

KECENDERUNGAN TEMPORAL DEPOSISI Na^+ , Mg^{2+} DAN K^+ DI INDONESIA (2001-2008)

Tuti Budiwati ¹⁾, Wiwlek Setyawati, Emalya Rachmawati ²⁾ dan

Dyah Arles Tanti

1. Pusat Sains Dan Teknologi Atmosfer-LAPAN

2. Pusat Sarana Pengendalian Dampak Lingkungan-KLH

Jl. Djundjuran 133, Bandung

Email; 1)tuti_lapan@yahoo.com

ABSTRAK

Mengingat pentingnya kation (basa) dalam menurunkan keasaman udara maupun hujan, maka kami melakukan pengamatan dalam variasi musiman dan kecenderungan konsentrasi secara *temporal*. Data yang digunakan adalah kimia air hujan (deposisi basah) yaitu pH, K^+ , Na^+ , dan Mg^{2+} dalam $\mu\text{mol/L}$ rata-rata bulanan tertimbang 2001-2008. Selain itu dilakukan pengamatan terhadap pengaruh dari unsur kation terhadap pH dalam air hujan di Indonesia. Hasilnya terdapat kecenderungan Na^+ dan K^+ meningkat meskipun kecil yaitu $0,064 \mu\text{mol/L.bln}^{-1}$ dan $0,039 \mu\text{mol/L.bln}^{-1}$, dengan kecenderungan pH tidak begitu tinggi naik yaitu hanya $0,001$ per bulan. Berbeda dengan Mg^{2+} yang cenderung menurun sebesar $-0,071 \mu\text{mol/L.bln}^{-1}$. Masalah pembakaran biomassa seperti kebakaran hutan dan lahan (2003, 2004, 2006 dan 2007), pembakaran lahan dan sampah telah memberikan kontribusi nss- K^+ (95,37% K^+) yang cukup signifikan terhadap komposisi kimia air hujan sebagai penetral keasaman. Unsur Mg^{2+} dominan berasal dari laut sebesar 75,44% sisanya 24,56% dari kegiatan aktivitas manusia. Variasi dari pH dapat dijelaskan oleh Mg^{2+} sebesar 3,6%; Na^+ sebesar 4%; dan K^+ sebesar 5,3%. Maka 87% variasi dari pH ditentukan juga oleh faktor asam dan basa lainnya.

Kata kunci: kation, Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , deposisi basah, kecenderungan

ABSTRACT

Cation base is very important to reduce acidity of air and rain therefore it is necessary to carry out temporal observation based on its seasonal variation and trend of concentration. Data used in this study were monthly weighted average of rainwater chemistry composition (wet deposition): pH, K^+ , Na^+ and Mg^{2+} in $\mu\text{mol/L}$ during 2001-2008. We also carried out analysis of cation substance influences to rainwater pH in Indonesia. It was found

that trend of Na^+ and K^+ was slightly increasing about $0.064 \mu\text{mol/L}\cdot\text{month}^{-1}$ and $0.039 \mu\text{mol/L}\cdot\text{month}^{-1}$, and also slightly increase in pH trend about 0.001 month^{-1} . On the contrary trend of Mg^{2+} was decreasing about $0.071 \mu\text{mol/L}\cdot\text{month}^{-1}$. Biomass burning problems such as forest and land fires (in 2003, 2004, 2006 and 2007), waste combustion had contributed significant amount of Na^+ - K^+ (95.37% K^+) to rainwater chemistry as a neutralizing agent. About 75.44% of Mg^{2+} was mostly originated from the sea and the rest 24.56% was from human activities. Variation of pH was determined by Mg^{2+} , Na^+ and K^+ about 3.6%, 4% and 5.3%, respectively. Therefore the rest 87% of pH variation was determined by other acid and base factors.

Keywords: cation, Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , wet deposition, trend

1 PENDAHULUAN

Kation basa seperti Sodium (Na^+), kalsium (Ca^{2+}), kalium (K^+) dan magnesium (Mg^{2+}) adalah nutrisi tanaman yang penting. Bila unsur-unsur basa tersebut bergabung dengan anion seperti oksida, hidroksida, karbonat atau silikat bisa menurunkan keasaman udara dan hujan, dan juga menaikkan basa tanah. Kation basa ini berasal dari proses erosi dan pergerakan angin yang membawa partikel-partikel tanah, debu-debu letusan gunung berapi, kebakaran hutan, pembakaran bahan bakar minyak atau kayu dan hasil proses industri. Sumber utama debu-debu aktivitas manusia adalah industri seperti tenaga listrik, semen, besi industri logam lainnya.

Dari sumber tanah dan industri semen menyumbangkan Ca, Fe dan K ke atmosfer (Santosa dkk., 2008). Kalium (K) di atmosfer yang terkandung dalam partikel kasar (*coarse*) berasal dari laut dan industri sedangkan dalam partikel halus (*fine*) berasal dari pembakaran biomassa (*biomass burning*) (Santosa dkk., 2008). Adapun unsur basa lainnya seperti sodium (Na^+) dan asam seperti *chloride* (Cl^-) umumnya berasal dari garam-garam laut (Astrid dkk., 1996; Santosa dkk., 2008). Hasil penelitian di Norway (Torseth dkk., 1999) menemukan bahwa konsentrasi dan perbandingan dari Na^+ , Cl^- , dan Mg^{2+} adalah kuat di daerah pantai dibandingkan daratan.

Penelitian di beberapa tempat mendapatkan bahwa Cl^- atmosfer adalah tinggi sepanjang pantai dan turun menjauhi pantai sampai akhirnya konstan pada jarak tertentu (Mc Williams dan Sealy, 1987). Konsentrasi Cl^- adalah tinggi pada musim panas dibandingkan musim dingin disebabkan adanya badai garam. Saat badai garam adalah periode tinggi dari Cl^- atmosfer yang berasal dari sumber laut (Mc Williams dan Sealy, 1987). Tentunya akan berdampak pada Na^+ yang tinggi pula karena terikat dalam NaCl . Dampak garam atmosfer dapat menyebabkan kerusakan pada tumbuhan, terbukti kerusakan tanaman di pantai North Carolina (Wells dan Shunk, 1938) oleh garam laut yang dibawa angin.

