

PENYEBARAN SO₂ DAN NO₂ SERTA KONTRIBUSINYA TERHADAP HUJAN DI BANDUNG

Tuti Budiwati ¹⁾, Iis Sofiati ¹⁾, Sumaryati ¹⁾, Tuti Mulyani HW ²⁾ dan M. Pariyatmo ¹⁾

1) Bidang Pengkajian Ozon dan Polusi Udara

Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim - LAPAN

2) Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG) Jakarta

Abstrak

Pengamatan gas SO₂, NO₂, ion SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄²⁺ dan pH air hujan dilakukan di lima lokasi yaitu Cipedes (Bandung Barat), Martadinata (Bandung Timur), Dago (Bandung Utara), Kopo (Bandung Selatan) dan Kebon Kelapa (Bandung Pusat). Pengambilan sampel gas SO₂, NO₂, dan sampel air hujan dilakukan selama dua tahun dari Agustus 2000 sampai Agustus 2002. Nilai pH rata-rata dari Agustus 2000 sampai Agustus 2002 bervariasi 5,01 – 6,06 dan kondisi ini bervariasi untuk masing-masing daerah. Kondisi terburuk di Cipedes adalah 5,01, berarti daerah ini telah terkena hujan asam karena berada di bawah 5,60 (batas hujan asam). Daerah lainnya seperti Kopo, Martadinata dan Kebon Kalapa mempunyai pH rata-rata 5,77; 5,81 dan 5,85. Sedangkan daerah Dago adalah daerah terbersih dari lima lokasi di Bandung dengan pH rata-rata 6,06. Pengaruh gas polutan SO₂, NO₂ dan aerosol dari sumber lokal menentukan konsentrasi ion sulfat dan nitrat yang berperan dalam keasaman air hujan.

Abstract:

We observed the concentration of SO₂, NO₂ gases, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄²⁺ ions, and pH of rainwater at five locations; there were: Cipedes (west of Bandung), Martadinata (east of Bandung), Dago (north of Bandung), Kopo (south of Bandung), and Kebon Kalapa (central of Bandung). We collected the sample of SO₂, NO₂ gases and rainwater during two years (from August 2000 to August 2003). As the results, the average values of pH have variation ranging 5.01-6.06, and this condition also occur for each region. The worst condition of pH found at Cipedes with value of 5.01, this condition means that station had been affected by acid rain, because the value under 5.60 (the threshold of acid rain). Other locations such as Kopo, Martadinata and Kebon Kalapa have average value of pH of 5.77, 5.81 and 5.85 respectively. While at Dago which represents the cleanest region, that of five locations in Bandung, the average of pH ranges 6.06. The pollutant of SO₂, NO₂ gases and aerosol from the local source influences on concentration of sulfate and nitrate ions which the important role on acid rain.

1. PENDAHULUAN

Polusi udara adalah salah satu masalah lingkungan yang serius di kota-kota besar di Indonesia. Terdapat peningkatan polutan untuk daerah lalu lintas padat seperti Jakarta, Bandung, Surabaya dan kota besar lainnya. Polutan yang dimaksud adalah

Polusi Udara dan Pengukurannya (2005), 53 - 70
Lembaga Penerbangan Dan Antariksa Nasional

TSP (Total Suspended Particulates), timah hitam, SO₂, CO, CO₂, HC, NO_x. Menurut Bank Dunia di masa yang akan datang, sektor transportasi akan mengalami pertumbuhan 6-8 % pertahun, yang berarti polusi udarapun akan meningkat dengan cepat. Penggunaan bahan bakar di sector transportasi dan polusi udara sebagai dampaknya, maka pada tahun 2000 akan meningkat 2 kali dari level tahun 1900, tahun 2010 menjadi 5 kalinya dan pada tahun 2020 menjadi 9 kalinya (World Bank, 1995).

Penyebaran polusi udara oleh angin ke penerima pencemaran udara dapat terjadi dalam beberapa tingkat. Pada skala mikro/lokal, pencemaran udara hanya mempengaruhi kualitas udara setempat, dalam lingkup yang relatif terbatas, misalnya pencemaran udara oleh debu. Selain itu terdapat pula pencemaran udara dalam skala meso atau regional, yang dampaknya dapat mempengaruhi areal yang lebih luas contohnya hujan.

Dampak dari gas buang seperti NH₃, NO₂, SO₂ dan aerosol akan mempengaruhi kadar keasaman air hujan. Aerosol dan gas-gas NH₃, NO₂, SO₂ yang terlarut dalam udara dapat dibersihkan dari atmosfer melalui proses pembersihan secara kering (*dry deposition*) atau basah (*wet deposition*). Menurut Seinfeld J.H., (1986) garis batas keasaman air hujan adalah 5,6 dimana berada dalam garis kesetimbangan dengan konsentrasi CO₂ atmosfer 330 ppm. Bila kadar keasaman air hujan di bawah 5,6 dikatakan telah terjadi hujan asam. Penyebaran SO₂ maupun NO₂ sampai ke penerima akan mempengaruhi kualitas udara penerima maupun kondisi keasaman air hujannya. SO₂ dan NO₂ setelah mengalami proses oksidasi dan proses cair dengan air akan menjadi sulfat dan nitrat yang merupakan faktor penyumbang keasaman air hujan.

Untuk melihat arah penyebaran gas SO₂ dan NO₂ dan dampaknya terhadap hujan asam di suatu daerah dipergunakan model penyebaran polusi udara TAPM (The Air Pollution Model). TAPM adalah software yang dapat digunakan untuk mensimulasikan prediksi meteorology dan penyebaran polutan dalam tiga dimensi. Software ini merupakan pengembangan dari LADM (Lagrangian Atmospheric Dispersion Model) yang keduanya dikembangkan oleh CSIRO, Australia. TAPM ini bekerja pada system window, sehingga lebih memudahkan bagi pengguna. Simulasi penyebarannya dapat dilihat dengan software GIS (Graphical Information System) dalam tampilan dua dan tiga dimensi; dan secara *numeric* dapat dibaca dengan program Notepad atau Excel (Hurley, 1999).

2. LOKASI DAN METODE

Lokasi sampling terbagi pada empat lokasi yaitu Kebon Kalapa (Bandung Pusat) adalah daerah padat transportasi dan perumahan, Kopo (Bandung Selatan) mewakili daerah perumahan, Jl. RE. Martadinata (Bandung Timur) sebagai daerah padat transportasi dan perumahan, Cipedes (Bandung Barat) sebagai daerah padat transportasi dan perumahan, dan Dago adalah daerah perumahan dan kawasan hijau di Bandung bagian Utara.

Sampel air hujan dikumpulkan setiap hari hujan dari bulan Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di kota Bandung (6° 54' LS, 107° 35' BT), pada ketinggian 743 m di atas permukaan laut. Selanjutnya sampel air hujan dianalisa di Laboratorium untuk mendapatkan parameter pH, ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium. pH air hujan diukur pHmeter Orion model SA720, ketelitian 0,05 dan kalibrasi dengan buffer 7 and 4. Ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium diukur dengan menggunakan spectrophotometer. Metode turbidimetri Ba₂SO₄ dengan menggunakan kalibrasi larutan standar Na₂SO₄ untuk mengukur ion sulfat dalam air hujan. Ion nitrat ditentukan dengan metode

KaNaTartrat-NaOH, yang menggunakan larutan standar KNO_3 . Sedangkan ion amonium ditentukan dengan metode *Indophenol*, menggunakan larutan standar NH_4Cl .

Di tempat yang sama dilakukan pula sampling untuk gas SO_2 dan NO_2 secara *passive sampler* selama satu bulan dari Agustus 2000 sampai Agustus 2001, dilanjutkan Januari 2002 sampai Agustus 2002. Selanjutnya sampel dianalisa untuk mendapatkan SO_2 dan NO_2 . SO_2 ditentukan dengan Ion chromatografi DX500, kalibrasi dengan larutan standar Na_2SO_4 . Untuk NO_2 menggunakan Spectrophotometer dengan metoda NEDA (standar NaNO_2).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Simulasi Penyebaran Polusi dengan TAPM (The Air Pollution Model)

Dengan menggunakan TAPM dibuat simulasi penyebaran polusi udara dari perempatan depan RSUD Hasan Sadikin sampai pintu tol Pasteur, simulasi penyebaran polusi udara untuk daerah lain seperti Kebon Kalapa (Jl. Yuda), Martadinata (perempatan Jl. A.Yani), dan Kopo (Jl. Terusan Kopo ke Utara sampai jalan tol Padaleunyi), sebagai contoh kasus untuk bulan Januari, April, Juli dan Oktober 1999. Untuk proses running TAPM dibutuhkan input topografi domain yang ditinjau, data meteorologi, dan polutan.

