

Studi Awal Sumber Deposisi Basah di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang Menggunakan Model PMF

Preliminary study of Wet Deposition Sources in Serpong, Jakarta, and Kotatabang Using the PMF Model

Rita Mukhtar¹, Retno Puji Lestari¹, Ricky Nelson¹, Bambang Hindratmo¹,
Muharam Syam Nugraha², dan Amallia Dainah³

¹Pusat Standardisasi Instrumen dan Kualitas Lingkungan Hidup, Kawasan PUSPIPTEK Gedung 210, Serpong – Tangerang Selatan 15310, T/F 021-7560981

²Pusat Informasi Layanan Iklim Terapan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa I No. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat, Kode pos: 10610, Indonesia

³Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jl. Ir. H. Djuanda No. 95, Ciputat, Tangerang Selatan 15412
E-mail: ritaiim@yahoo.com,

Diterima 13 April 2022, direvisi 25 April 2022, disetujui 25 Mei 2022

ABSTRAK

Studi Awal Sumber Deposisi Basah di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang Menggunakan Model PMF. Pertumbuhan ekonomi di Indonesia telah memicu kegiatan industri dan transportasi yang berpotensi menimbulkan pencemaran udara. Reaksi kimia senyawa asam dari polusi udara dengan air dan oksigen menghasilkan polutan yang lebih asam di atmosfer. Deposisi asam merupakan masalah lingkungan lintas batas karena polutan dapat tetap berada di atmosfer untuk waktu yang lama dan dapat menyebar hingga ribuan kilometer melintasi batas negara dan jauh dari sumber asal emisi. Pemantauan dilakukan di 3 (tiga) daerah yaitu mewakili daerah pedesaan (Serpong), daerah perkotaan (Jakarta), dan daerah terpencil (Kotatabang). Pengolahan data menggunakan konsep matematika untuk mengkorelasikan ion atau elemen dalam sebuah matriks, model *Positive Matrix Factorization* (PMF). Analisis data dilakukan terhadap data pemantauan komponen air hujan pada tahun 2015 hingga 2019. Contoh uji dikumpulkan melalui sampling deposisi basah dan dianalisis menggunakan metode kromatografi ion. Deskripsi potensi sumber diperoleh berdasarkan tipikal sumber pencemar. Hasil analisis menggunakan PMF diperoleh sumber pencemar di Serpong berasal dari tanah dan debu, kontribusi air laut, pertanian, pembakaran biomassa, dan proses pembakaran. Jakarta menunjukkan lima sumber pencemar yang dominan yaitu tanah dan debu, kontribusi laut, sumber pertanian, proses pembakaran serta pembakaran biomassa. Kotatabang juga menunjukkan lima sumber pencemar yang dominan yaitu kontribusi laut, pembakaran biomassa, proses pembakaran, sumber pertanian, tanah dan debu. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa sebagian besar sumber pencemar dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik. Dengan mengetahui karakteristik sumber pencemar diharapkan penanganan sumber pencemar lebih objektif.

Kata kunci: Deposisi basah, sumber pencemar, *Positive Matrix Factorization* (PMF), pencemaran udara.

ABSTRACT

Preliminary Study of Wet Deposition Sources in Serpong, Jakarta, and Kotatabang Using the PMF Model. Economic growth in Indonesia has triggered industrial and transportation activities that have the potential to cause air pollution. The chemical reaction of acidic compounds from air pollution with water and oxygen produces more acidic pollutants in the atmosphere. Acid deposition is a transboundary environmental problem because pollutants can remain in the atmosphere for long periods of time and can spread for thousands of kilometers across national boundaries and far from the source of

emission. Monitoring was carried out in 3 (three) regions, namely representing rural areas (Serpong), urban areas (Jakarta), and remote areas (Kotatabang). Data processing uses mathematical concepts to correlate ions or elements in a matrix, the Positive Matrix Factorization (PMF) model. Dataset analysis was carried out on rainwater component monitoring data from 2015 to 2020. The test samples were collected through wet deposition sampling and analyzed using the ion chromatography method. The description of potential sources is obtained based on the typical pollutant sources. The results of the analysis using PMF obtained that the sources of pollution in Serpong came from soil and dust, the contribution of sea water, agriculture, biomass burning, and the combustion process. Jakarta shows five dominant sources of pollution, namely soil and dust, marine contributions, agricultural sources, combustion processes and biomass burning. Kotatabang also shows five dominant sources of pollution, namely the contribution of the sea, biomass burning, combustion processes, agricultural sources, soil and dust. Therefore, it is concluded that most of the pollutant sources are influenced by anthropogenic activities. By knowing the characteristics of the pollutant source, it is hoped that the handling of the pollutant source will be more objective.