Di kota dekat pantai, aerosol laut akan berperan mempengaruhi kimia air hujan. Pada daerah pantai sebagian besar partikel chlor di troposfer berasal dari aerosol laut, demikian pula Na berasal dari laut juga mengingat dari NaCl . Hasil penelitian karakteristik partikel udara di Jakarta yang dekat laut dan sebagai area pantai (*coastal area*) ternyata Na^+ dan Cl^- yang terkandung adalah tinggi (Santoso dkk., 2012; Hooper, 2001). Hasil penelitian total Cl^- aerosol atmosfer yang terukur di Leeds yaitu daerah pantai Inggris Utara adalah 2/3 berasal dari sumber laut (Willison dkk., 1989). Sedangkan unsur basa lainnya seperti Ca^{2+} , K^+ dan Mg^{2+} berasal dari pembakaran batubara atau pembersihan cerobong asap. Kandungan mineral laut dari unsur yang terbesar adalah Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , K^+ dan Ca^{2+} (Graedel dan Crutzen, 1993). Kation basa yang berada di atmosfer akan berdampak pada kondisi kation basa dalam air hujan. Jadi kation basa adalah penting dalam menentukan beban deposisi asam.

Polutan-polutan yang berasal dari laut atau dari kegiatan antropogenik tersebut relatif stabil di atmosfer dan dapat berpindah bersamaan dengan *massa* udara untuk jarak jauh (Milukaite dkk., 2000). Partikel laut mengandung $[\text{NH}_4]_2\text{SO}_4$; NH_4NO_3 dan NH_4Cl , selain itu konsentrasi SO_4^{2-} yang tinggi di daerah pantai berkaitan dengan Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , dan Ca^{2+} (Park dkk., 2000). Hasil Angin akan menyebarkan awan atau polutan ke segala arah. Penyebaran polusi udara mengikuti sifat meteorologi lingkungannya dari suatu wilayah ke wilayah lainnya karena kegiatan sumber yang berbeda (Stern dkk., 1984; Milukaite dkk.,

2000). Dampak pencemaran udara dalam skala meso atau regional, yang dampaknya dapat mempengaruhi areal yang lebih luas contohnya hujan asam (Stern dkk., 1984). Penyebaran polutan atau awan akan mempengaruhi deposisi basah.

Mengingat pentingnya kation basa dalam menurunkan keasaman udara maupun hujan, maka kami melakukan pengamatan dalam variasi musiman dan kecenderungan konsentrasi secara temporal. Pengaruh dari unsur kation terhadap pH dalam air hujan diamati untuk Indonesia. Untuk pengamatan tersebut digunakan data pH (derajat keasaman) dan konsentrasi Na^+ , K^+ , dan Mg^{2+} dalam air hujan.

2 KONDISI METEOROLOGI

Menurut Mc. Gregor G.R. dan Nieuwolt S. (1998) bahwa monsun dan variasi dari *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) mempengaruhi empat musim di Indonesia umumnya yaitu: a) musim kemarau dari Juni-Juli-Agustus (JJA) adalah angin bertiup dari timur dan tenggara yang melewati daratan di mana pada saat tersebut kurang mengandung uap air. Curah hujan di Indonesia pada Juni sampai dengan September menunjukkan nilai yang rendah dan potensi kejadian hujan berkurang. Pada bulan-bulan tersebut sumber polusi yang ditimbulkan oleh aktivitas manusia di wilayah Indonesia Barat seperti Jawa dan Sumatera akan disebarkan ke arah barat. b) musim peralihan kemarau ke hujan dari September-Oktober-Nopember (SON) adalah angin berasal dari tenggara dan timur. Angin timur dan tenggara pada saat tersebut kurang mengandung uap air. c) musim hujan dari Desember-Januari-Februari (DJF) adalah Indonesia dipengaruhi arah angin dari barat menuju daerah-daerah di Indonesia. Terlebih lagi pada bulan Desember sampai dengan Maret, angin yang berasal dari laut Pasifik banyak mengandung uap air. d) musim peralihan hujan ke kemarau dari Maret-April-Mei (MAM) adalah dipengaruhi Indonesia dipengaruhi angin dari barat laut bertiup ke arah tenggara.

3 DATA DAN METODOLOGI

3.1 Data

Data yang digunakan adalah kimia air hujan (deposisi basah) yaitu pH, K^+ , Na^+ , dan Mg^{2+} dalam $\mu\text{mol/L}$ rata-rata bulanan tertimbang dari Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan Pusat Pengendalian Dampak Lingkungan (PUSARPEDAL) dari Januari 2001 sampai Desember 2008. Data-data ini telah diuji kualitasnya dengan metode *Quality Assurance/Quality Control (QA/QC)* yang dikeluarkan oleh *Acid Deposition and Oxidant Research Center (ADORC)* Japan (ADORC, 2002). Wilayah Indonesia yang dikaji adalah 12 kota yaitu Banjarbaru, Pontianak, Kupang, Mataram, Medan, Kototabang, Lampung, Palembang, Jakarta, Serpong, Cisarua, dan Bandung.

3.2 Metodologi

Pengolahan data deposisi basah ditujukan untuk pH dan kation: K^+ , Na^+ , dan Mg^{2+} dalam $\mu\text{mol/L}$ bulanan dari Januari 2001 sampai Desember 2008. Selain itu dihitung pula secara teori non-sea salt (nss) K^+ and non-sea salt (nss) Mg^{2+} , dengan menggunakan nilai ratio antara elemen yang ditentukan dan Na^+ dalam air laut. Na^+ digunakan sebagai indikator dari air laut (Astrid, dkk., 1996), maka untuk menentukan sumber dari laut dengan mengasumsikan sodium berasal dari laut (Park, dkk., 2000).

$$\begin{aligned} [\text{K}^+]_{\text{laut}} &= 0,02 \cdot [\text{Na}^+] \\ [\text{Mg}^{2+}]_{\text{laut}} &= 0,23 \cdot [\text{Na}^+] \end{aligned}$$

Jadi $[\text{nss-K}^+]$ adalah $[\text{K}^+]$ dikurangi $[\text{K}^+]_{\text{laut}}$ dan $[\text{nss-Mg}^{2+}]$ adalah $[\text{Mg}^{2+}]$ dikurangi $[\text{Mg}^{2+}]_{\text{laut}}$.