Topografi dan sinoptik meteorologi enam jaman telah tersedia dalam format yang telah dibentuk oleh CSIRO untuk wilayah Indonesia dan Malaysia. Untuk penelitian ini diambil data terbaru yang dimiliki LAPAN tahun 1999. Simulasi dilakukan dengan mengambil bentuk polutan one tracer mode (TRI), yaitu untuk jenis polutan TAPM (Airbone Particulate Matter), yang berarti tidak ada proses kimiawi dan deposisi selama perjalanan polutan tersebut.

Gambar 3.1 adalah lintasan penyebaran polusi dari perempatan depan RSUD Hasan Sadikin sampai pintu tol Pasteur pada musim penghujan (8-12 Januari 1999), musim peralihan hujan ke kemarau (12-16 April), musim kemarau (6-10 Juli 1999) dan musim peralihan kemarau ke hujan (21-23 Oktober 1999). Dari kondisi lintasan penyebaran polusi udara terlihat perubahan lintasan sesuai dengan musimnya. Pada bulan Januari 1999 simulasi penyebaran polusi udara bergerak dari arah Timur Laut ke arah Barat Daya melintasi lokasi pengambilan sampel. Awan pembawa polutan dari sebelah Timur Laut lokasi akan bergerak ke Barat Daya. Bila terjadi proses pencucian atmosfer oleh hujan di daerah Djundjungan maka polutan tersebut tentunya akan mempengaruhi komposisi kimia air hujan di Cipedes. Lintasan ini bergerak sampai ke bagian yang lebih tinggi disebelah Barat Daya kota Bandung, tetapi pada saat ada celah di bagian Barat cekungan Bandung ke arah Padalarang maka lintasan menerobos celah Barat tersebut. Sedangkan lintasan pada bulan April bergerak dari Timur Laut ke Barat Daya agak bergeser ke arah Barat. Kawasan disebelah Timur laut merupakan daerah perumahan dan banyak tanaman. Pada bulan Juli yang mana diasumsikan mewakili musim kemarau, penyebaran polusi bergerak ke arah Barat. Maka pada musim tersebut sangat dipengaruhi polutan dari Timur lokasi yang merupakan kawasan transportasi. Lintasan ini pada saat mencapai dataran yang lebih tinggi terlihat di bagian Barat Daya cekungan terus berbelok ke bagian Barat cekungan Bandung arah Padalarang.

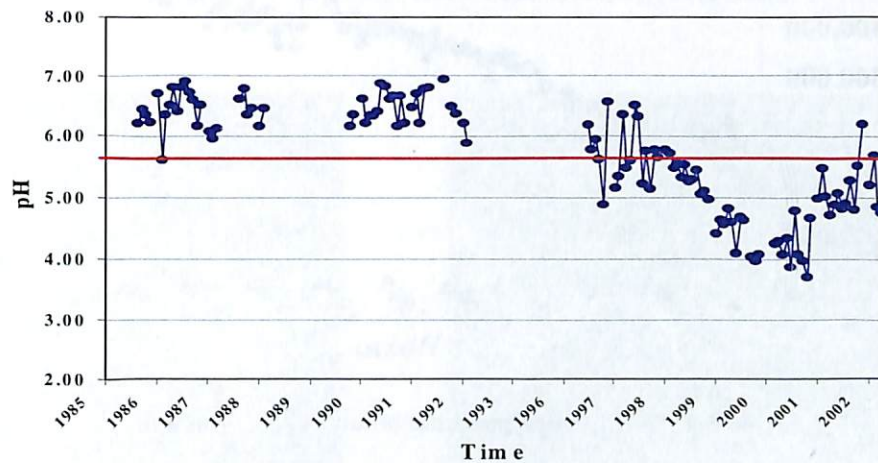


Gambar 3.1. Lintasan penyebaran polusi dari perempatan depan RSUD Hasan Sadikin sampai pintu tol Pasteur. Tanda panah adalah lokasi pengambilan sampel di LAPAN Jl.Dr. Djundjuna –Bandung

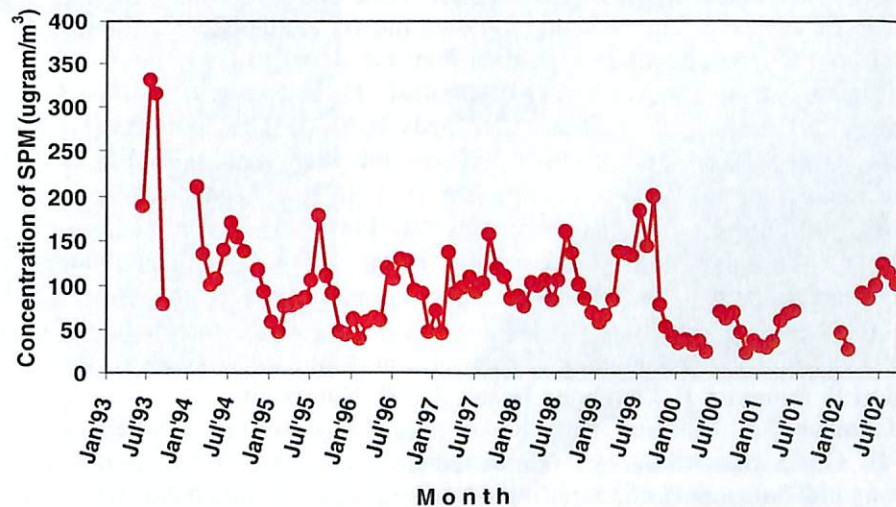
Keasaman air hujan (pH) rata-rata bulanan pada tahun 1999 berkisar 3,97-4,67 di Cipedes (gambar 3.2). Kondisi terburuk terjadi tiga bulan terakhir dari Oktober sampai Desember. Pada bulan tersebut penyebaran polusi bergerak dari Tenggara ke arah Barat Laut (gambar 3.1), berarti sumber polutan berasal dari jalan raya perempatan Pasteur-Pasir Kaliki. Pada bulan-bulan di musim peralihan kemarau ke hujan ada kecenderungan pH menurun atau keasaman air hujan meningkat, hal ini dikarenakan proses pencucian terhadap polutan atau partikel yang tinggi pada musim kemarau. Maka hujan yang terjadi di musim SON (September-Oktober-Nopember) perlu diperhatikan dampaknya terhadap lingkungan atau kesehatan.

Selama kurun waktu 16 tahun dari 1985-2001 terjadi kondisi yang terburuk pada tahun 1999. Dari rata-rata tahunan pH 6,30 pada tahun 1985 menjadi 4,40 pada tahun 1999, terdapat penurunan 30,15 %. Tetapi kondisi ini mulai membaik pada tahun 2002. Angka pH turun sejak tahun 1997, perlu diketahui tahun tersebut terjadi musim kemarau panjang karena El Nino sampai terasa dampaknya di tahun 1998.

Kemungkinan ada pengaruh partikel tanah pada musim kemarau dan peralihan kemarau ke hujan yang cukup tinggi setiap tahunnya (gambar 3.3), dan juga peningkatan jumlah kendaraan yang tinggi di tahun 1997 (gambar 3.4). Pada tahun 1997 rata-rata bulanan jumlah kendaraan adalah 437.036 buah.

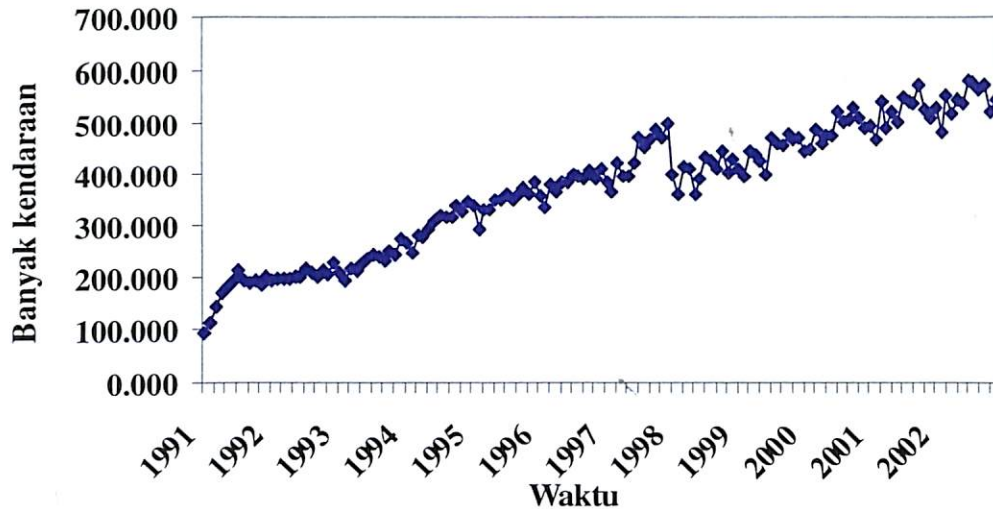


Gambar 3.2. Kecenderungan keasaman air hujan di Cipedes (Jl. Dr. Djundjunan) Bandung 1985-2002



Gambar 3.3. Variasi bulan suspended particulate matter (SPM) Cemara-Cepedes Bandung 1993-2002 (data BMG)

Jumlah kendaraan yang lewat tol Pasteur dari tahun 1991 sampai 1999 terus meningkat. Rata-rata bulanan tahun 1991 adalah 172.297 buah telah menjadi 544.555 buah pada tahun 2002, dari nilai rata-rata ada kenaikan 216 % atau 3,16 kalinya. Jumlah total kendaraan dalam tahun 1991 adalah 2.067.568 buah telah menjadi 6.534.655 buah pada tahun 2002. Melihat jumlah kendaraan yang terus bertambah dari tahun ke tahun, maka perlu diwaspadai dampak polusi udara yang ditimbulkannya.