Keywords: *Wet deposition, pollutant sources, Positive Matrix Factorization (PMF), air pollution.*

1. Pendahuluan

Deposisi asam adalah fenomena alam yang terjadi akibat pencemaran udara (Hasan et al., 2018). Salah satu indikatornya ditandai dengan turunnya hujan bersifat asam ($\text{pH} < 5,6$) karena tingginya kadar polutan bersifat asam yang berdifusi di udara dan turun bersamaan dengan air hujan (Handriyono dan Dewi, 2018). Secara alami, hujan bersifat asam karena di dalam air hujan terkandung karbon dioksida (CO_2) yang larut sebagai asam lemah. Asam ini memiliki manfaat untuk melarutkan mineral - mineral dalam tanah yang dibutuhkan oleh tumbuhan dan hewan. Saat terjadi hujan, kabut yang membawa partikel ini akan turun menjadi hujan asam (Sholehudin, 2009).

Zat pencemar penyebab terjadinya deposisi asam adalah oksida-oksida sulfur (SO_x) dan oksida-oksida nitrogen (NO_x). Gas SO_x terdiri atas dua macam yaitu SO_2 dan SO_3 , sedangkan NO_x terdiri atas gas NO , NO_2 , NO_3 , N_2O , N_2O_4 dan N_2O_5 . Senyawa SO_x dan NO_x kemudian akan teroksidasi lalu bereaksi dengan uap air di udara membentuk senyawa asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) yang terendapkan di udara. Pengendapan asam di udara disebut sebagai deposisi asam (Sutanto dan Iryani,

2011). Proses terjadinya deposisi asam dapat berasal dari kegiatan industri (antropogenik) dan letusan gunung berapi (alami) yang mengeluarkan emisi SO_x dan NO_x ke udara. Namun, sebagian besar disebabkan oleh aktifitas manusia seperti penggunaan bahan bakar fosil, pembakaran batu bara dan peleburan logam (Sholehudin, 2009; Sudalma dan Purwanto, 2012).

Menurut Wardhana (2004), gas SO_2 di udara akan bereaksi dengan oksigen dan menghasilkan sulfur trioksida (SO_3), kemudian gas ini akan bereaksi dengan uap air dan membentuk asam sulfat (H_2SO_4). Jika polutan ini turun bersamaan dengan air hujan maka disebut deposisi basah (*wet deposition*), sedangkan bila partikel dari gas tersebut langsung turun ke permukaan bumi disebut deposisi kering (*dry deposition*) (EANET, 2010).

Peningkatan pencemaran udara di masa ini disebabkan oleh revolusi industri, dimana jumlah emisi sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) semakin meningkat. Industri yang menggunakan bahan bakar fosil dan batu bara menjadi penyebab utamanya. Penggunaan cerobong asap yang tinggi untuk mengurangi polusi wilayah lokal ikut berkontribusi dalam

penyebaran hujan asam yang lebih luas. Hal ini menyebabkan deposisi asam sering terjadi di daerah yang jauh dari lokasi sumber utama penyebabnya (Sholehudin, 2009).

Dampak yang ditimbulkan dari deposisi asam diantaranya dapat menyebabkan kerusakan hutan dan tanaman, mempengaruhi air, tanah dan berbagai makhluk hidup, hingga dapat menyebabkan matinya hutan-hutan karena emisi sulfur dioksida (SO_2). Namun, proses kerusakan hutan akibat deposisi asam terjadi sangat lambat dan lama sehingga diperlukan pemantauan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Deposisi asam mengakibatkan ketidakseimbangan nutrisi yang dapat merusak tanaman secara langsung dan lambat laun menyebabkan kerusakan hutan. Deposisi asam dapat menghilangkan unsur logam seperti kalsium (Ca) dan magnesium (Mg), jika mineral tanah kian menipis maka akan membuat pohon – pohon menjadi terhambat pertumbuhannya dan dapat menyebabkan kematian. Kerusakan hutan akibat deposisi asam telah terjadi di Chongqing, Cina pada masa lampau diakibatkan tingginya konsentrasi SO_2 hasil emisi industri pengolahan tembaga (Sholehudin, 2009).

Deposisi asam dapat juga menyebabkan terjadinya efek yang signifikan terhadap lingkungan biotik dan abiotik perairan terutama pada makhluk hidup yang tinggal di dalamnya. Makhluk hidup jenis plankton dan invertebrata yang paling pertama mati akibat tingginya kadar asam di lingkungan (Lestari dan Nelson, 2017). Kerusakan ekosistem telah terjadi di Skandinavia akibat asidifikasi air permukaan (Duan *et al.*, 2016).

Kerusakan material dan struktur bangunan akibat hujan asam dapat menyebabkan korosi pada bahan bangunan. Tetesan-tetesan air hujan yang mengandung asam akan masuk ke dalam dinding – dinding bangunan melalui celah dan melarutkan kalsium yang terkandung pada bahan bangunan dan kemudian keluar dari dinding.

Zat yang telah bercampur ini akan bereaksi dengan karbon dioksida (CO_2) di udara yang selanjutnya membentuk kalsium karbonat yang tumbuh seperti kerucut lapisan es berwarna hitam (Sholehudin, 2009).