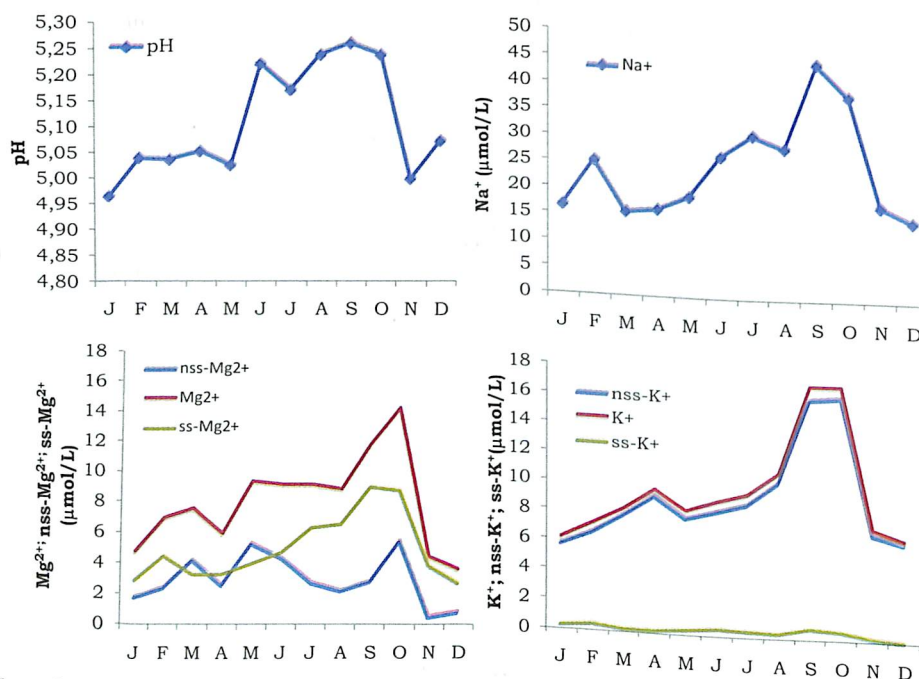
Variasi dan kecenderungan dari ion-ion basa yang terdiri dari K^+ , nss-K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , dan nss-Mg^{2+} dianalisis secara statistik. Korelasi diantara ion-ion K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , dan pH dari air hujan dihitung secara statistik.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

a. Variasi pH, Na^+ , Mg^{2+} dan K^+

Gambar 1 memperlihatkan variasi rata-rata bulanan dari pH dan ion-ion kation Na^+ , Mg^{2+} , ss-Mg^{2+} , nss-Mg^{2+} , K^+ , ss-K^+ , dan nss-K^+ dari 2001 sampai 2008. Air hujan mengandung bermacam anion dan kation yang terlarut, setelah terjadi penggabungan gas-gas dan aerosol udara ambien. Pada musim kemarau sampai peralihan bulan Oktober terlihat konsentrasi maksimum dari Na^+ , Mg^{2+} , ss-Mg^{2+} , nss-Mg^{2+} , K^+ , ss-K^+ , dan nss-K^+ . Tetapi variasi pH air hujan memperlihatkan nilai tinggi dari Juni sampai Oktober di Indonesia.



Gambar 1. Variasi pH dan konsentrasi Na^+ , Mg^{2+} , nss-Mg^{2+} , ss-Mg^{2+} , K^+ , nss-K^+ , dan ss-K^+ di Indonesia 2001 sampai 2008.

Periode 2001 sampai 2008 didapati nilai pH sudah dibawah nilai batas keasaman air hujan 5,6. Menurut Seinfeld dan Pandis (1998) pH 5,6 adalah pH netral dari air awan dan berada dalam kesetimbangan dengan CO_2 pada konsentrasi 350 ppm. Lacaux dkk. (1987) menyatakan bahwa hujan dengan nilai pH < 5,6

adalah kondisi di mana hujan dikatakan asam atau hujan asam. Nilai pH sangat dipengaruhi oleh kesetimbangan dari anion (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) dan kation (NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , dan H^+) dalam air hujan. Unsur-unsur kation adalah penetral untuk unsur anion, sehingga pH air hujan menjadi basa atau nilainya akan cenderung tinggi. Kondisi rata-rata $\text{pH} < 5,6$ berarti telah terjadi hujan asam di Indonesia selama 2001 sampai 2008.

Nilai pH yang tinggi pada bulan bulan Agustus sampai Oktober terkontrol dengan unsur penetral Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ yang tinggi pula. Puncak nilai pH sebesar 5,26 terdapat pada bulan September, demikian pula konsentrasi ion-ion Na^+ sebesar 44,83 $\mu\text{mol/L}$; Mg^{2+} sebesar 11,77 $\mu\text{mol/L}$ dan K^+ sebesar 17,08 $\mu\text{mol/L}$. Terlihat adanya perbedaan faktor yang mempengaruhi total ion Mg^{2+} dan K^+ . Konsentrasi Mg^{2+} dari sumber laut dalam nilai ss- Mg^{2+} ternyata lebih tinggi yaitu 5,02 $\mu\text{mol/L}$ dibandingkan dari ss- K^+ yaitu 0,44 $\mu\text{mol/L}$, hal tersebut didukung oleh kenyataan bahwa Mg^{2+} selain berasal dari kerak Bumi juga dari laut (Park dkk., 2000). Nilai ss- Mg^{2+} lebih tinggi dari nss- Mg^{2+} , hal ini signifikan dengan luas laut yang mencapai 2/3 dari luas daratan Indonesia. Berbeda dengan ss- K^+ jauh lebih kecil dari nss- K^+ . Ion K^+ dalam air hujan berasal dari pelarutan partikel-partikel yang mengandung K^+ hasil pembakaran biomassa dan industri semen dan pupuk di Indonesia (Santoso dkk., 2008).

b. Kecenderungan pH, Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+

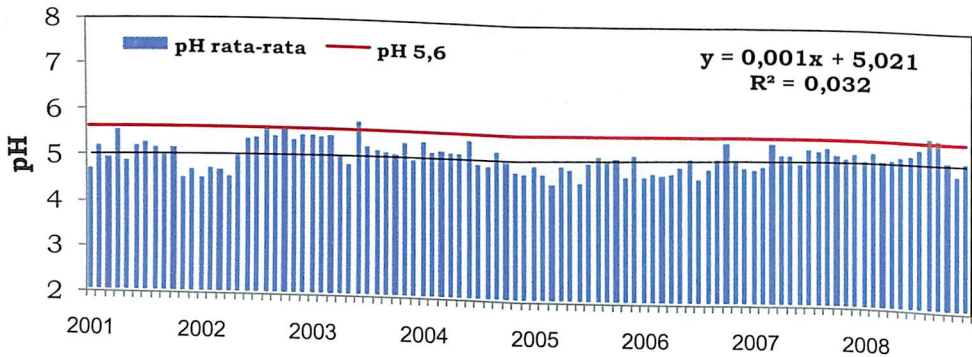
Slope dan koefisien determinasi (R^2) dari rata-rata bulanan pH, Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ dalam satuan $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$ seperti ringkasan dalam Tabel 1. Hasil analisis ditujukan untuk melihat kecenderungan parameter secara temporal dan faktor atau fenomena yang mempengaruhinya. Indonesia sebagai negara maritim yang kaya mineral laut, ternyata menyumbangkan ion Na^+ dalam air hujan cukup tinggi sebesar 24,84 $\mu\text{mol/L}$ dengan kisaran 4,49-5,76 $\mu\text{mol/L}$ dibandingkan Mg^{2+} dan K^+ .