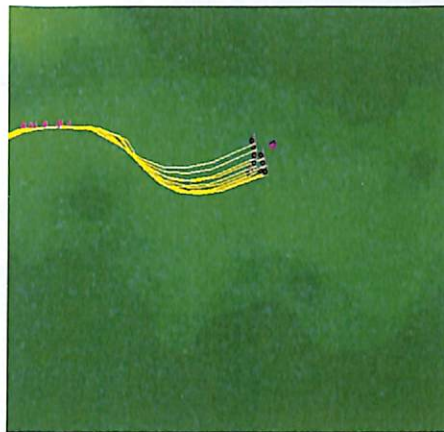


Gambar 3.4 jumlah kendaraan tahun 1997 di Bandung

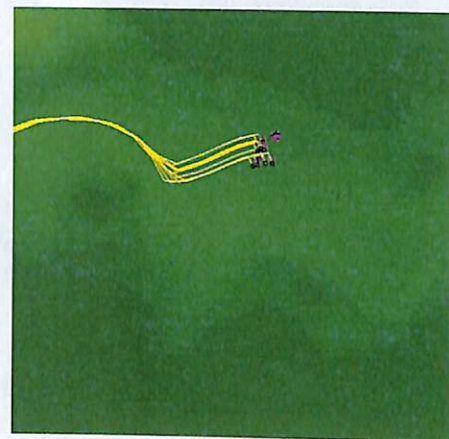
Hasil simulasi penyebaran polusi udara untuk daerah lain seperti Kebon Kalapa (gambar 3.5) dengan lokasi pengambilan sampel di Jl. Yuda. Lintasan penyebaran polusi dari sekitar terminal Kebon Kalapa tepatnya sekitar Jl. Otista dan sekitarnya pada 8-12 Januari 1999 dipengaruhi angin dari Timur Laut menuju Barat Daya, bulan ini diasumsikan mewakili musim penghujan. Pada musim penghujan berdasarkan lintasan penyebaran polusi, maka sumber polutan berasal dari Jl. Lengkong Besar. Musim peralihan hujan ke kemarau diwakili simulasi 12-16 April 1999 yaitu lintasan penyebaran polusi berasal dari Timur Laut agak bergeser ke Timur menuju ke Barat Daya agak bergeser ke Barat. Berarti lintasan ini akan membawa polutan dari Jl. Lengkong Besar dan Jl. Sasak Gantung dan Jl. Lengkong Tengah. Musim kemarau diwakili 6-10 Juli 1999, lintasan penyebaran dari Timur lurus menuju Barat. Lintasan akan membawa polutan dari Jl. Lengkong Besar, Jl. Karapitan, Jl. Pungkur dan Lengkong Tengah. Sedangkan musim peralihan kemarau ke hujan yang diwakili 21-23 Oktober 1999, lintasan dari Tenggara menuju ke Barat Laut dan kemudian bergeser ke Barat lurus sampai akhirnya menuju celah Barat Bandung. Lintasan ini membawa polutan dari Jl. Pungkur, Jl. Lengkong Besar, dan Jl. Karapitan.

Gambar 3.5. Lintasan penyebaran polusi dari sekitar sub terminal Kebon Kalapa, Jl. Otista dan sekitarnya. Tanda panah adalah lokasi pengambilan sampel Lokasi pengambilan sampel (Jl. Yuda). Lintasan penyebaran polusi dari sekitar terminal bus Cicaheum, Jl. Ahmad yani sampai perempatan Jl. Martadinata-Jl. A.Yani (lokasi pengambilan sampel air hujan dan gas) pada gambar 3.6. Pada 8-12 Januari 1999 diasumsikan mewakili musim penghujan mempunyai lintasan dari arah Timur Laut menuju Barat Daya akan membawa polutan sepanjang Jl. Ahmad Yani yang padat lalu lintas dan mempengaruhi keasaman air hujan di lokasi pengambilan sampel. Pada musim peralihan hujan ke kemarau dengan hasil simulasi 12-16 April 1999 sumber lintasan dari Timur terus ke Barat, selanjutnya agak ke Barat Daya, maka lintasan akan membawa polutan dari Timur yaitu Jl. Ahmad Yani dan Jl. Laswi. Sedangkan 6-10 Juli 1999 diasumsikan mewakili musim kemarau yaitu lintasan penyebaran polusi dari Timur menuju ke Barat, bila sampai pada Bandung sebelah Barat bertemu dataran

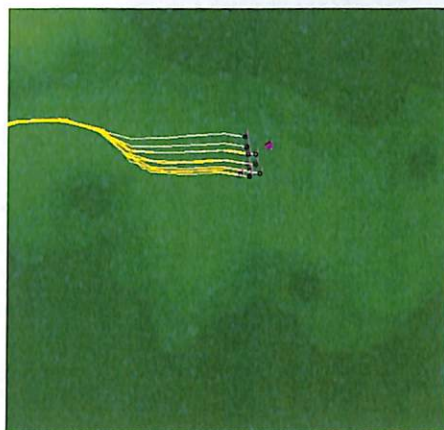
tinggi akan berbelok sedikit ke Utara kemudian masuk celah barat di Padalarang. Lintasan ini membawa polutan dari Jl. Ahmad Yani dan perempatan Martadinata yang padat kendaraan. Pada 21-23 Oktober 1999 diasumsikan mewakili musim peralihan kemarau ke penghujan, lintasan membawa polutan dari Tenggara yaitu Jl. Laswi yang tidak begitu padat kendaraan dibandingkan Jl. Ahmad Yani dan Jl. Martadinata. Lintasan ini bergerak dari Tenggara sedikit ke Barat Laut selanjutnya ke Barat.



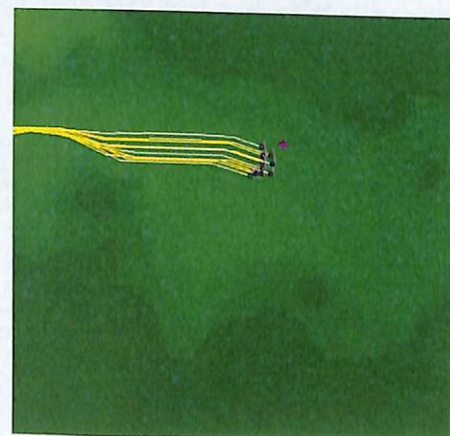
8-12 Januari 1999



12-16 April 1999



6-10 Juli 1999

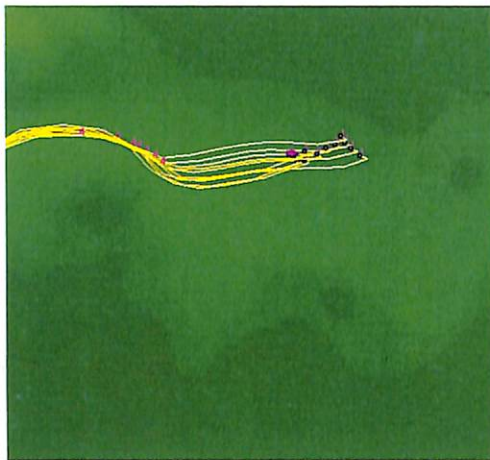


21-23 Oktober 1999

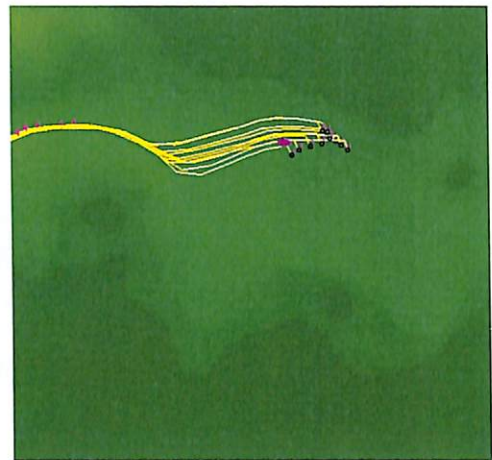
Gambar 3.5. Lintasan penyebaran polusi di sekitar sub terminal Kebon Kalap, Jl. Otista dan sekitarnya. Tanda panah adalah lokasi pengambilan sampel Jl. Yuda..