Karakteristik sumber pencemar deposisi asam dapat diketahui melalui pengolahan data hasil analisis anion dan kation air hujan dapat menggunakan model reseptor *Positive Matrix Factorization* (PMF). PMF merupakan teknik pemodelan terbaru dibandingkan dengan pemodelan lain seperti *Factor Analysis*, *Chemical Mass Balance* dan *Principal Component Analysis* karena PMF menggunakan perhitungan ketidakpastian yang digunakan untuk menganalisis data individu atas matriks data dan melakukan integrasi kendala *nonnegativitas* pada faktor yang dihasilkan dalam komputasi (EPA, 2000). PMF lebih unggul dibandingkan dengan *Factor Analysis* (FA) pada pengukuran aplikasi lingkungan (Hopke, 2000). Nilai ketidakpastian dalam PMF dapat melakukan deteksi yang lebih baik untuk mencari nilai deteksi dibawah limit maupun nilai yang hilang.

Hasil pengukuran menjadi lengkap bila disertai dengan pernyataan kuantitatif ketidakpastian (Islam dan Sukardan, 2016). Ketidakpastian adalah parameter hasil pengujian yang memberikan karakter sebaran nilai-nilai yang dapat diberikan pada besaran ukur. Estimasi ketidakpastian dapat melakukan perbandingan antar laboratorium atau perbandingan dengan metode acuan yang dapat membuktikan hasil pengukuran sudah tepat atau tidak.

2. Metodologi

2.1 Pengambilan contoh uji dan analisis air hujan

Peralatan yang digunakan dalam pengambilan contoh uji air hujan menggunakan *Automatic Rain Water Sampler* (ARWS), yang merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk mengambil contoh

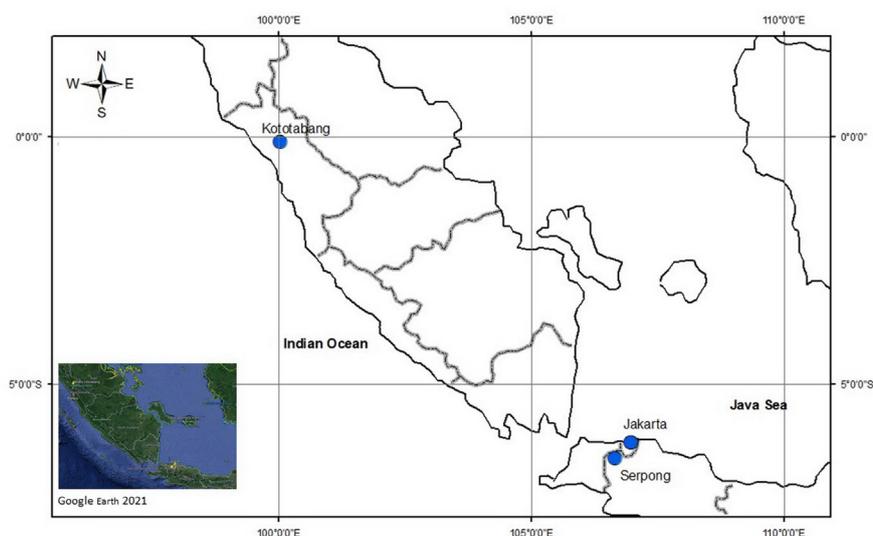
uji air hujan dengan metode wet deposition. Prinsip kerja alat ini adalah ketika hujan turun maka sensor akan memberikan sinyal ke sistem untuk membuka tutup penampungan air. Selama terjadi hujan, tutup tersebut akan terus terbuka dan setelah hujan selesai otomatis tutup tersebut akan menutup kembali seperti semula sehingga air hujan yang sudah ditampung tidak terkontaminasi oleh zat pengotor. Alat ARWS juga ada yang mampu menentukan curah hujan, pH air hujan, karena didalamnya terdapat *fitting, wiring board, computer, optical sensor, lid released, plunger coil, collection funnel, measuring valve, distribution valve, bottle sample, filter* dan *baterai tub* (Nugroho, 2012). Pengumpulan contoh uji air hujan mengacu pada *Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia* yang dikelola oleh EANET (EANET, 2010; Tomich dan Dana, 1990).

Komponen air hujan dikumpulkan sejak 2015-2019 dalam rerata volume tertimbang bulanan dari tiga stasiun pemantauan di Indonesia, yaitu Jakarta yang mewakili wilayah perkotaan, Kotatabang – Sumatera Barat untuk daerah terpencil, dan Serpong – Banten untuk daerah pedesaan. Periode pengambilan contoh uji air hujan di lokasi BMKG, Jakarta dan Kotatabang

dilaporkan mingguan, sedangkan di lokasi PSIKLH Serpong dilaporkan harian. Prosedur analisis komponen air hujan ditentukan berdasarkan pedoman teknis EANET (EANET, 2010).

Lokasi pemantauan deposisi asam di Jakarta, Kotatabang, dan Serpong disajikan pada Gambar 1.

