsentrasi SO₄²⁻ (sulfat) dan NH₄⁺ (amonium) terlihat mendominasi deposisi basah dalam air hujan dan aerosol dibandingkan unsur lainnya seperti NO₃⁻ dan Na⁺ (natrium/sodium). Karakteristik kimia aerosol dan air hujan tahun 2005 mirip dengan tahun 2006. Konsentrasi SO₄²⁻ (sulfat), NO₃⁻ dan Na⁺ terlihat tinggi pada 2006 dibandingkan tahun 2005 baik dalam aerosol maupun deposisi basah dalam air hujan, kecuali NH₄⁺. Konsentrasi SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ dan Na⁺ dalam aerosol bervariasi sebagai berikut 0,344-4,666 µg/m³; 0,091-1,074 µg/m³; 0,003-0,128 µg/m³ dan 0,016-0,787 µg/m³. Dan konsentrasi SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ dan Na⁺ dalam air hujan bervariasi sebagai berikut 0,111-1,262 mg/l; 0,061-3,003 mg/l; 0,001-3,538 mg/l dan 0,040-5,787 mg/l. Kejadian kebakaran hutan pada musim kemarau pada tahun 2006 di Kalimantan Selatan, Kalimantan Tengah dan Sumatera (Riau sampai Sumatera Selatan) cukup parah dan akan menyebabkan tingginya konsentrasi aerosol. Asap pada bulan April sempat mengancam negara tetangga, Malaysia dan Singapura, karena angin berhembus ke arah Selat Malaka. Riau kembali diselimuti asap pada pertengahan Juli. Pembakaran kembali marak bersamaan dengan datangnya musim kemarau. Kebakaran mulai terjadi lagi di provinsi tetangga, seperti Jambi, Sumsel, dan Sumbar. Di Sumsel, selama bulan Juli 2006 terpantau 323 titik panas oleh satelit *National Oceanic Atmospheric Administration*

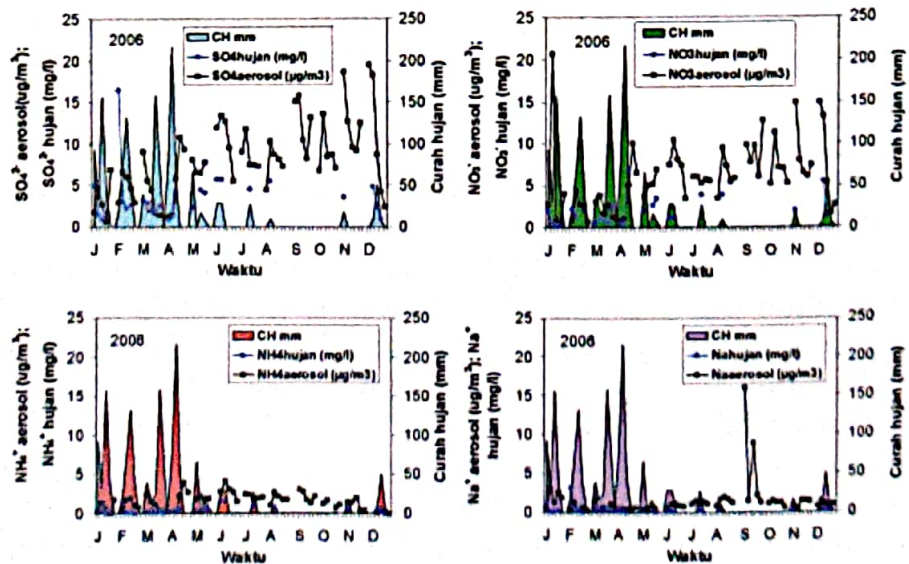
(NOAA). Sampai bulan November 2006, kebakaran hutan terjadi di Sumatera Selatan (Ministry of Environment-Indonesia (KLH), 2007). Musim kemarau, bulan Juli-Agustus 2006 merupakan saat titik api (hot-spot) tumbuh bak jamur di musim hujan. Pantauan yang dilakukan satelit NOAA, satelit cuaca milik Departemen Perdagangan Amerika Serikat yang dioperasikan oleh *National Oceanic Atmospheric Agency* (NOAA), dari tanggal 1-28 Agustus 2006 memperlihatkan di Sumatera telah muncul 11.183 titik api sedangkan di Kalimantan jumlahnya hampir dua kali lipat, yaitu 22.036 titik. Kedua pulau itu selalu menjadi yang paling banyak titik-titik kebakaran hutannya. Tahun 2006 hutan yang terbakar di Sumatera dan Kalimantan diperkirakan sudah mencapai 52 ribu hektar (Herlianto, 2006). Arah angin yang melintasi Sumatera dan Kalimantan pada bulan Agustus sampai Oktober 2006 berasal dari arah tenggara (*Ministry of Environment-Indonesia* (KLH), 2007) dan menyebabkan asap yang bersumber dari kebakaran hutan dari Sumatera Selatan atau Kalimantan akan mengarah ke Kototabang.

Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Jakarta pada tahun 2005 diperlihatkan pada Gambar 3-1c. Pada tahun 2005, variasi mingguan konsentrasi dari sulfat dan nitrat aerosol berada dalam kisaran 0,188-12,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 0,293-9,098 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan konsentrasi amonium dan natrium dalam aerosol adalah 0,436-3,248 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan 0,111-3,242 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi dari sulfat dan nitrat dalam air hujan berada dalam kisaran 1,169-19,642 mg/l dan 0,659-15,517 mg/l, sedangkan konsentrasi amonium dan natrium dalam aerosol adalah 0,001-1,044 mg/l dan 0,063-2,317 mg/l. Konsentrasi aerosol maupun deposisi basah tinggi pada musim kemarau dibandingkan musim hujan. Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara deposisi basah dengan aerosol sebagai sumber polutan, maka dapat disimpulkan ada pengaruh aerosol pada musim kemarau terhadap deposisi basah. Pada musim kemarau angin berasal dari tenggara misalnya Cikampek dan Cibinong dan menyebabkan penyebaran polutan sampai Jakarta. Akibatnya terjadi peningkatan konsentrasi aerosol sebagai sumber deposisi basah. Konsentrasi sulfat dan nitrat dalam aerosol tinggi dibandingkan amonium dan natrium. Hal ini sesuai dengan peningkatan aerosol akibat kebakaran hutan akan menyumbangkan sulfat aerosol dan nitrat aerosol. Dampak yang dapat ditimbulkan adalah peningkatan konsentrasi sulfat dan nitrat dalam air hujan. Konsentrasi SO_4^{2-} (sulfat) dan NO_3^- sebagai unsur anion atau asam terlihat mendominasi aerosol dan deposisi basah dalam air hujan dibandingkan unsur kation atau basa seperti NH_4^+ (amonium) dan natrium. Konsentrasi SO_4^{2-} (sulfat), NO_3^- dan NH_4^+ terlihat tinggi pada musim kemarau (JJA) sampai peralihan kemarau ke hujan (SON) pada 2006 baik dalam

aerosol maupun deposisi basah. Konsentrasi Na^+ dalam aerosol (garis hitam) terlihat meningkat pada musim kemarau. Letak Jakarta di tepi laut maka diduga peningkatan ini ada kaitannya dengan penguapan laut yang tinggi di musim kemarau. Hasil penguapan laut akan menyumbangkan partikel-partikel laut Na , mengingat unsur ini murni berasal dari laut.