Di Indonesia dalam periode 2001 sampai 2008, didapatkan kecenderungan Na^+ dan K^+ meningkat meskipun kecil dengan *slope* 0,064 $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$ dan 0,039 $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$. Demikian pula dengan kecenderungan pH tidak begitu tinggi naik yaitu hanya 0,001 per bulan. Faktor unsur lainnya seperti SO_4^{2-} ; NO_3^- , dan Cl^-

yang menyebabkan nilai pH ke arah asam tentunya sangat berperan pula untuk mempengaruhinya. Berbeda dengan kecenderungan Mg^{2+} yang cenderung menurun meskipun tidak besar pula yaitu dengan slope $-0,071 \mu\text{mol/L.bln}^{-1}$.

Tabel 1. Slope dan koefisien determinasi (R^2) untuk regresi garis (*linear regression*) dari rata-rata bulanan pH dan ion-ion Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ dalam $\mu\text{mol/L}$ per bulan atau $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$ selama periode 2001-2008.

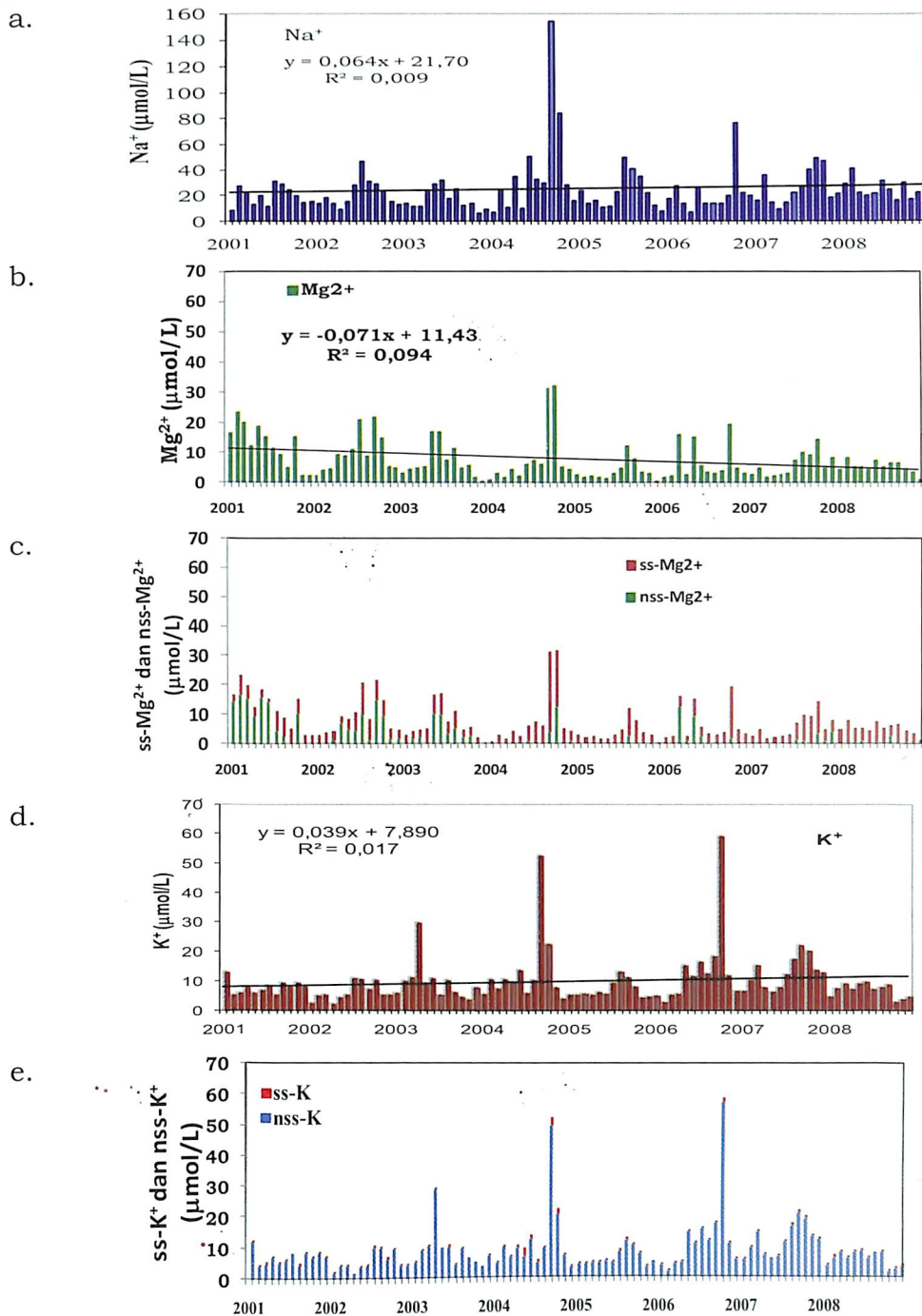
| 2001-2008 | Indonesia | | | | | |
|-----------------------|-----------|-------|-----------|--------|-------|------|
| | Slope | R^2 | Rata-rata | Stdev. | Maks | Min |
| pH | 0,001 | 0,032 | 5,11 | 0,28 | 5,76 | 4,49 |
| Na^+ | 0,064 | 0,009 | 24,84 | 18,92 | 155,1 | 7,3 |
| Mg^{2+} | -0,071 | 0,094 | 7,95 | 6,53 | 32,55 | 0,78 |
| nss- Mg^{2+} | | | 2,93 | 4,68 | 17,40 | 0,00 |
| ss- Mg^{2+} | | | 5,02 | 3,80 | 27,57 | 0,78 |
| K^+ | 0,039 | 0,017 | 9,78 | 8,24 | 59,21 | 2,3 |
| nss- K^+ | | | 9,34 | 7,94 | 57,65 | 2,12 |
| ss- K^+ | | | 0,44 | 0,55 | 3,10 | 0,15 |



Gambar 2. pH di Indonesia 2001 sampai 2008.