Analisis contoh uji air hujan menggunakan alat Kromatografi Ion (IC) DIONEX ICS 5000, dilengkapi dengan supresor CSRS ULTRA II 2 mm dan ASRS ULTRA II 2 mm, kolom kation IonPac CS 12A dan kolom anion IonPac AS12A, dengan laju alir 1,5 L/menit digunakan untuk menganalisis anion dan spesies kation seperti nss-SO_4^{2-} , ss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , nss-Ca^{2+} , ss-Ca^{2+} , dan H^+ . Bahan kimia yang digunakan larutan campuran NaHCO_3 0,3 mM dan Na_2CO_3 2,7 mM digunakan sebagai eluen untuk anion, sedangkan *Methane Sulphonic Acid* (MSA) 20 mM untuk kation. Contoh uji disaring sebelum disuntikkan ke IC, dan konsentrasi ion dihitung melalui kurva kalibrasi. Kualitas data dilihat dengan meninjau keseimbangan kation dan anion (R1) dan dengan membandingkan konduktivitas terukur dan terhitung (R2) mengikuti QA/QC dari EANET.



Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 1. Lokasi Pemantauan Deposisi Asam di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang

Ion Chromatography (IC) dapat digunakan untuk mengidentifikasi, memisahkan dan mengukur ion-ion yang berada di suatu larutan contoh uji. Kelebihan dari kromatografi ini adalah analisisnya cepat, contoh uji mudah dikontrol dan tepat dalam penentuan kuantitatif, variasi kolom dan detektor mudah disesuaikan (Watson, 2012). Analisis contoh uji dengan IC dilakukan dengan menyaring contoh uji air hujan lalu dipindahkan ke dalam botol polyethylene. Contoh uji yang sudah disaring dimasukkan ke dalam botol polyvial berukuran 10 mL dan diletakkan pada *automatic sampler* pada IC. Fasa diam (kolom) yang digunakan pada IC anion adalah IonPac AS 19A yang terbuat dari polyvinylbenzyl amonium polymer dan DVB 55% dan fasa diam kation yang digunakan adalah IonPac CS 19A yang terbuat dari etilvinylbenzen dan DVB 55%.

2.2 Analisis data menggunakan Model Reseptor Positive Matrix Factorization (PMF)

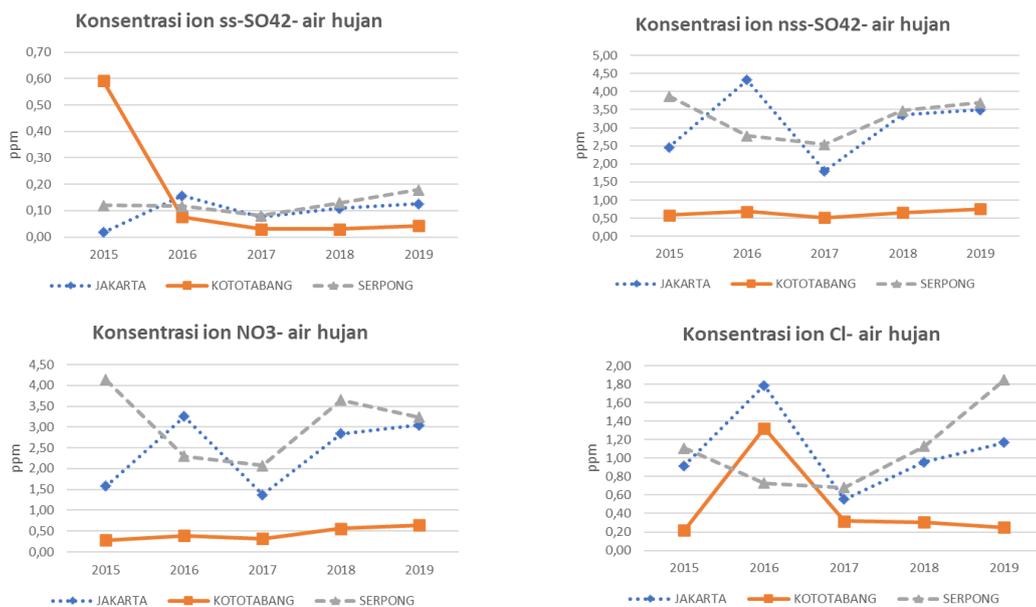
Analisis data menggunakan model reseptor *Positive Matrix Factorization* (PMF) US-EPA (*United States Environmental Protection Agency*) versi 5.0. bertujuan untuk mengetahui sumber pencemar yang

terkandung dalam deposisi basah. Data yang diperlukan untuk menjalankan program EPA PMF 5.0. adalah data hasil analisis dengan instrumen IC berupa konsentrasi anion dan kation yang terkandung dalam deposisi basah serta hasil perhitungan nilai ketidakpastian masing-masing anion dan kationnya. Jika data telah diinput dalam program tersebut, akan muncul *Base Mode* yang selanjutnya dapat diatur jumlah faktor dan jumlah *run* (pengulangan). Setelah itu, program PMF dapat dijalankan. Hasil dari *running* program PMF berupa grafik batang yang menunjukkan nilai konsentrasi dan persen (%) kontribusi anion kation air hujan dalam setiap sumber polutan yang digambarkan melalui profil faktor. Selanjutnya data dianalisis untuk mengetahui asal sumber pencemar yang ada di udara.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Analisis Deposisi Basah di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang 2015-2019

Hasil analisis deposisi basah data anion dan kation 2015-2019 di lokasi Jakarta, Kotatabang dan Serpong, dapat dilihat seperti pada Gambar 2.