Lintasan penyebaran polusi dari sekitar terminal bus Cicaheum, Jl. Ahmad Yani sampai perempatan Jl. Martadinata-Jl. A. Yani (lokasi pengambilan sampel air hujan dan gas) pada gambar 3.6. Pada 8-12 Januari 1999 diasumsikan mewakili musim penghujan mempunyai lintasan dari arah Timur Laut menuju Barat Daya akan membawa polutan sepanjang Jl. Ahmad Yani yang padat lalu lintas dan mempengaruhi keasaman air hujan di lokasi pengambilan sampel. Pada musim peralihan hujan ke kemarau dengan hasil simulasi 12-16 April 1999 sumber lintasan dari Timur terus ke Barat, selanjutnya agak ke Barat Daya, maka lintasan akan membawa polutan dari Timur yaitu Jl. Ahmad Yani

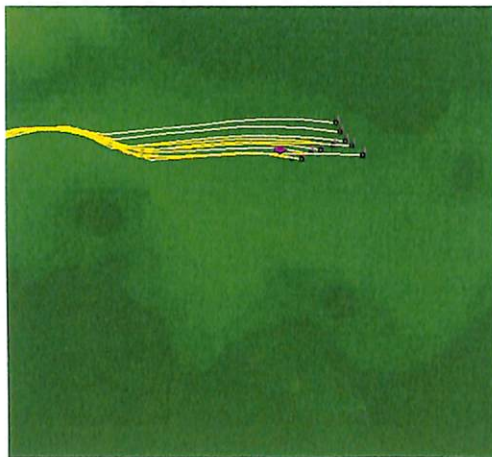
dan Jl. Laswi. Sedangkan 6-10 Juli 1999 diasumsikan mewakili musim kemarau yaitu lintasan penyebaran polusi dari Timur menuju ke Barat, bila sampai pada Bandung sebelah Barat bertemu dataran tinggi akan berbelok sedikit ke Utara kemudian masuk celah barat di Padalarang. Lintasan ini membawa polutan dari Jl. Ahmad Yani dan perempatan Martadinata yang padat kendaraan. Pada 21-23 Oktober 1999 diasumsikan mewakili musim peralihan kemarau ke penghujan, lintasan membawa polutan dari Tenggara yaitu Jl. Laswi yang tidak begitu padat kendaraan dibandingkan Jl. Ahmad Yani dan Jl. Martadinata. Lintasan ini bergerak dari Tenggara sedikit ke Barat Laut selanjutnya ke Barat.



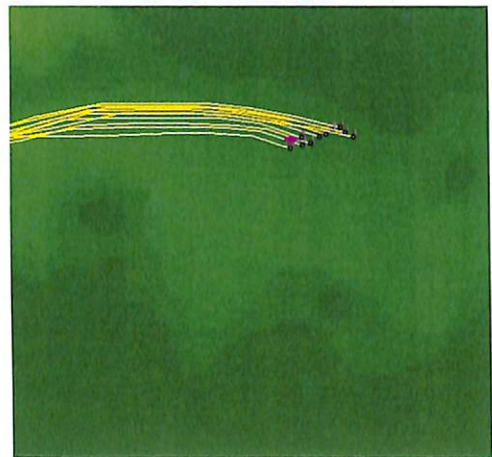
8-12 Januari 1999



12-16 April 1999



6-10 Juli 1999

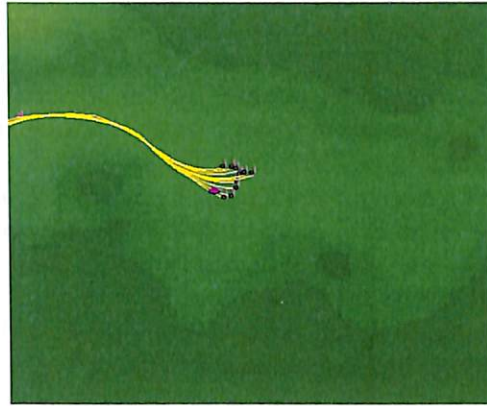


21-23 Oktober 1999

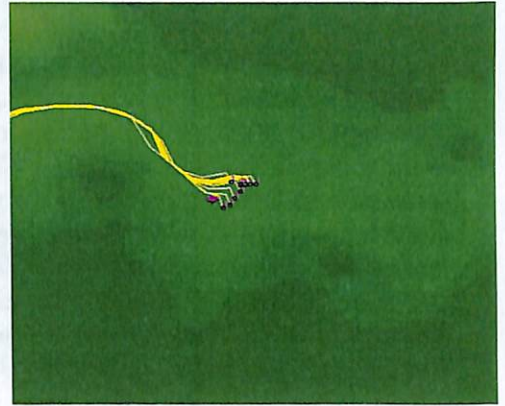
Gambar 3.6. Lintasan penyebaran polusi dari sekitar terminal bus Cicaheum, Jalan Ahmad Yani sampai perempatan Ahmad Yani Martadinata
Tanda panah adalah lokasi pengambilan sampel (Jl. Martadinata 166)

Gambar 3.7 adalah lintasan penyebaran polusi dari Jl. Terusan Kopo ke Utara sampai jalan tol Padaleunyi, yang mana pada 8-2 Januari 1999 diasumsikan mewakili musim penghujan terlihat lintasan berasal dari Tenggara terus menuju Barat Laut.

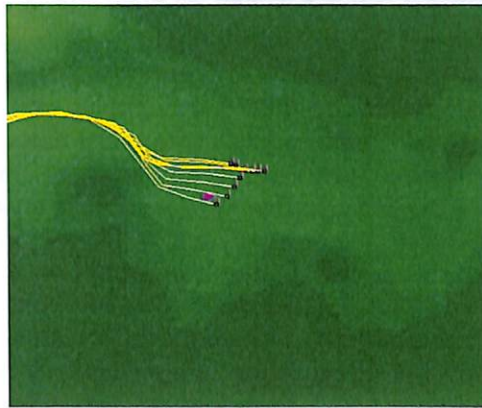
Lintasan ini membawa polutan dari daerah sungai Citarum dan kebun disekitarnya mempengaruhi penerima di Jl. Terusan Kopo dekat sungai Citarum. Lintasan ini menuju ke arah Barat Laut sampai di daerah yang tinggi di dekat celah Barat Bandung akan dibelokkan dan masuk celah barat tersebut.



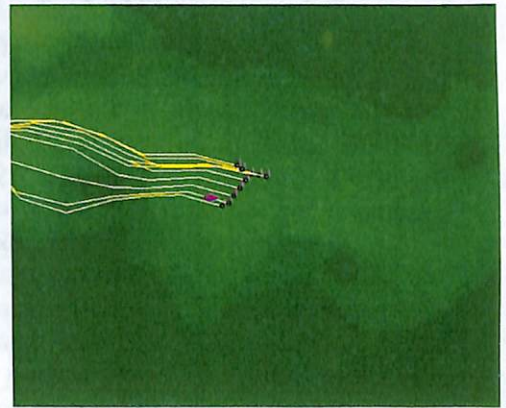
8-12 Januari 1999



12-16 April 1999



6-10 Juli 1999



21-23 Oktober 1999

Gambar 3.7. Lintasan penyebaran polusi dari Jl. Terusan Kopo ke utara sampai jalan tol Padaleunyi. Tanda panah adalah lokasi pengambilan sampel (Jl. Terusan Kopo)

Lintasan penyebaran polusi dari ke empat titik yaitu dari perempatan depan RSU Hasan Sadikin sampai pintu tol Pasteur, di sekitar sub terminal Kebon Kelapa, di sekitar terminal bus Cicaheum, Jl. Ahmad Yani sampai perempatan Jl. Ahmad Yani- Jl. Martadinata dan di Kopo (Jl. Terusan Kopo ke Utara sampai jalan tol Padaleunyi) pada gambar 3.1; gambar 3.5; gambar 3.6 dan gambar 3.7 mempunyai pola lintasan penyebaran polusi yang sama, bila sampai di dataran tinggi Barat Bandung akan dibelokkan menuju celah Barat yang ada di dekatnya. Pola lintasan bergerak ke celah di bagian Barat kota Bandung menuju Padalarang. Dimana lintasan yang sebelumnya bergerak ke arah Selatan Barat Daya, atau Barat Laut dari posisi titik pengambilan sampel di lokasi yang telah disebutkan sebelumnya bila menabrak dataran tinggi yang ada di bagian Selatan, Barat Daya atau Barat Laut akan berubah arah ke celah Barat cekungan Bandung.