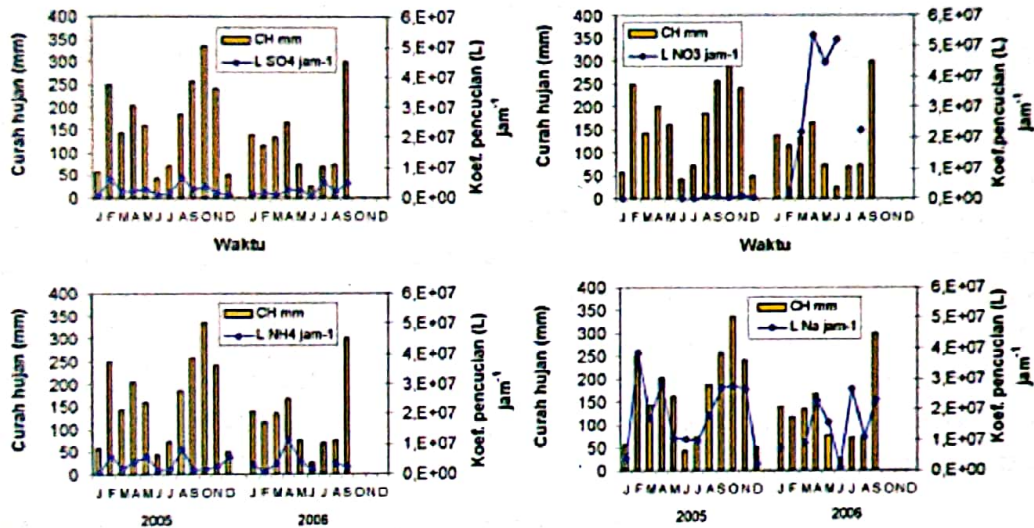
Gambar 3-1c: Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Jakarta pada tahun 2005



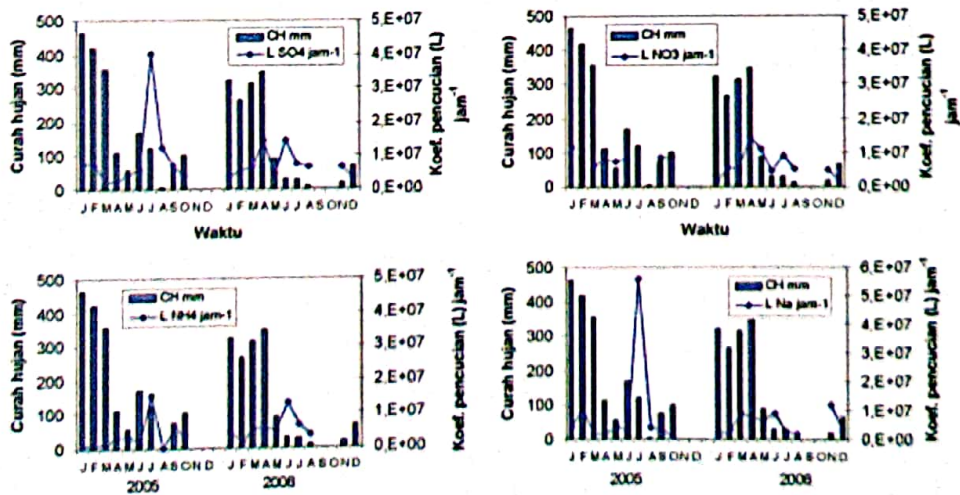
Gambar 3-1d: Variasi mingguan konsentrasi dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium dalam aerosol dan hujan di Jakarta pada tahun 2006

3.2 Koefisien Pencucian (Scavenging)

Gambar 3-2a memperlihatkan variasi bulanan koefisien pencucian (*scavenging*) dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium (sodium) dalam aerosol di Kototabang pada tahun 2005 dan 2006. Pola variasi bulanan koefisien pencucian terlihat mirip pola curah hujan jenis ekuator dengan dua puncak.