Kecenderungan pH air hujan pada akhir 2004 sampai pertengahan 2005 terlihat menurun, naik lagi dari pertengahan sampai akhir 2005. Awal 2006 menurun sampai pertengahan 2006 dan akhir tahun tersebut meningkat sampai 2008 (Gambar 2). Tetapi berbeda dengan ion-ion Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ (Gambar 3) di Indonesia selama 2001 sampai 2008 berfluktuasi dan menunjukkan konsentrasi yang tinggi dari Agustus sampai bulan-bulan peralihan SON pada 2004 dan 2006. Kenaikan yang signifikan tinggi terjadi akhir 2004 pada bulan-bulan SON untuk Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ . Periode tahun 2006 sampai 2008

memperlihatkan kenaikan yang signifikan dari Na^+ dan K^+ dan berdampak pada nilai pH yang naik pula.

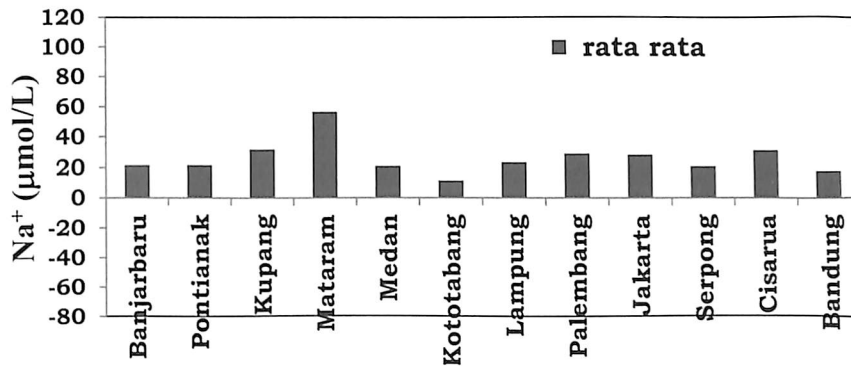


Gambar 3. Konsentrasi a) Na^+ , b) Mg^{2+} , c) nss-Mg^{2+} dan ss-Mg^{2+} , d) K^+ , e) nss-K^+ dan ss-K^+ di Indonesia 2001 sampai 2008.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa ion-ion dari laut seperti Na^+ dan ss-Mg^{2+} adalah tinggi dibandingkan dengan ss-K^+ . Indonesia sebagai negara kepulauan mempunyai luas lautan yang mencapai 2/3 bagian, dan luas daratan Indonesia hanya sekitar 1/3 dari luas seluruh Indonesia. Mengingat hal tersebut tentunya akan menyumbangkan unsur-unsur laut seperti Na^+ , Mg^{2+} , dan Cl^- yang melimpah ke atmosfer di wilayahnya. Dari Gambar 2 didapati puncak konsentrasi Na^+ dan Mg^{2+} maksimum terjadi pada musim kemarau sampai September tahun 2004. Sedangkan K^+ berasal dari emisi penggunaan pupuk, pembakaran biomassa dari daerah pertanian, ternyata memperlihatkan konsentrasi tinggi pada musim kemarau JJA sampai peralihan SON. Di daerah industri semen dan pembakaran batubara untuk industri maupun rumah tangga akan mengemisikan unsur K ke atmosfer dan selanjutnya melalui pembersihan basah akan terdeposisi dalam air hujan sebagai ion K^+ . Fenomena konsentrasi nss-K^+ tinggi terjadi pada bulan-bulan kemarau JJA dan SON. Konsentrasi nss-K^+ tinggi pada bulan-bulan tersebut terjadi pada tahun 2003, 2004, 2006 dan 2007.

c. Analisis Sumber

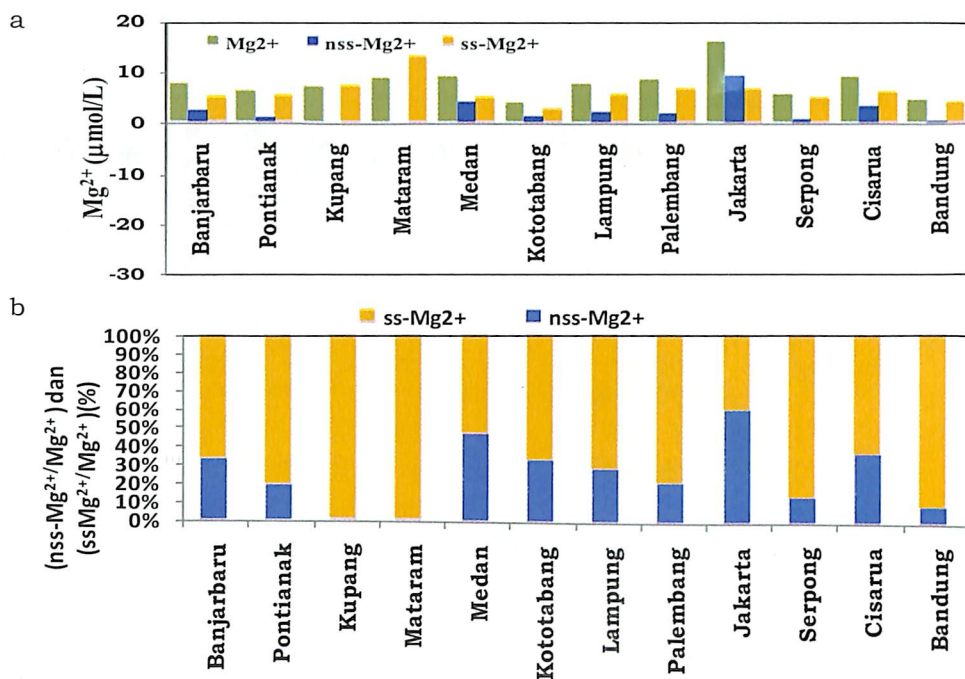
Dari Gambar 4 memperlihatkan bahwa konsentrasi Na^+ tinggi terdapat di Mataram (Lombok) > Kupang > Cisarua > Palembang > Jakarta > Lampung > Pontianak > Banjarbaru > Medan yaitu sebesar 56,65 > 31,84 > 31,21 > 29,01 > 28,41 > 23,62 > 21,79 > 21,72 > 21,16 $\mu\text{mol/L}$. Kelompok lokasi tersebut dekat dengan laut kecuali Cisarua. Lokasi yang jauh dari laut memperlihatkan Na^+ lebih rendah seperti Serpong > Bandung > Kototabang yaitu sebesar 20,94 > 17,73 > 11,48 $\mu\text{mol/L}$.



Gambar 4. Konsentrasi Na^+ berdasarkan lokasi di Indonesia dari 2001 sampai 2008.