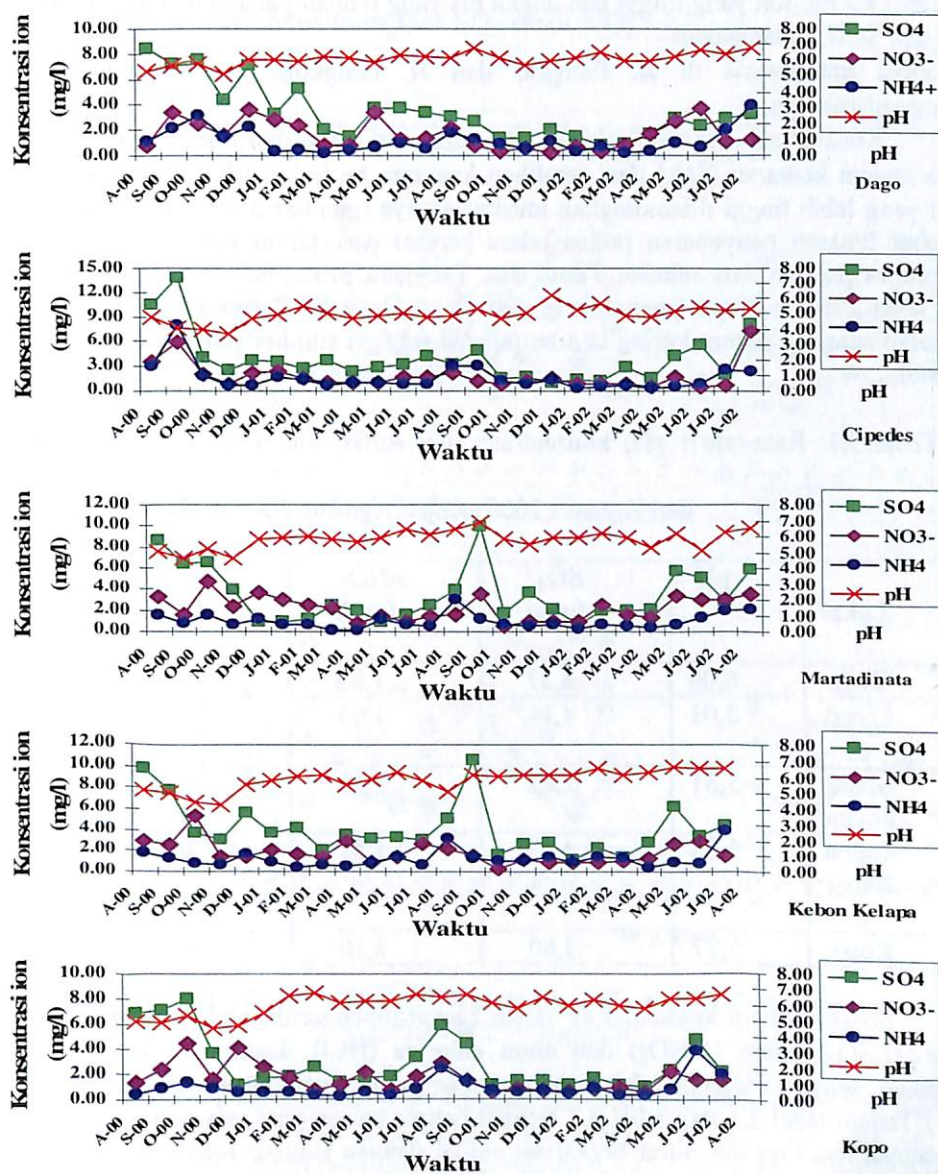
3.2. Penyebaran polutan terhadap variasi musiman komponen air hujan.

Berdasarkan pengamatan selama 2 tahun (Agustus 2000-Agustus 2002) di Bandung kecenderungan musiman dari setiap komponen kimia air hujan yaitu ion sulfat, ion nitrat, ion amonium dan keasaman air hujan diperlihatkan pada gambar 3.8. Dari lima lokasi di Bandung rata-rata konsentrasi bulanan dari setiap komponen hampir sama yaitu tinggi di musim kemarau Juni-Juli-Agustus (J-J-A) dan musim peralihan September-Oktober-Nopember (S-O-N), serta rendah di musim hujan Desember-Januari-Februari (D-J-F) dan peralihan Maret-April-Mei (M-A-M). Nilai pH bulanan dari Agustus 2000 sampai Desember 2000 bervariasi 3,69-5,85 untuk empat lokasi yaitu Cipedes; Martadinata; Kebon Kalapa dan Kopo, berarti kondisi hujan di daerah tersebut sudah menunjukkan angka di daerah batas normal 5,6 untuk hujan asam. Maka Bandung pada akhir tahun 2000 mengalami hujan asam yang merata di semua daerah yang disebutkan di atas. Pada tahun 2001 dari Januari sampai Desember 2001 nilai pH bervariasi 5,48-6,91 dengan kondisi terburuk di Cipedes yaitu 4,70-6,19 (gambar 3.8). Sedangkan tahun 2002 dari Januari sampai Agustus nilai pH bervariasi 4,73-6,75 dan daerah yang terkena hujan asam adalah Cipedes. Melihat variasi angka pH dari gambar 3.8 di tahun 2001 dan 2002 dapat dikatakan bahwa hujan asam hanya terjadi di Cipedes, sedangkan daerah lain tidak.

Dalam kurun waktu Agustus 2000 sampai Agustus 2002 rata-rata nilai pH di lima lokasi menunjukkan daerah Dago yang terletak di Bandung Utara adalah yang paling bersih yaitu 6,06. Sedangkan daerah Cipedes mempunyai pH rata-rata 5,01 yang berarti daerah tersebut mengalami hujan asam. Hal ini dikarenakan angka tersebut berada di daerah batas suatu daerah dikatakan telah terkena hujan asam yaitu dibawah angka 5,6 (Seinfeld dan Pandis, 1998). Kondisi pH besar kecil tercermin pada kandungan ion-ion seperti ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium yang mendukungnya.

Dengan mengasumsikan karakteristik arah angin dari tahun 1999 sampai tahun 2002 adalah sama, maka hasil simulasi penyebaran polusi untuk tahun 1999 ini saya coba untuk menerangkan variasi musiman dari kimia air hujan di Cipedes, Martadinata, Kebon Kalapa, dan Kopo. Pada musim kemarau (JJA) dan peralihan kemarau ke penghujan (SON) di Cipedes dimana penerima di Jl. Junjungan, konsentrasi rata-rata bulanan ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium lebih tinggi dibandingkan musim lainnya dikarenakan polutan berasal dari daerah padat transportasi di Jl. Junjungan dan Jl. Pasir Kaliki berada di sebelah Timur penerima. Pada kedua musim tersebut pola penyebaran polutan dari Timur dan Tenggara menuju ke Barat seperti diperlihatkan gambar 3.1. Maka daerah Cipedes sangat dipengaruhi oleh polutan yang berasal dari daerah padat transportasi seperti Jl. Junjungan, Jl. Pasir Kaliki, perempatan Pasteur dan Jl. Setia Budi yang berada di sebelah Timur daerah penerima.

Di Martadinata (lokasi sampel di perempatan Martadinata-Ahmad Yani) pada musim kemarau (JJA) dan musim peralihan kemarau ke penghujan, konsentrasi rata-rata bulanan ion sulfat, ion nitrat, ion amonium lebih tinggi dibandingkan musim lainnya (gambar 3.8). Dari gambar 3.6 dapat dijelaskan bahwa kondisi tersebut dipengaruhi polutan dari Jl. Ahmad Yani, perempatan Martadinata-Ahmad Yani dan Jl. Lingkar Selatan dimana penyebaran polutan dari Timur dan Tenggara menuju ke Barat atau lokasi penerima. Daerah Martadinata dipengaruhi polutan dari daerah padat transportasi Jl. Ahmad Yani (dari terminal bus Cicaheum-pasar Kosambi) dan Jl. Lingkar Selatan.



Gambar 3.8. Variasi bulanan pH dan ion-ion sulfat, nitrat dan amonium dari Agustus Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di Bandung (Dago, Cipedes, Martadinata, Kebon Kalapa, Kopo).