Gambar 3-2a: Variasi bulanan koefisien pencucian (*scavenging*) dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium di Kototabang pada tahun 2005 dan 2006



Gambar 3-2b: Variasi bulanan koefisien pencucian dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium (sodium) di Jakarta pada tahun 2005 dan 2006

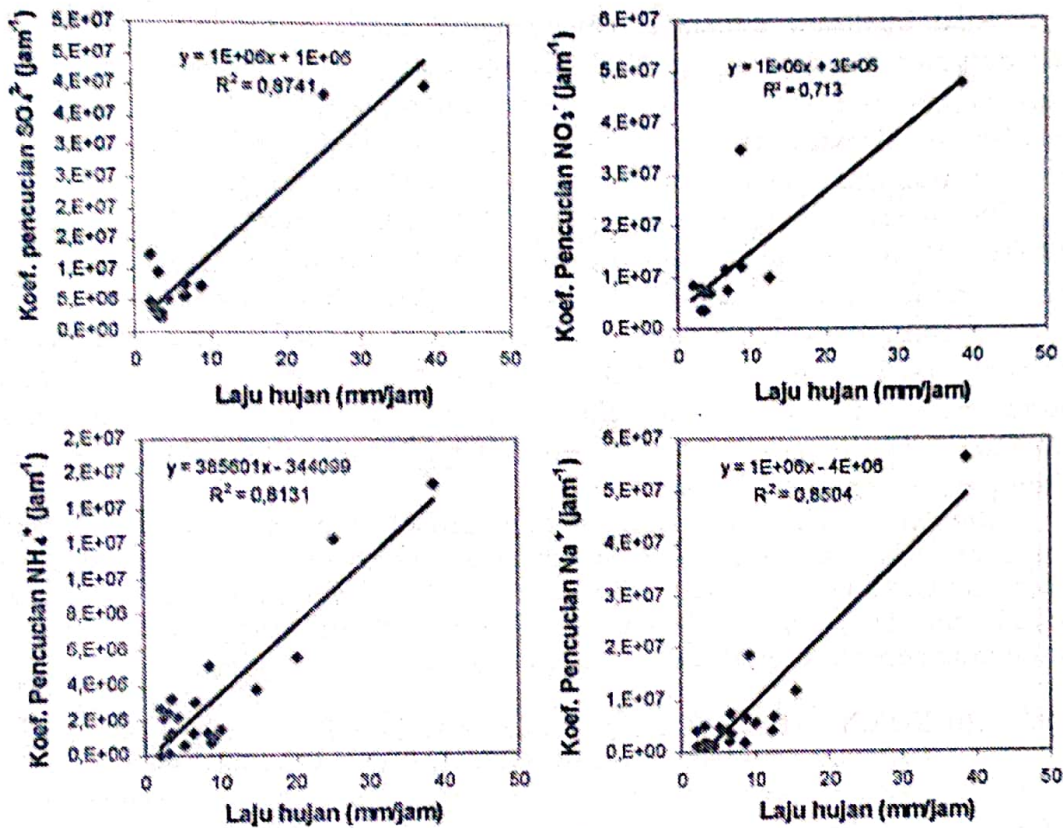
Pada musim basah NH_3 akan diserap oleh butir-butir awan, akibatnya akan menaikkan kecepatan oksidasi SO_2 oleh O_3 (Maahs, 1983). Hasilnya lebih banyak SO_2 yang diambil oleh butir-butir awan dan akan dioksidasi menjadi SO_4^{2-} (Asman dan Janssen, 1987).

Gambar 3-2b memperlihatkan variasi bulanan koefisien pencucian (*scavenging*) dari sulfat, nitrat, amonium dan natrium (sodium) dalam aerosol dan hujan di Jakarta pada tahun 2005 dan 2006. Pada musim penghujan koefisien pencucian lebih rendah dibandingkan musim kemarau, hal ini sangat dipengaruhi oleh besarnya laju hujan (Gambar 3-2d) juga konsentrasi polutan yang tinggi seperti aerosol di musim kemarau. Laju hujan pada Juli 2005 yang tinggi berakibat pada tingginya nilai koefisien pencucian (Gambar 3-2b).