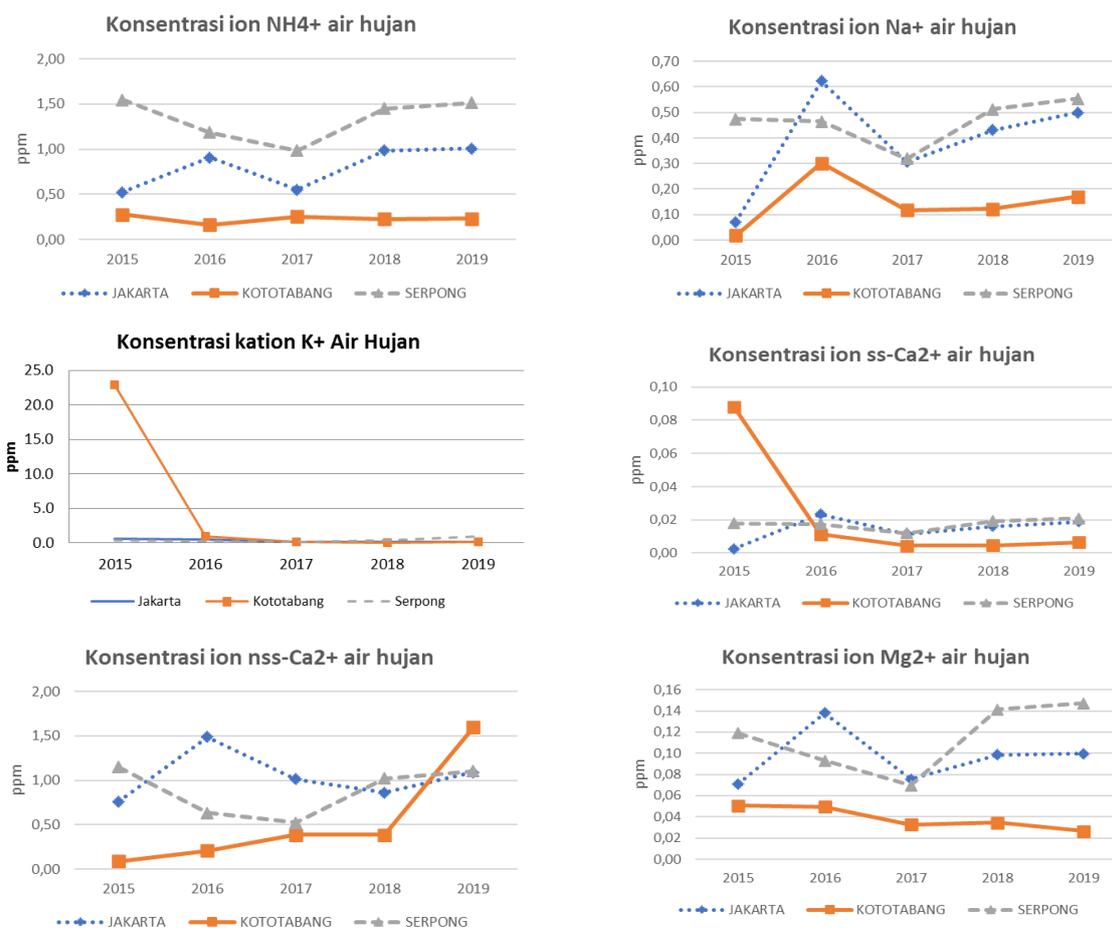
Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 2. Grafik Anoin di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang Tahun 2015-2019

Konsentrasi anion dalam deposisi basah di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang periode 2015–2019 mengalami fluktuasi setiap tahunnya. Konsentrasi ion *seasalt*-SO₄²⁻ tertinggi selama 5 tahun terdapat di kota Kotatabang pada tahun 2015 sebesar 0,59 ppm. Sumber ion *seasalt*-SO₄²⁻ dapat berasal dari kontribusi garam laut, ion tersebut di udara akan terbawa oleh angin sesuai arah angin yang membawanya. Konsentrasi ion *non seasalt*-SO₄²⁻ dan ion NO₃⁻ memiliki tren data yang hampir mirip, hal ini dapat disebabkan dari sumber pencemar yang sama yaitu dari kegiatan antropogenik atau dari kegiatan manusia seperti kegiatan industri dan emisi kendaraan bermotor yang menghasilkan polutan ke udara bebas. Selain itu, sumber pencemar ini juga dapat berasal dari sumber yang jauh

dari lokasi sampling, karena deposisi asam bersifat lintas batas atau *transboundary* (Budiwati et al., 2013). Konsentrasi ion Cl⁻ di lokasi Jakarta dan Kotatabang mengalami peningkatan pada tahun 2016, hal ini dapat disebabkan karena lokasi Jakarta yang dekat dengan daerah laut dan Cl⁻ sedangkan untuk lokasi di Kotatabang dapat berasal dari daerah sekitarnya yang terbawa oleh angin.