Di Kebon Kalapa (lokasi sampel di Jl. Yuda) pada musim kemarau (JJA) dan musim peralihan kemarau ke penghujan, konsentrasi rata-rata bulanan ion sulfat, ion nitrat, ion amonium lebih tinggi dibandingkan musim lainnya (gambar 3.8). Pada musim kemarau (JJA) kimia air hujan dipengaruhi polutan yang berasal dari Jl. Lengkong Besar, Jl. Karapitan, Jl. Pungkur dan Lengkong Tengah. Lintasan penyebaran dari Timur lurus menuju Barat ke daerah penerima. Sedangkan musim peralihan kemarau ke hujan pada bulan SON, lintasan dari Tenggara membawa polutan dari Jl. Pungkur, Jl. Lengkong Besar, dan Jl. Karapitan. menuju ke Barat Laut dan kemudian bergeser ke Barat lurus sampai akhirnya menuju celah Barat Bandung (gambar 3.5).

Konsentrasi ion-ion yang tinggi dan angka pH yang rendah pada kedua musim tersebut JJA dan SON, dikarenakan padatna transportasi di Jl. Pungkur dan Jl. Lengkong Besar yang dominan mempengaruhinya.

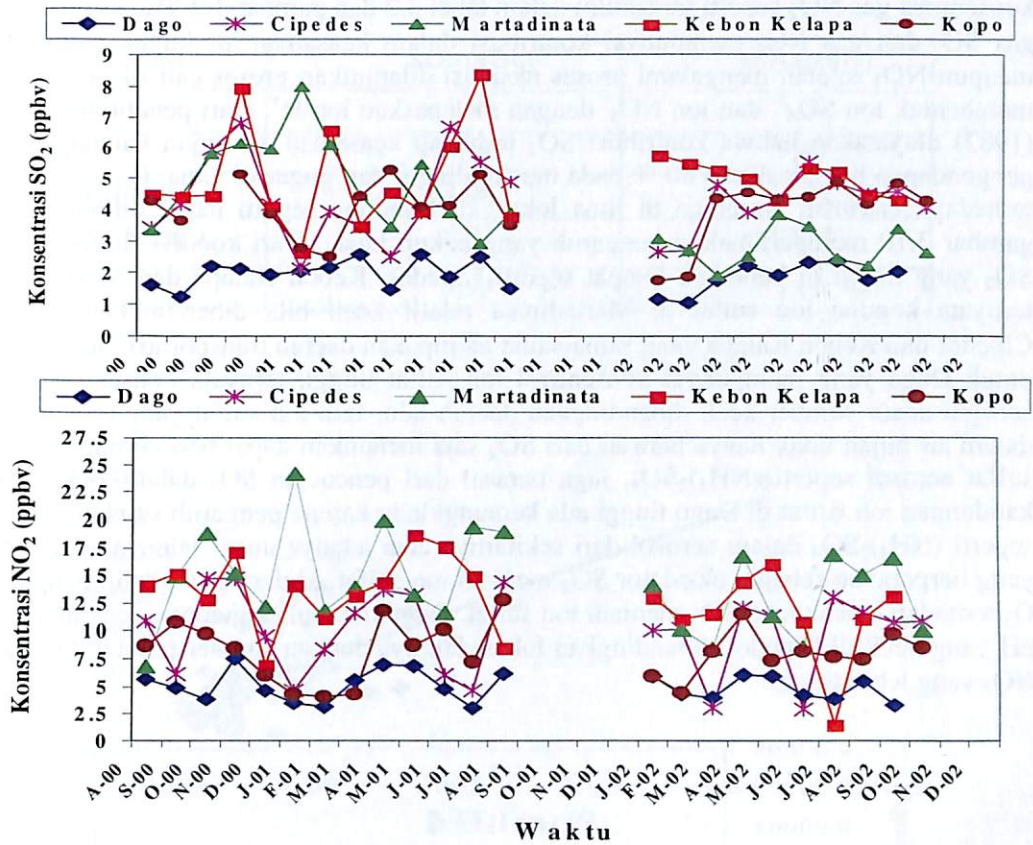
Konsentrasi rata-rata bulanan ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium di Dago pada musim kemarau (JJA) dan peralihan kemarau ke hujan (SON) memperlihatkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan musim lainnya (gambar 3.8). Pada kedua musim tersebut lintasan penyebaran polusi udara berasal dari Timur dan Tenggara, berarti membawa polutan dari sebelah Timur dan Tenggara penerima, yaitu sungai Citarum dan jalan Terusan Kopo (memanjang dari Barat Daya ke Timur Laut). Pada musim kemarau sungai Citarum kering dan berpotensi sebagai sumber polutan dari debu atau aerosol.

Tabel 3.1. Rata-rata : pH, konsentrasi ion sulfat, ion nitrat dan ion amonium dari Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di Bandung.

Lokasi	pH	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)
Dago	6,06	3,37	1,63	0,91
Cipedes	5,01	4,14	1,95	0,94
Martadinata	5,81	3,42	2,16	0,63
Kebon Kalapa	5,85	4,07	1,83	0,80
Kopo	5,77	3,60	2,10	0,62

Secara prinsip keasaman air hujan sangat dipengaruhi oleh senyawa-senyawa sulfat (H₂SO₄), nitrat (HNO₃) dan asam chlorida (HCl), karena itu kenaikan atau penurunan senyawa tersebut dapat menyebabkan angka pH turun atau naik (Delmas, 1983). Dalam tabel 3.1 dan tabel 3.2 terlihat bahwa konsentrasi rata-rata ion sulfat dan konsentrasi rata-rata ion nitrat bervariasi sesuai dengan sumber lokal yang menyertai masing-masing daerah. Pengaruh sumber lokal juga tercermin pada kandungan ion sulfat dan ion nitrat dalam air hujan. Di daerah transportasi seperti Cipedes, Martadinata, Kebon Kalapa dan Kopo mempunyai kandungan ion sulfat dan nitrat yang tinggi dibandingkan Dago. Kandungan ion amonium yang tinggi di Cipedes kemungkinan dipengaruhi amonium sulfat dalam aerosol, sedangkan Dago yang merupakan daerah lengang dan banyak tumbuh-tumbuhan kemungkinannya selain dipengaruhi oleh aerosol juga dimungkinkan adanya proses dinitrifikasi yang dihasilkan dari tumbuh-tumbuhan berupa N₂ yang selanjutnya menjadi NH₃ atau dari sumber alam berupa NH₃ dan berlanjut bereaksi dengan H₂O menjadi NH₄⁺. Konsentrasi ion NH₄⁺ (amonium) yang tinggi di Dago mempengaruhi pH air hujan, jadi daerah ini sangat dimungkinkan adanya pengaruh tumbuh-tumbuhan di sekelilingnya.

3.3. Variasi Musiman Gas SO_2 serta NO_2

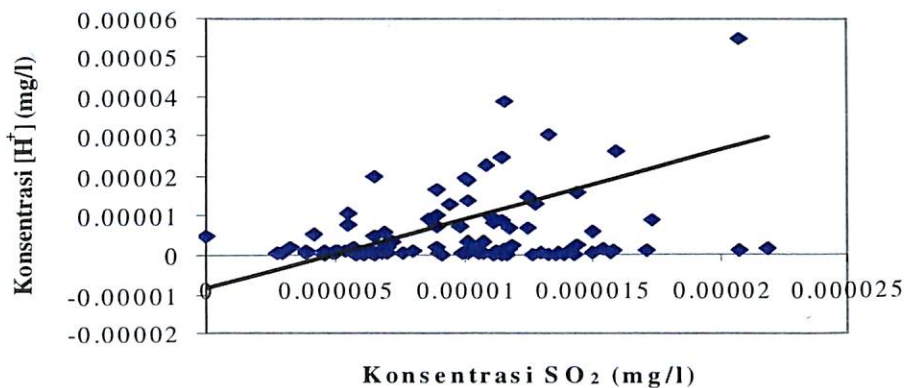


Gambar 3.9. Variasi bulanan gas NO_2 dan SO_2 selama Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di Bandung

Dari gambar 3.9 variasi musiman gas SO_2 dan NO_2 mempunyai pola yang hampir sama untuk lima lokasi yaitu Dago; Cipedes; Martadinata; Kebon Kelapa dan Kopo. Di musim peralihan September-Oktober-Nopember (S-O-N) dan musim kemarau Juni-Juli-Agustus (J-J-A) konsentrasi gas SO_2 dan NO_2 lebih tinggi dibandingkan di musim hujan Desember-Januari-Februari (D-J-F) dan peralihan Maret-April-Mei (M-A-M). Besarnya konsentrasi SO_2 dan NO_2 sangat berfluktuasi tergantung sumber transportasi di Bandung dengan nilai 1,24–8,41 dan 1,49–24,13. Daerah Dago baik SO_2 maupun NO_2 konsentrasinya relatif kecil bila dibandingkan lokasi lainnya yaitu 1,04–2,59 ppbv dan 2,96–7,50 ppbv secara berurutan. Konsentrasi SO_2 maupun NO_2 pada tahun 2002 lebih kecil dibandingkan tahun 2001, jadi terdapat penurunan polutan di Bandung untuk kelima lokasi yang diamati.