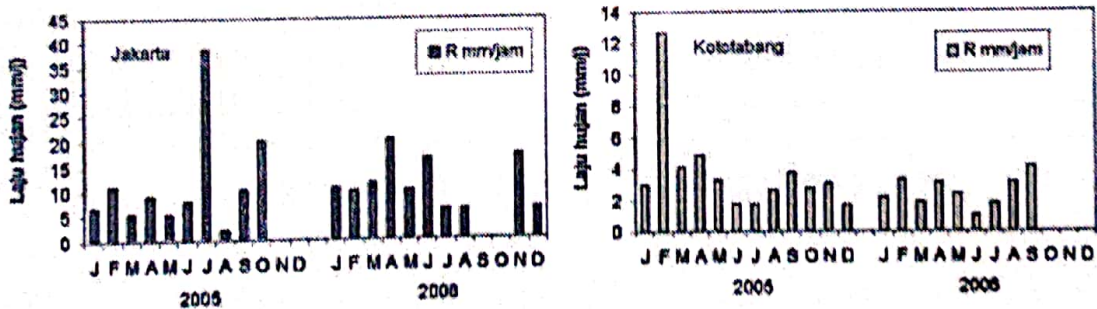
Berdasarkan hubungan antara koefisien pencucian (*scavenging*) versus laju curah hujan seperti terlihat dalam Gambar 3-2c, didapatkan korelasi yang bagus antara keduanya dengan nilai korelasi > 60%. Koefisien korelasi antara laju curah hujan dengan sulfat, nitrat, amonium dan sodium (natrium) di Jakarta dan Kototabang pada tahun 2005 dan 2006 tercantum dalam Tabel 3-1. Laju curah hujan yang tinggi akan menghasilkan koefisien pencucian yang tinggi.

Tabel 3-1: KORELASI ANTARA SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ Dan Na^+ DENGAN LAJU CURAH HUJAN DI JAKARTA DAN KOTOTABANG

Lokasi	Tahun	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Na^+
		%	%	%	%
Jakarta (urban)	2005	93	84	90	92
	2006	65	84	71	68
Kototabang (remote)	2005	88	67	77	77
	2006	71	68	67	81



Gambar 3-2c: Hubungan antara koefisien pencucian (*scavenging*) dalam jam⁻¹ versus laju curah hujan dalam mm/j di Jakarta pada tahun 2005



Gambar 3-2d: Laju curah hujan (R) dalam mm/jam di Jakarta dan Kototabang pada tahun 2005 dan 2006

Profil laju curah hujan Jakarta berfluktuasi selama 2005 sampai 2006. Hal ini berbeda dibandingkan dengan Kototabang yang mempunyai dua puncak pada kedua musim peralihan (Gambar 3-2d) pada tahun 2005 maupun 2006. Pada proses pencucian peranan laju hujan sangat kuat sekali. Laju curah hujan Jakarta rata-rata adalah 11,41 mm/j dalam kisaran 2,00-38,60 mm/j lebih tinggi dibandingkan Kototabang dengan nilai rata-rata 3,21 mm/j dalam kisaran 0,96-12,64 mm/j.

Nilai koefisien pencucian (*scavenging*) maksimum dari SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ dan Na^+ di Jakarta dan Kototabang berada pada pangkat 7 (10^7) dan rata-rata dalam kisaran 10^5 - 10^7 seperti dalam tabel 3-2b. Nilai rata-rata koefisien pencucian dari SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ dan Na^+ dari tahun 2005 sampai 2006 di Jakarta masing-masing adalah $8,31 \times 10^6$; $7,31 \times 10^6$; $4,43 \times 10^6$; $7,32 \times 10^6$, sedangkan Kototabang adalah $2,65 \times 10^6$; $1,66 \times 10^7$; $3,64 \times 10^6$; dan $1,64 \times 10^7$. Nilai rata-rata koefisien pencucian SO_4^{2-} dan NH_4^+ di Jakarta lebih tinggi daripada di Kototabang. Gas SO_2 dan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ yang terdapat dalam aerosol memberikan kontribusi yang lebih besar untuk Jakarta. Sedangkan rata-rata koefisien pencucian NO_3^- dan Na^+ dalam dua tahun tersebut di Kototabang lebih tinggi dibandingkan Jakarta. Hal ini menjelaskan peranan kontribusi polutan gas NO_2 atau HNO_3 lebih besar dibandingkan aerosol dalam periode tersebut.