Konsentrasi kation periode tahun 2015–2019 di lokasi Serpong, Jakarta, dan Kotatabang mengalami fluktuasi setiap tahunnya. Konsentrasi kation NH₄⁺ tertinggi berada pada lokasi Serpong yaitu 1,55 ppm. Hal ini dapat disebabkan karena lokasi Serpong bersifat *sub-urban* yang dikelilingi oleh pepohonan dan di sekitar Serpong masih banyak aktivitas bertani sehingga konsentrasi ion NH₄⁺ lokasi Serpong menjadi



Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 3. Grafik Kation di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang Tahun 2015-2019

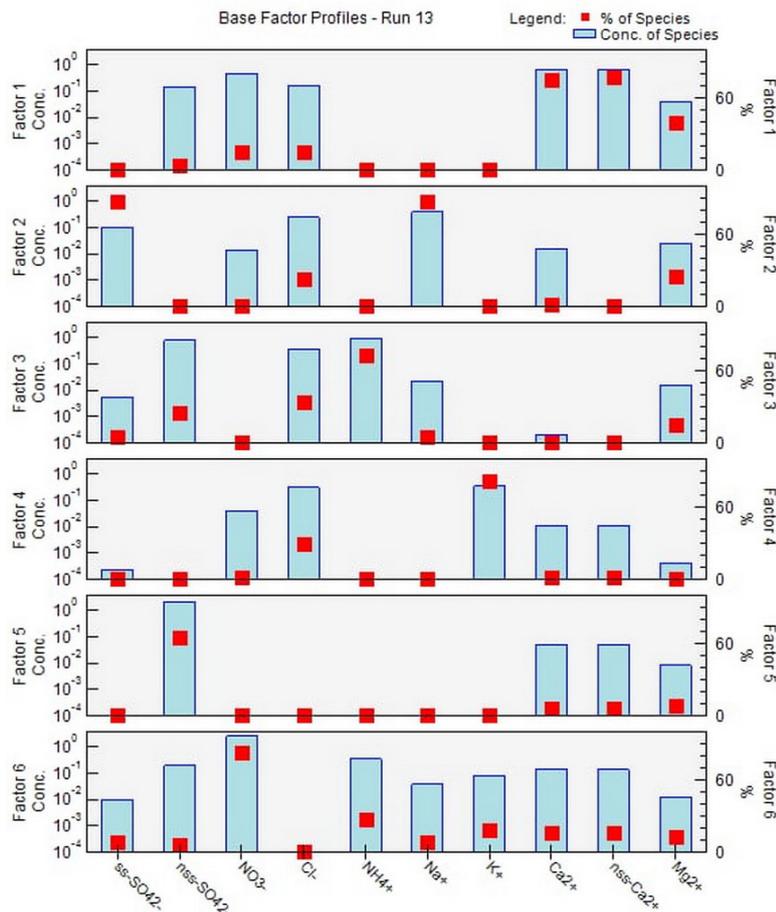
yang paling tinggi dibanding dengan lokasi Jakarta yang bersifat urban dan Kotatabang yang bersifat *remote*.

Konsentrasi ion Na^+ paling tinggi terjadi di Jakarta pada tahun 2016 yaitu 0,62 ppm, setelah itu Serpong pada tahun 2019 yaitu 0,55 ppm. Konsentrasi ion K^+ tertinggi terdapat pada lokasi Kotatabang pada tahun 2015 yaitu 22,93 ppm, hal ini kemungkinan adanya kebakaran hutan atau pembakaran biomassa karena lokasi Kotatabang ini dikelilingi oleh hutan lebat yang dekat dengan pemukiman disekitarnya, budaya membakar sampah untuk membakar jerami sawah sering dilakukan oleh petani sekitarnya sehingga konsentrasi ion kalium menjadi konsentrasi paling tinggi di Kotatabang.

3.2 Hasil Analisis Deposisi Basah di Serpong, Jakarta, dan Kotatabang 2015-2019 Menggunakan PMF

3.2.1 Kategori area pedesaan: Serpong - Provinsi Banten

Serpong merupakan daerah pedesaan (*rural*) yang sedang berkembang menjadi kota modern. Hasil analisis menggunakan PMF diperoleh sumber pencemar di Serpong berasal dari tanah dan debu, hal ini terjadi karena banyaknya pembangunan gedung dan jalan di Serpong. Selain itu sumber pencemar yang ditemukan di Serpong berasal dari kontribusi air laut, hal ini dapat terjadi karena pencemar deposisi asam mempunyai siklus luas tergantung arah angin. Sumber pencemar lainnya berasal dari pertanian, karena masyarakat di sekitar



Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 4. Profil Sumber Pencemar di Serpong

Serpong masih banyak yang berkerja sebagai petani. Sumber lainnya dari pembakaran biomassa, kebiasaan masyarakat membakar sisa tanaman (jerami) dan sampah masih ditemukan di Serpong, serta Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Cipeucang yang berada di Serpong. Sumber pencemar yang dominan di Serpong juga berasal dari proses pembakaran, penggunaan bahan bakar dari fosil menjadi sumber pencemar yang perlu diperhatikan diberbagai lokasi di Indonesia, karena bahan bakar kita mengandung sulfurnya cukup tinggi (~5000ppm).

Hasil analisis faktor 1 sampai faktor 6 dapat menunjukkan sumber pencemar di Serpong yang didominasi oleh beberapa ion di setiap faktornya. Hasil PMF spesies ion pada deposisi basah di Serpong tahun 2015-2019 disajikan pada Tabel 1.