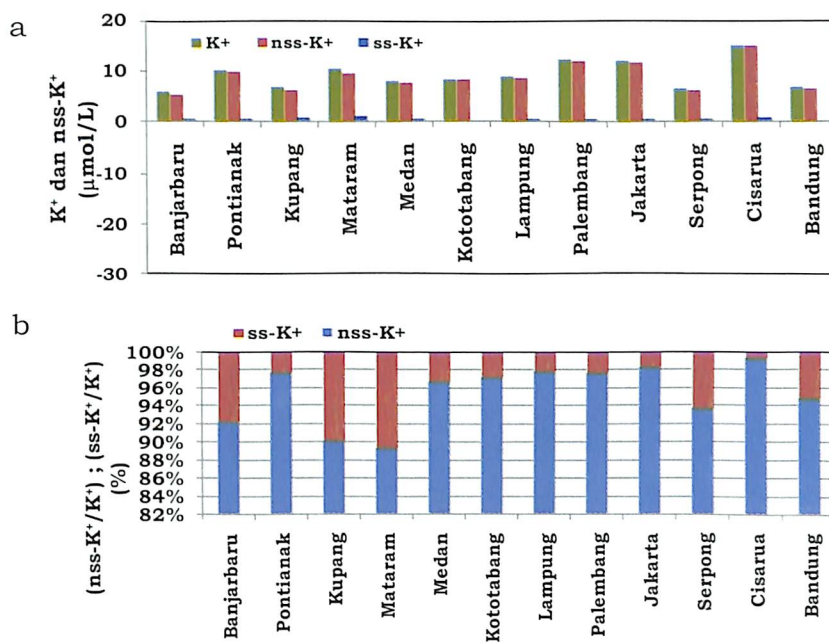
Gambar 5 mempresentasikan konsentrasi Mg^{2+} yang terdiri dari nss-Mg^{2+} dan ss-Mg^{2+} berdasarkan lokasi pengamatan. Jakarta yang terletak di pantai laut Jawa mempunyai konsentrasi Mg^{2+} rata-rata yang tinggi yaitu $15,7 \mu\text{mol/L}$ dengan nss-Mg^{2+} dan ss-Mg^{2+} sebesar $9,29 \mu\text{mol/L}$ dan $6,54 \mu\text{mol/L}$. Perbandingan nss-Mg^{2+} dengan ss-Mg^{2+} adalah $59,21\%$ dengan $40,79\%$ untuk Jakarta, berarti sumber dari industri baja, debu-debu bangunan (bangunan konstruksi), dan debu tanah jalan (Santoso dkk., 2012). Demikian pula dengan kota Medan mempunyai konsentrasi Mg^{2+} rata-rata yaitu $8,94 \mu\text{mol/L}$ sebagai daerah perkotaan dan dekat laut (sekitar $\pm 20 \text{ km}$) ternyata signifikan dengan prosentase dari nss-Mg^{2+} lebih kecil dari ss-Mg^{2+} yaitu $46,53\% < 53,47\%$.

Sedangkan kota pantai lainnya yaitu Mataram dan Kupang mempunyai konsentrasi Mg^{2+} yang dominan berasal dari laut ($\text{ss-Mg}^{2+} = 100\%$) meskipun nilainya lebih kecil dari Jakarta dan Medan yaitu rata-rata sebesar $8,65 \mu\text{mol/L}$ dan $7,05 \mu\text{mol/L}$, berurutan. Selain itu konsentrasi Mg^{2+} yang tinggi yaitu rata-rata $8,96 \mu\text{mol/L}$ terdapat di Cisarua yang merupakan lokasi perkebunan dan pertanian di Bogor Jawa Barat, dengan perbandingan nss-Mg^{2+} dan ss-Mg^{2+} adalah $36,24\%$ dan $63,76\%$. Pengaruh laut yang kuat berdasarkan kontribusi dari ss-Mg^{2+} terdapat pula di Bandung yaitu $92,11\%$ dan Serpong sebesar $87,14\%$.



Gambar 5. Konsentrasi a) Mg^{2+} , nss- Mg^{2+} , ss- Mg^{2+} , dan b) prosentasen ss- Mg^{2+} , ss- Mg^{2+} berdasarkan lokasi di Indonesia dari 2001 sampai 2008.

Gambar 6 memperlihatkan bahwa konsentrasi rata-rata K^+ tertinggi sebesar $14,99 \mu\text{mol/L}$ terdapat di Cisarua. Berikutnya Palembang $12,29 \mu\text{mol/L}$ diikuti Jakarta $11,80 \mu\text{mol/L}$, Mataram $10,53 \mu\text{mol/L}$ dan Pontianak $10,13 \mu\text{mol/L}$. Lokasi lainnya mempunyai konsentrasi lebih rendah dari lima lokasi yang disebutkan terdahulu yaitu $<10 \mu\text{mol/L}$. Prosentase nss- K^+ tertinggi terdapat di Cisarua diikuti Jakarta selanjutnya Lampung berikutnya Pontianak, Palembang, Kototabang dan Medan secara berurutan dengan nilai $99,28\% > 98,26\% > 97,80\% > 97,73\% > 97,70\% > 97,18\% > 96,67\%$. Adapun lokasi lainnya mempunyai prosentase nss- K^+ dibawah 95% .



Gambar 6. Konsentrasi a) K^+ , nss- K^+ , ss- K^+ , dan b) persentasen ss- K^+ , ss- K^+ berdasarkan lokasi di Indonesia dari 2001 sampai 2008.

Prosentase nss- Mg^{2+} dan ss- Mg^{2+} adalah 0,00%-59,21% dan 40,79%-100,00%. Prosentase nss- K^+ adalah 89,24%-99,28% dan prosentase ss- K^+ adalah 0,72%-10,76%. Perbandingan prosentase rata-rata antara nss- Mg^{2+} dengan ss- Mg^{2+} adalah 24,56% dibandingkan dengan 75,44%. Nilai tersebut menunjukkan sumber dominan berasal dari laut. Sebaliknya berlawanan dengan perbandingan prosentase rata-rata dari nss- K^+ dengan ss- K^+ adalah 95,37% dibanding dengan 4,63%. Kenyataan bahwa nilai nss- K^+ lebih besar dari ss- K^+ adalah sebagai indikasi sumber dominan bukan berasal dari laut, diduga dari kebakaran hutan.

d. Korelasi

Hasil korelasi antara pH dengan unsur ion basa seperti Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+ ditabelkan dalam Tabel 2. Korelasi K^+ dan Na^+ terhadap pH cukup signifikan dengan nilai signifikansi $< 0,05$. Korelasi linear antara Na^+ dan pH dalam air hujan hanya 0,202 berarti $R^2 = 0,040$. Adapun korelasi antara K^+ dan pH dalam air

hujan adalah 0,232 dengan $R^2 = 0,053$. Pengaruh Na⁺ terhadap pH dan K⁺ terhadap pH meskipun kecil tetapi kuat dilihat dari nilai signifikansinya. Hubungan antara unsur ion basa sangat kuat dengan nilai signifikansi $< 0,01$.