Deposisi basah yang tinggi dalam proses pencucian ini disebabkan konsentrasi polutan gas yang memberikan kontribusi terhadap deposisi basah adalah relatif tinggi di kota Jakarta dibandingkan pedesaan Kototabang. Laju curah hujan di Jakarta lebih tinggi dibandingkan Kototabang seperti terlihat dalam Gambar 3-2d.

Tabel 3-2b: KOEFISIEN PENCUCIAN (*SCAVENGING*) DARI SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ DAN Na^+ DI JAKARTA DAN KOTOTABANG (2005-2006)

Lokasi	Tahun		SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Na^+	
			Jam ⁻¹	Jam ⁻¹	Jam ⁻¹	Jam ⁻¹	
Jakarta (urban)	2005	Rata-rata	$9,31 \times 10^6$	$8,31 \times 10^6$	$3,56 \times 10^6$	$9,03 \times 10^6$	
		Maks	$4,01 \times 10^7$	$1,16 \times 10^7$	$1,54 \times 10^7$	$5,61 \times 10^7$	
		Min	$2,05 \times 10^6$	$6,32 \times 10^6$	$2,66 \times 10^3$	$1,18 \times 10^6$	
	2006	Rata-rata	$7,30 \times 10^6$	$6,32 \times 10^6$	$5,30 \times 10^6$	$5,61 \times 10^6$	
		Maks	$1,46 \times 10^7$	$1,46 \times 10^7$	$1,30 \times 10^7$	$1,20 \times 10^7$	
		Min	$3,18 \times 10^6$	$1,30 \times 10^6$	$5,57 \times 10^5$	$1,27 \times 10^6$	
		2005-2006	Rata-rata	$8,31 \times 10^6$	$7,31 \times 10^6$	$4,43 \times 10^6$	$7,32 \times 10^6$
	Kototabang (remote)	2005	Rata-rata	$2,81 \times 10^6$	$4,19 \times 10^5$	$3,47 \times 10^6$	$1,83 \times 10^7$
			Maks	$6,70 \times 10^6$	$1,02 \times 10^6$	$8,25 \times 10^6$	$3,84 \times 10^7$
Min			$1,02 \times 10^6$	$6,00 \times 10^4$	$5,75 \times 10^5$	$2,08 \times 10^6$	
2006		Rata-rata	$2,49 \times 10^6$	$3,27 \times 10^7$	$3,81 \times 10^6$	$1,46 \times 10^7$	
		Maks	$5,13 \times 10^6$	$5,36 \times 10^7$	$1,15 \times 10^7$	$2,66 \times 10^7$	
		Min	$5,78 \times 10^5$	$1,73 \times 10^6$	$6,06 \times 10^5$	$1,14 \times 10^6$	
		2005-2006	Rata-rata	$2,65 \times 10^6$	$1,66 \times 10^7$	$3,64 \times 10^6$	$1,64 \times 10^7$

4 KESIMPULAN

- Terdapat korelasi yang bagus (rata-rata di atas 60%) antara laju curah hujan dengan koefisien pencucian dari SO_4^{2-} (sulfat); NO_3^- (nitrat); NH_4^+ (amonium) dan Na^+ (sodium).
- Nilai rata-rata koefisien pencucian SO_4^{2-} ; NO_3^- ; NH_4^+ dan Na^+ dari 2005 sampai 2006 di Jakarta masing-masing adalah $8,31 \times 10^6$; $7,31 \times 10^6$; $4,43 \times 10^6$; $7,32 \times 10^6$, sedangkan Kototabang adalah $2,65 \times 10^6$; $1,66 \times 10^7$; $3,64 \times 10^6$; dan $1,64 \times 10^7$. Nilai rata-rata koefisien pencucian SO_4^{2-} dan NH_4^+ Jakarta lebih tinggi daripada Kototabang. Sebaliknya rata-rata koefisien pencucian NO_3^- dan Na^+ dalam dua tahun tersebut di Kototabang lebih tinggi dibandingkan Jakarta.