3.2.2 Kategori area perkotaan: Jakarta

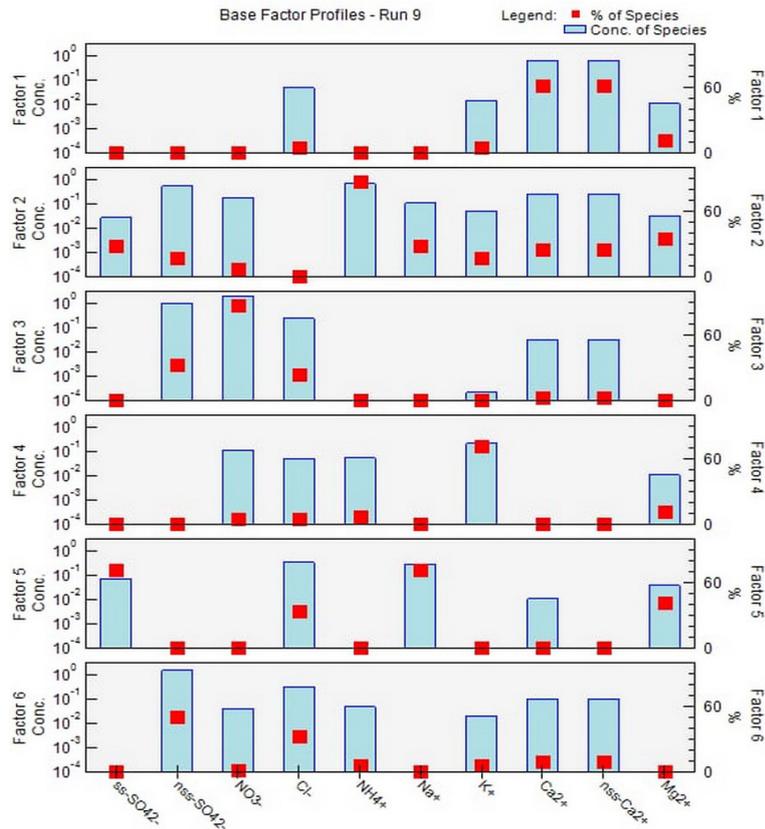
Hasil analisis anion dan kation berdasarkan permodelan PMF di Jakarta menunjukkan bahwa 5 sumber dominan pencemar di Jakarta berasal dari tanah dan debu, kontribusi laut, sumber pertanian, proses pembakaran serta pembakaran biomassa. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2

dan Gambar 5. yang menunjukkan komponen dominan di setiap faktor. Tanah dan debu di Jakarta menjadi sumber pencemar karena banyaknya pembangunan lahan yang baru, serta debu dari jalanan yang terbawa angin karena banyaknya transportasi jalan raya. Jakarta terletak di dekat teluk, dan berbatasan langsung dengan laut, sehingga berpengaruh terhadap penguapan dari air laut. Sumber dari pertanian di Jakarta kemungkinan berasal dari daerah disekitar, karena daerah disekitar Jabodetabek masih banyak daerah pertanian. Sumber pencemar lainnya berasal dari proses pembakaran terjadi karena Jakarta merupakan Ibu kota yang padat dengan kendaraan bermotor yang masih menggunakan bahan bakar fosil yang menunjukkan proses pembakaran belerang berasal dari emisi kendaraan diesel karena penggunaan bahan bakar dengan kandungan belerang tinggi (~5.000 ppm) yang masih umum di Indonesia, demikian juga dengan sumber pembakaran biomassa disebabkan karena masih adanya pembakaran tempat sampah terbuka (*landfill*) serta kegiatan masyarakat yang membakar sampah, terutama di beberapa kawasan padat penduduk di Jakarta.

Tabel 1. PMF Spesies Ion pada Deposisi Basah di Stasiun Serpong Tahun 2015-2019

Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
ss-SO ₄ ²⁻	-	86,81%	4,66%	0,20%	-	8,33%
nss-SO ₄ ²⁻	4,40%	-	24,42%	-	65,14%	6,04%
NO ₃ ⁻	15,01%	0,45%	-	1,29%	-	83,25%
Cl ⁻	14,97%	22,62%	33,51%	28,90%	-	-
NH ₄ ⁺	-	-	72,92%	-	-	27,08%
Na ⁺	-	86,71%	4,94%	-	-	8,35%
K ⁺	-	-	-	81,40%	-	18,60%
Ca ²⁺	75,38%	1,70%	0,02%	1,22%	5,82%	15,85%
nss-Ca ²⁺	76,89%	-	-	1,24%	5,88%	15,99%
Mg ²⁺	39,72%	24,49%	15,04%	0,41%	8,09%	12,25%
Possible source	<i>Soil dust source</i>	<i>Marine contribution</i>	<i>Agricultural source</i>	<i>Biomass burning</i>	<i>Combustion Process</i>	<i>Combustion Process</i>
	<i>Marine contribution</i>					

Sumber: Data Primer, 2022



Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 5. Profil sumber pencemar di Jakarta