Tabel 2. Koefisien korelasi dari pH dan ion-ion Mg²⁺, K⁺, Na⁺ dalam air hujan pada probabilitas 95% untuk semua sampel (n=96).

| | | pH | Mg ²⁺ | K ⁺ |
|------------------|----------------|----------|------------------|----------------|
| Mg ²⁺ | Korelasi | 0,19 | | |
| | Sig. | 0,064 | | |
| | R ² | 0,036 | | |
| K ⁺ | Korelasi | 0,232(*) | 0,461(**) | |
| | Sig. | 0,023 | 0,0 | |
| | R ² | 0,053 | | |
| Na ⁺ | Korelasi | 0,202(*) | 0,632(**) | 0,745(**) |
| | Sig. | 0,048 | 0,0 | 0,0 |
| | R ² | 0,040 | | |

* Korelasi adalah signifikan (Sig.) pada level $< 0,05$.

** Korelasi adalah signifikan (Sig.) pada level $< 0,01$.

4.2 Pembahasan

Mengingat adanya proses pembersihan dan pelarutan hujan terhadap polutan atmosfer. Sumber-sumber polutan sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, sehingga air hujan yang bersifat asam disebabkan gas-gas SO₂ dan NO_x. Sedangkan air hujan yang bersifat basa disebabkan oleh sumber aktivitas manusia seperti gas NH₃ yang berasal dari pemupukan atau debu-debu tanah yang mengandung Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, dan NH₄Cl. Unsur kation yang bersifat basa selain dari sumber aktivitas manusia juga berasal dari alam seperti pembakaran biomassa seperti kebakaran hutan, lahan, pembukaan pertanian, pembakaran sampah habis panen, pembakaran sampah rumah tangga dan laut.

Di kota dekat pantai, aerosol laut akan berperan mempengaruhi kimia air hujan. Dan hal tersebut terbukti pada musim kemarau variasi bulanan Na⁺ dan Mg²⁺ maksimum pada musim kemarau sampai bulan Oktober yaitu saat terjadi penguapan laut karena pemanasan. Nilai ss-Mg²⁺ lebih tinggi dari nss-Mg²⁺, hal ini signifikan dengan luas laut yang mencapai 2/3 dari luas daratan Indonesia.

Pada musim kemarau sumbangan NaCl dan Mg(Cl)₂ yang terdapat dalam air laut akan menaikkan Na⁺ dan Mg²⁺ (ss-Mg²⁺) dalam air hujan. Kation laut seperti Na⁺ dan Mg²⁺ (ss-Mg²⁺) signifikan tinggi di daerah pantai Mataram, Kupang, Lampung, Palembang dan Jakarta. Hal ini disebabkan kandungan Na⁺, Mg⁺ dan Cl⁺ dalam partikel halus dan kasar yang berasal dari laut, hasil identifikasi karakteristik partikel di Jakarta sebagai area pantai (Santoso dkk., 2012; Hooper, 2001). Sedangkan konsentrasi nss-Mg²⁺ tinggi di Jakarta dengan prosentase 59,21% dari Mg²⁺ dibandingkan daerah lainnya, sebagai indikasi pengaruh sumber aktivitas manusia yang kuat dari partikel-partikel debu bangunan dan jalan. Unsur-unsur Ca, Mg, K, dan Pb berasal dari debu-debu bangunan bercampur debu-debu jalanan (Santoso dkk., 2012).

Pada musim kemarau di Indonesia terutama di wilayah barat seperti Kalimantan, Sumatera dan Jawa selalu terjadi kebakaran hutan. Dampaknya akan meningkatkan konsentrasi nss-K⁺ di wilayah Indonesia barat, mengingat pada musim kemarau dan angin bertiup dari tenggara dan timur. Angin dari tenggara dan timur pada musim kemarau berpotensi menyumbangkan unsur laut Na⁺ dan Mg²⁺ dari laut yang luas di timur ke wilayah Indonesia bagian barat.

Dari penelitian Santoso dkk. (2008) menjelaskan bahwa K dominan berasal dari partikel halus dan kasar dari sumber pembakaran biomassa yaitu pembakaran sampah, pembukaan area pertanian dan perkebunan. Pada musim kemarau sampai bulan Oktober seiring dengan kejadian kebakaran hutan di wilayah Barat Indonesia seperti Kalimantan, Sumatera dan Jawa akan memberikan kontribusi K⁺ dalam partikel halus yang melimpah. Konsentrasi nss-K⁺ tinggi pada bulan-bulan tersebut terjadi pada tahun 2003, 2004, 2006 dan 2007 disebabkan kebakaran lahan dan hutan pada musim kemarau (Mahmud, 2012; Budiwati dan Setyawati, 2013; NOAA, 2013). Hal ini terbukti tinggi di Palembang dengan komposisi 97,70% nss-K⁺ dan 2,30% ss-K⁺. Konsentrasi tinggi juga terdapat di Cisarua dengan perbandingan 99,28% dan 0,72% untuk nss-K⁺ dan ss-K⁺. Sebagai daerah pertanian hal ini disebabkan oleh pembakaran sampah pertanian atau pembukaan lahan. Prosentase rata-rata

nss- K^+ yang lebih tinggi dari ss- K^+ yaitu mencapai 95,37%, adalah indikasi sumber yang dominan dari K^+ di Indonesia bukan dari laut, tapi dari pembakaran biomassa.

Koefisien determinasi (R^2) dari regresi linear antara pH dengan Mg^{2+} ; Na^+ ; dan K^+ berurutan sebesar 0,036; 0,040; dan 0,053. Berarti angka-angka determinasi tersebut menunjukkan bahwa 3,6%; 4%; dan 5,3% variasi dari pH dapat dijelaskan secara berurutan oleh Mg^{2+} ; Na^+ dan K^+ . Maka sisanya 87% variasi dari pH ditentukan oleh faktor asam dan basa lainnya (seperti Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- dan NH_4^+ , Ca^{2+}).