3.4. Pengaruh gas SO₂ dan NO₂ terhadap keasaman air hujan

Konsentrasi gas SO₂ di lima lokasi Bandung lebih kecil dibandingkan konsentrasi gas NO₂ seperti tercantum dalam tabel 3.2 dan gambar 3.9 Pada prinsipnya gas SO₂ dan gas NO₂ mempunyai kontribusi dalam keasaman air hujan, yaitu SO₂ maupun NO₂ setelah mengalami proses oksidasi dilanjutkan proses cair di awan akan membentuk ion SO₄²⁻ dan ion NO₃⁻ dengan melepaskan ion H⁺. Dari penelitian Xu Yu (1987) dinyatakan bahwa kontribusi SO₂ terhadap keasaman air hujan karena terjadi pengendapan hampir diatas 80 % pada musim dingin dan gugur di Cina. Pengaruh SO₂ terhadap keasaman air hujan di lima lokasi di Bandung seperti dapat dilihat dalam gambar 3.10 memperlihatkan pengaruh yang cukup kuat. Dari kondisi sumber lokal SO₂ yang tinggi di beberapa tempat seperti Cipedes, Kebon Kalapa dan Martadinata ternyata kondisi ion sulfat di Martadinata relatif kecil bila dibandingkan dengan Cipedes dan Kebon Kalapa yang sama-sama merupakan daerah transportasi. Sebaliknya untuk Dago yang mempunyai konsentrasi ion sulfat tinggi, ternyata konsentrasi SO₂ sebagai unsur sumber kecil dibandingkan daerah lain. Jadi ion sulfat yang terkandung dalam air hujan tidak hanya berasal dari SO₂ saja melainkan dapat berasal dari sumber sulfat aerosol seperti (NH₄)₂SO₄, juga berasal dari pencucian SO₂ dalam awan. Jika kandungan ion sulfat di Dago tinggi ada kemungkinan karena pengaruh sumber aerosol seperti (NH₄)₂SO₄ dalam aerosol dari sekitarnya atau adanya unsur lainnya seperti O₃ yang berperanan sebagai oksidator SO₂ menjadi ion sulfat. Maka perlu diteliti pengaruh O₃ terhadap mekanisme SO₂ menjadi ion sulfat. Demikian pula kaitannya dengan angka pH yang kecil di Cipedes dibandingkan lokasi lainnya dengan sumber polutan SO₂ dan NO₂ yang lebih tinggi.

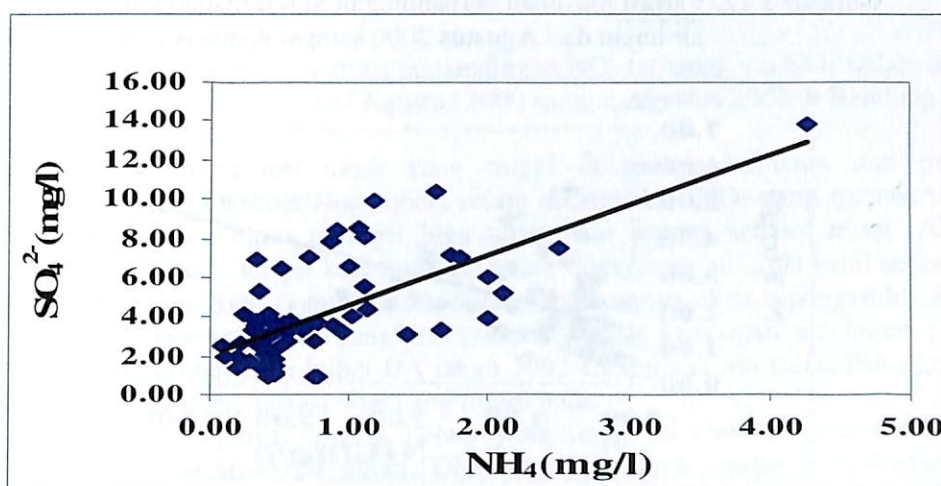


Gambar 3.10. Hubungan konsentrasi gas SO₂ dengan [H⁺]

Hal ini dapat dijelaskan dalam gambar 3.12 yaitu hubungan ion NH₄⁺ dengan ion SO₄²⁻ dalam air hujan yang mempunyai pengaruh positif.

Tabel 3.2. Konsentrasi rata-rata SO_2 dan NO_2 dari Agustus 2000 sampai dengan Agustus 2002 di Bandung.

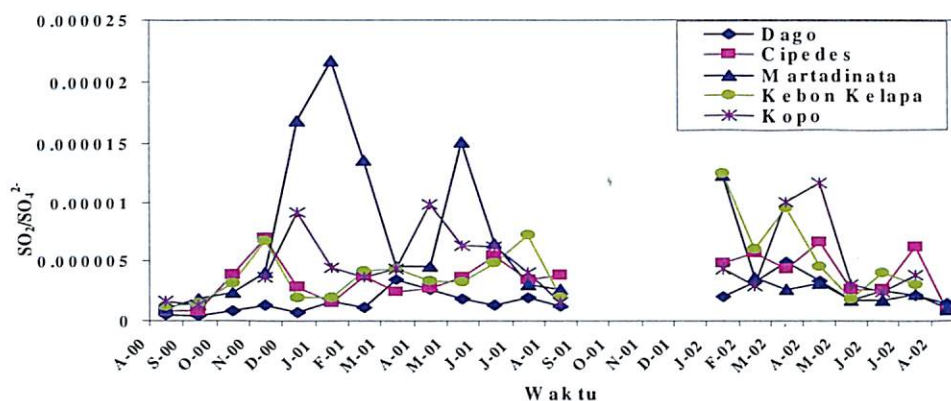
Lokasi	SO_2 (ppbv)	NO_2 (ppbv)
Dago	1,92	5,02
Cipedes	4,31	9,80
Martadinata	4,08	14,32
Kebon Kalapa	5,03	12,74
Kopo	3,93	7,95



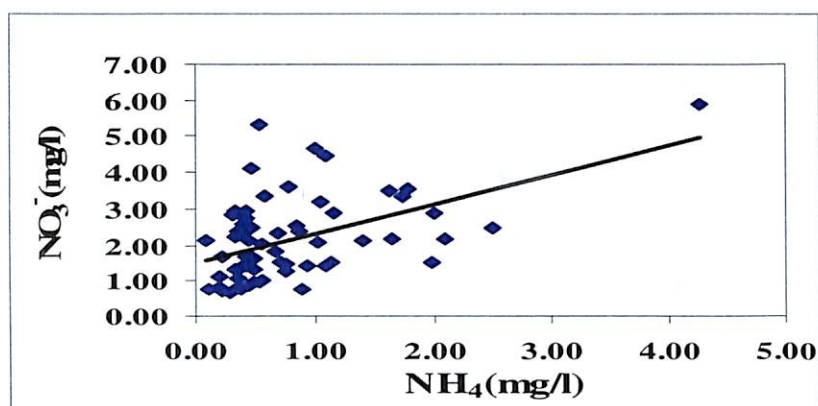
Gambar 3.11. Hubungan ion NH_4^+ dengan ion SO_4^{2-} dalam air hujan

Hubungan SO_2 dan ion SO_4^{2-} dalam air hujan dapat dilihat dalam gambar 3.12, yang mana kontribusi SO_2 naik di musim peralihan September-Oktober-Nopember 2000 dan kemarau Juni-Juli-Agustus 2001 serta turun di musim penghujan dan peralihan Maret-April-Mei 2001. Kecuali daerah Martadinata dan Kopo yang berbeda yaitu naik di musim penghujan dan musim peralihan Maret-April-Mei 2001. Kontribusi polutan SO_2 terhadap ion sulfat tertinggi terjadi pada bulan-bulan Juni-Juli-Agustus dan September-Oktober-Nopember. Dampak yang ditimbulkannya adalah meningkatnya derajat keasaman air hujan yang ditandai dengan menurunnya nilai pH air hujan.

Kemungkinan ada pengaruh amonium nitrat pada kandungan ion nitrat dalam air hujan bisa ditinjau dari hubungan ion amonium dengan ion nitrat. Pada gambar 3.13 terlihat kontribusi amonium nitrat terhadap ion nitrat tidak begitu besar dibandingkan dengan kontribusi amonium sulfat terhadap ion sulfat. Nilai koefisien korelasi untuk ion sulfat terhadap amonium adalah 0,67 sedangkan ion nitrat terhadap ion amonium adalah 0,50.