DAFTAR RUJUKAN

- Andronache, C., 2004. *Estimates of Sulfate Aerosol Wet Scavenging Coefficient for Locations in the Eastern United States*, Atmospheric Environment, V.38, 795-804.
- Arya S.P., 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*, Oxford University Press, Inc, pp. 275-276.
- Asman W.A.H., and Janssen A.J., 1987. *A Long-Range Transport Model for Ammonia and Ammonium For Europe*, Atmospheric Environment, Vol. 21, No. 10, pp. 2099-2119.
- Barrie L.A., 1985. *Scavenging Ratios, Wet Deposition, and In-Cloud Oxidation: An Application to the Oxides of Sulphur and Nitrogen*, Journal of Geophysical Research, June 20, Vol. 90, No. D3, pp. 5789-5799.
- Budiwati, T., 2007. *Peningkatan Ozon Troposfer dan Ozon Prekursor (CO) Pada Saat Kebakaran Hutan Tahun 2004*, Buku Ilmiah Bidang Pengkajian Ozon Dan Polusi Udara, dalam proses.
- Herlianto, D., 2006. *Prakarsa Rakyat*, Litbang Media Group, aji @ mediacorpradio.com. Kompas Cyber Media, September 11, 2006, *Api yang Terus Menyala*, Kompas, Jumat 24/6/2006, Kebakaran hutan di Riau.
- Maahs H.G., 1983. *Kinetics and Mechanism of the Oxidation of S (IV) by Ozone in Aqueous Solution with Particular Reference to SO_2 Oxidation in Nonurban Tropospheric Clouds*, J. Geophys. Res. 88, 10721-10732.
- Mc. Gregor G.R. and Nieuwolt S., 1998. *Tropical Climatology: An Introduction To The Climates Of The Low Latitudes*, second edition, John Wiley & Sons, pp. 125-133.
- Ministry of Environment-Indonesia, 2007. *State of Environment Report in Indonesia 2006*, pp. 336-349.

- Okita, T., Hara, H., Fukuzaki, N., 1996. *Measurements of Atmospheric SO₂ and SO₄²⁻, and Determination of Wet Scavenging of Sulfate Aerosol for the Winter Monsoon Season Over the Sea of Japan*, Atmospheric Environment, V.30, 3733-3739.
- Pinandito M., Rosananto I., Hidayat I., Sugondo S., Asiati S., Prabowo A., Matsui I., and Sugimoto N., 2000. *Mie Scattering Lidar Observation of Aerosol Vertical Profiles in Jakarta, Indonesia*, Environmental Science, 13 (2), 205-216.
- Satiadi, D., Tatang, H.E., Kusuma, N.A., dan Suaydhi, 2004. *Penelitian Karakteristik Proses Konveksi di atas Kototabang Dalam Rangka Meningkatkan Ketepatan Prediksi Model Iklim Indonesia*, Laporan penelitian LAPAN tahun 2004.
- Savoie Dennis L., 1987. *Washout Ratios of Nitrate, non-sea-salt Sulfate and Sea-Salt on Virginia Key, Florida and on American Samoa*, Atmospheric Environment, Vol. 21, No.1, pp. 103-112.
- The World Bank, 1995. *Indonesia Environment and Development*, pp. 72-84.
- Tjasjono, B., 1999. *Klimatologi Umum*, Penerbit ITB Bandung, hal. 23.