5 KESIMPULAN

Di Indonesia dalam periode 2001 sampai 2008, didapatkan kecenderungan Na^+ dan K^+ meningkat meskipun kecil yaitu 0,064 $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$ dan 0,039 $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$. Demikian pula dengan kecenderungan pH tidak begitu tinggi naik yaitu hanya 0,001 per bulan. Berbeda dengan Mg^{2+} yang cenderung menurun sebesar 0,071 $\mu\text{mol/L.bln}^{-1}$. Masalah kebakaran hutan dan lahan tahun 2003, 2004, 2006 dan 2007 telah memberikan kontribusi yang cukup signifikan terhadap komposisi kimia air hujan atau penetral keasaman karena nss- K^+ di daerah kebakaran hutan seperti Lampung berikutnya Pontianak, Palembang, Kototabang dan Medan yaitu dengan angka nss-K 97,80% > 97,73% > 97,70% > 97,18% > 96,67%. Prosentase rata-rata nss- K^+ yang lebih tinggi dari ss- K^+ yaitu mencapai 95,37% dibanding dengan 4,63%., adalah sebagai indikasi bahwa sumber yang mempengaruhi K^+ dalam air hujan di Indonesia bukan dari laut, melainkan pembakaran biomassa (*biomass burning*). Sebaliknya jumlah prosentase rata-rata dari nss- Mg^{2+} dibandingkan dengan ss- Mg^{2+} adalah 24,56% dibandingkan dengan 75,44%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Mg^{2+} dominan berasal dari laut. Variasi dari pH dapat dijelaskan oleh Mg^{2+} sebesar 3,6%; Na^+ sebesar 4% dan K^+ sebesar 5,3%. Maka 95% variasi dari pH ditentukan oleh faktor asam dan basa lainnya.

DAFTAR RUJUKAN

- ADORC, 2002: Manual Quality Assurance/Quality Control (QA/QC), Program for Wet Deposition Monitoring in East Asia by ADORC Acid Deposition and Oxidant Research Center-Japan.
- Astrid, A., H. Wortham, M. Millet, and P. Mirabel, 1996: Chemical Composition Of Rain Water In Eastern France. *Atmospheric Environment*, **30**, No. 1, 59-71.
- Budiwati, T., dan Setyawati, W., 2013: Pengaruh Kebakaran Hutan Terhadap Aerosol Dan Ozon Total Di Sumatera Berdasarkan Musiman. *Prosiding Seminar Sains Atmosfer SSA) 2013*, ISBN: 978-979-1458-73-3, 309-321.
- Graedel T.E., and Crutzen P.J., 1993: Atmospheric Change: An Earth System Perspective. *Freeman W.H. and Company*, pp. 178-179.
- Hopke, P.K., Cohen David D., Begum Bilkis A., Biswas Swapan K., Bangfa Ni, Pandit G. G, Santoso M., Chung Y. S., Davy P., Markwitz A., Waheed S., Siddique N., Santos F.L., Preciosa Corazon B. Pabroa, Manikkuwadura Consy Shirani Seneviratne, Wimolwattanapun W., Bunprapob S., Vuong T.B., Hien P.D., and Markowicz A., 2008: Urban air quality in the Asian region. *Science of the Total Environment*, **404**, Number 1-3, ISSN 0048-9697, Elsevier, www.sciencedirect.com 103-112.
- Hooper, M., 2001: Comparative Study of Regional Aerosol in Tropical Australia and Indonesia. *Proceedings of 7th International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere*, November 20-22, Tsukuba-Japan, 36-43.
- Lacaux J.P., Servant J. and Baudet J.G.R., 1987: Acid Rain In The Tropical Forests Of The Ivory Coast. *Atmospheric Environment*, **21**, No 12, hal 2643 - 2647.
- Mahmud, M., 2012: Assessment of atmospheric impacts of biomass open burning in Kalimantan Borneo during 2004. *Atmospheric Environment*, Contents lists available at Sci Verse Science Direct, journal home page: www.elsevier.com/locate/atmosenv, 1-8.
- Milukaite, A., Mikelinskiene A., and Giedraitis B., 2000: Acidification of the world: Natural and Anthropogenic, Acid Rain 2000. *Proceeding from the 6th International Conference on Acidic Deposition: Looking back to the past and thinking of the future*, Tsukuba, Japan, 10-16 December 2000, **I**, 1553-1558.
- Mc. Gregor G.R. and Nieuwolt S., 1998: Tropical Climatology: An Introduction To The Climates Of The Low Latitudes, second

- edition, John Wiley & Sons, 125-133.
- McWilliams E.L, and Sealy R.L. 1987: Atmospheric Chloride Its Implication For Foliar Uptake And Damage. *Atmospheric Environment*, **21**, No 12, 2661 – 2665.
- NOAA, 2013: ENSO Cycle: Recent Evolution, current status and prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration, http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf
- Park C.J., Noh H.R., Kim B.G., Kim S.Y., Jung I.U., Cho C.R., and Han J.S., 2000: Evaluation of Acid Deposition In Korea, Acid Rain 2000. *Proceedings from the 6th International Conference on Acidic Deposition: Looking back to the past and thinking of the future*, Tsukuba, Japan, 10-16 December 2000, **II**, 445-450.
- Santoso, M., Hopke, P.K., Hidayat, A., and Lestiani, D.D., 2008: Sources identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization. *Science of the Total Environment*, **397**, 229–237.
- Santoso, M., Lestiani, D.D., and Markwitz, A., 2012: Characterization of airborne particulate matter collected at Jakarta roadside of an arterial road. *J. Radioanal Nucl Chem*, DOI 10.1007/s10967-012-2350-5.
- Stern, A.C., Boubel, R.W., Turner, D.B., and Fox, L.N., 1984: Fundamentals of Air Pollution. *Academic Press INC*, **II**, Orlando-Florida, 35-45.
- Seinfeld J.H. and Pandis S.N., 1998: Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change. *John Wiley and Sons. INC.*, New York, 1031-1032.
- Torseth K., Hanssen J.E., and Semb A., 1999: Temporal and spatial variations of airborne Mg, Cl, Na, Ca, and K in rural areas of Norway. *The Science of the Total Environment*, **234**, ELSEVIER, 75-88.
- Wells B.W. and Shunk I.V., 1938: Salt spray: an important factor in coastal ecology. *Bull. Torrey Bot. Club*, **65**, 485 - 492.
- Willison M.J., Clarke A.G., and Zeki E.M., 1989: Chloride Aerosols In Central Northern England. *Atmospheric Environment*, **23**, No 10, 2231 – 2239.