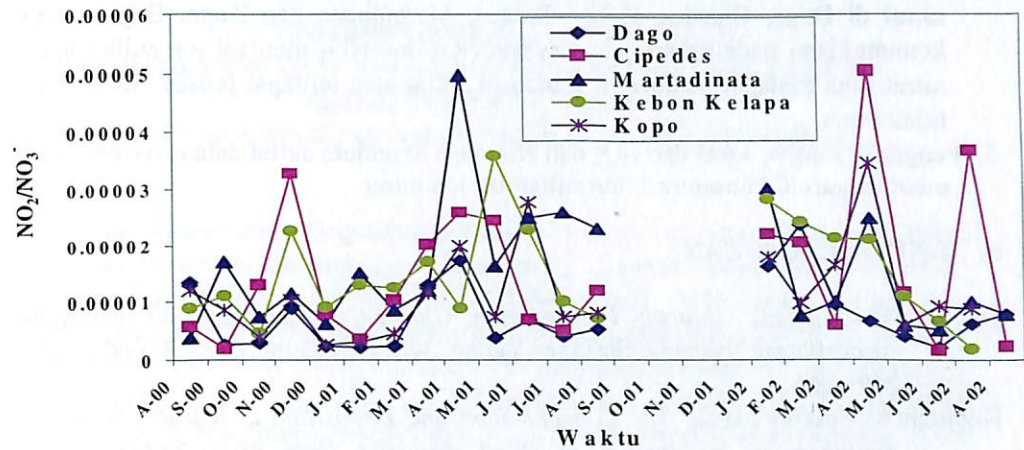
Gambar 3.12. Variasi musiman perbandingan SO_2 terhadap ion SO_4^{2-} dalam air hujan dari Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di Bandung



Gambar 3.13. Hubungan NH_4 dengan ion NO_3^- dalam air hujan

Konsentrasi gas NO_2 yang tertinggi diwakili oleh Martadinata, Kebon Kalapa dan Cipedes yaitu 14,32 ppbv; 12,74 ppbv dan 9,80 ppbv secara berurutan sebagai daerah padat transportasi. Konsentrasi gas NO_2 dari tiap-tiap daerah terlihat memberikan kontribusi pada kandungan ion nitrat seperti tercermin pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 dalam besaran nilai konsentrasinya, yaitu terpusat pada tiga daerah tersebut (Cipedes, Kebon Kalapa, Martadinata). Akan tetapi kondisi ion nitrat yang relatif kecil bila dibandingkan dengan sumber polutan NO_2 di Kebon Kalapa kemungkinan disebabkan adanya pengaruh proses oksidasi yang tidak maksimum, yaitu factor oksidator relatif kecil bila dibandingkan unsur utamanya.

Hubungan NO_2 dan ion NO_3^- dalam air hujan dapat dilihat dalam gambar 3.14, yang mana kontribusi NO_2 naik di musim peralihan September-Oktober-Nopember 2000 dan musim peralihan Maret-April-Mei serta turun di musim penghujan dan kemarau Juni-Juli-Agustus 2001 di Dago, Cipedes, Martadinata dan Kopo. Kecuali daerah Kebon Kalapa yang berbeda yaitu naik di musim peralihan September-Oktober-Nopember 2000 dan di bulan Maret sampai Juni 2001. Sedangkan pada tahun 2002 hasil pengamatan di lima lokasi menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu konsentrasi NO_2 tinggi di bulan Januari, April dan Juni, tetapi konsentrasi ion nitrat rendah di bulan tersebut. Hal ini kemungkinan adanya pengaruh proses oksidasi yang tidak maksimum, yaitu factor oksidator relatif kecil bila dibandingkan unsur utamanya



Gambar 3.15. Variasi perbandingan NO₂ terhadap ion NO₃⁻ dalam air hujan dari Agustus 2000 sampai Agustus 2002 di Bandung

Angka ion nitrat yang tinggi di musim kemarau dan peralihan SON (September-Oktober-Nopember) selain dikarenakan NO₂ yang memberikan kontribusi terhadap ion nitrat terdapat juga unsur lain seperti aerosol nitrat. Akibatnya akan menyebabkan derajat keasaman air hujan tinggi atau nilai pH kecil seperti yang terjadi pada tahun 2000 (gambar 3.8). Selain itu tentunya akan dipengaruhi oleh unsur basa seperti ion amonium yang mengontrol derajat keasaman air hujan menjadi netral, seperti terlihat pada bulan JJA tahun 2002 kandungan ion sulfat dan nitrat tinggi tetapi angka pH menunjukkan nilai yang tinggi pula.

Mengingat tingkat polusi yang tinggi di daerah Pasteur dan Cipedes dari kondisi keasaman air hujan. Disarankan perlunya ditanami tumbuhan-tumbuhan di daerah Tol Pasteur untuk menyaring polusi udara atau adanya hutan buatan sebagai paru-paru di sebelah Barat.

4. KESIMPULAN

1. Pola penyebaran sumber transportasi dari arah Timur dan Tenggara akan membawa polutan yang berdampak pada komponen air hujan di sebelah Barat sumber. Pola lintasan polutan setelah bergerak sesuai arah angin akan menerobos celah Barat cekungan Bandung.
2. Di Kota Bandung pada kemarau dan musim peralihan kemarau ke hujan komponen air hujan (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺) cenderung tinggi dibandingkan musim peralihan hujan ke kemarau dan musim penghujan. Kondisi konsentrasi tinggi dominan di daerah Cipedes, Kebon Kalapa dan Martadinata. Ketiga daerah ini pada musim kemarau dan peralihan kemarau ke hujan dipengaruhi oleh angin dari Timur dan Tenggara. Sumber transportasi dan aerosol di musim kemarau dan peralihan kemarau ke hujan dominan mempengaruhi komponen air hujan di Bandung.
3. Pada tahun 2000 di seluruh lokasi di Bandung yaitu Cipedes (Bandung Barat), Kebon Kalapa (Bandung Pusat), Martadinata (Bandung Timur), dan Kopo (Bandung Selatan) telah terjadi hujan asam, karena pH air hujan telah berada dibawah angka 5,6. Kecuali Dago (Bandung Utara) yang mewakili daerah bersih dan perumahan tidak terkena hujan asam. Kondisi keasaman air hujan di semua lokasi cenderung turun pada tahun 2001 dan 2002.

4. Terdapat ketidaksamaan pola SO₂ dengan ion sulfat dan pola NO₂ dengan pola ion nitrat di Dago, Cipedes, Kebon Kalapa, Martadinata dan Kopo. Bagaimanapun kemungkinan pada proses pembersihan SO₂ dan NO₂ menjadi ion sulfat dan ion nitrat juga terdapat pembersihan aerosol sulfat atau terdapat proses oksidasi yang tidak sama.
5. Pengaruh sumber lokal dari SO₂ dan NO₂ juga amonium sulfat dalam aerosol terlihat mempengaruhi konsentrasi ion sulfat dan ion nitrat.

5. DAFTAR RUJUKAN

- Delmas R.J., 1983, *Antartic Precipitation Chemistry*, Chemistry of Multiphase Atmospheric Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, 249 -264.
- Kenneth R. Sperbes, 1987, *The Concentration and Deposition of Nitrate, Sulfate and Amonium as a function of Wind direction from precipitation samples*, Atmospheric Environment, Vol. 21, No 12, hal 2629 - 2641.
- Seinfeld J.H. and Pandis SN., 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*, John Wiley and Sons. INC., New York, hal.1031.
- Seinfeld J.H., 1986, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley and Sons. INC., New York, hal 695 - 704.
- Nurlaini J., Yeti Priyati R., and Chunaeni L. , 1986, *Penelitian Keasaman air hujan 1986/1987*, Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1986/1987. Buku I, ISSN 0216.4663. p. 53-54, Pusat Riset Dirgantara LAPAN, Bandung.
- Nurlaini J., Yeti Priyati R., and Chunaeni L. , 1987, *Penelitian Keasaman air hujan 1986/1987*, Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1986/1987. Buku I, ISSN 0216.4663. p. 53-54, Pusat Riset Dirgantara LAPAN, Bandung.
- Nurlaini J., Yeti Priyati R., and Chunaeni L. , 1988, *Penelitian Keasaman air hujan 1986/1987*, Proceeding Program Penelitian Pusat Riset Dirgantara LAPAN 1986/1987. Buku I, ISSN 0216.4663. p. 53-54, Pusat Riset Dirgantara LAPAN, Bandung.
- Tuti Budiwati, Siti Asiaty, and Nanang Effendi AR, 1991, *Komposisi Kimia Air Hujan Di Bandung*, Proceeding Program Penelitian Dirgantara LAPAN, Number: D-III/10-91, Maret, LAPAN, Bandung, 71-80.
- Xu Yu, 1987, *Sulfur Dioxide in Atosphere Scavenging by Precipitation and Its Contribution to Acid Rain*, Proceeding of The Third Joint Conference of Air Pollution Studies in Asian Areas, Nov 30 - Dec 2, Tokyo, Japan, hal. 186 - 199.