Tabel 2. PMF Spesies Ion pada Deposisi Basah di Jakarta Tahun 2015-2019

Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
ss-SO ₄ ²⁻	-	28,13%	-	-	71,87%	-
nss-SO ₄ ²⁻	-	17,30%	32,71%	-	-	49,99%
NO ₃ ⁻	-	7,00%	86,88%	4,50%	-	1,62%
Cl ⁻	4,77%	-	24,37%	4,91%	33,72%	32,23%
NH ₄ ⁺	-	87,07%	-	6,91%	-	6,03%
Na ⁺	-	28,13%	-	-	71,88%	-
K ⁺	4,64%	17,11%	0,07%	71,60%	-	6,58%
Ca ²⁺	61,15%	25,20%	3,10%	-	1,01%	9,54%
nss-Ca ²⁺	62,02%	25,16%	3,15%	-	-	9,68%
Mg ²⁺	11,67%	34,93%	-	11,59%	41,81%	-
<i>Possible source</i>	<i>Soil dust source</i>	<i>Agricultural source</i>	<i>Combustion process</i>	<i>Biomass burning</i>	<i>Marine contribution</i>	<i>Combustion process</i>
	<i>Marine contribution</i>					

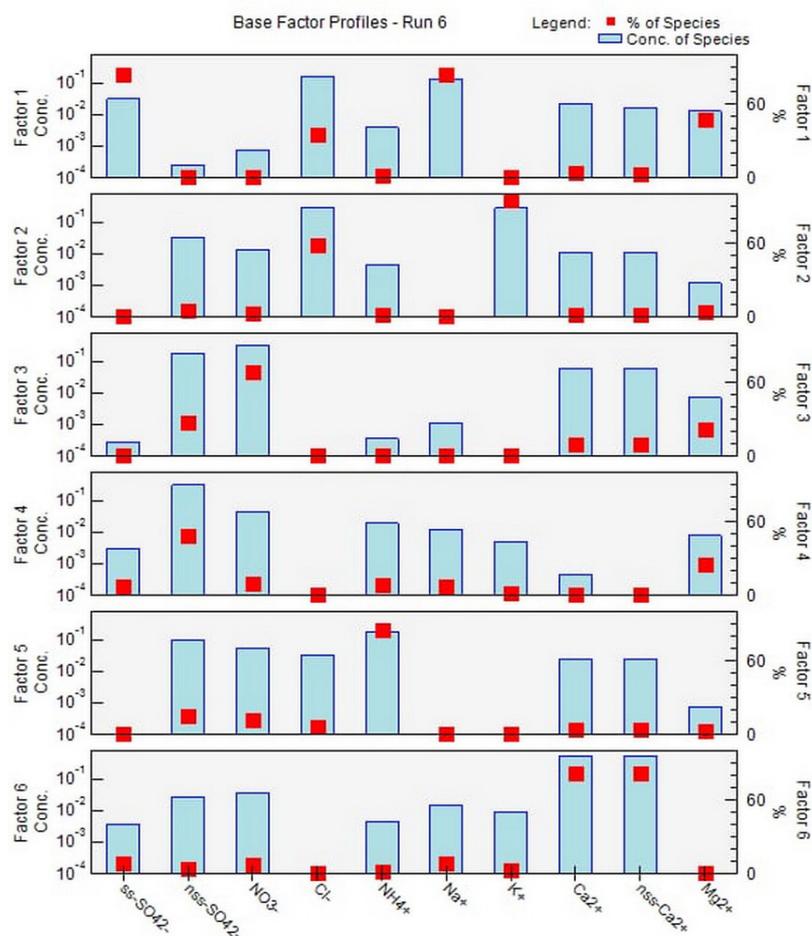
Sumber: Data Primer, 2022

3.2.3 Kategori area terpencil: Kotatabang Sumatera Barat

Sumber dominan pencemar di Kotatabang Sumatera Barat yang merupakan area terpencil (*remote*) berasal dari pengaruh dari laut, pembakaran biomassa, proses pembakaran, sumber pertanian, tanah dan debu. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 3. dan Gambar 6. yang menunjukkan komponen dominan di setiap faktor. Kotatabang terletak di Kecamatan Palupuh, Kabupaten Agam, Sumatera Barat, dengan lokasinya di ketinggian 900 meter di atas permukaan laut. Kemungkinan kontribusi dari laut berasal dari kandungan Na^+ dalam air hujan yang dibawa oleh angin dari laut atau danau yang ada disekitar lokasi Kotatabang, namun dapat juga terbawa dari lokasi lain yang cukup jauh,

karena pencemar yang terpapar di udara bergerak sesuai arah angin. Pembakaran biomassa di Kotatabang dapat terjadi karena lokasi Kotatabang ini dikelilingi oleh hutan lebat, namun dekat dengan pemukiman disekitarnya, budaya membakar sampah untuk membakar jerami sawah sering dilakukan oleh petani sekitarnya. Sumber pembakaran dapat berasal dari bahan bakar yang digunakan masih menggunakan bahan bakar fosil, sedangkan sumber pertanian memang aktivitas masyarakat disekitar Kotatabang umumnya bertani.

Dari ketiga lokasi tersebut dapat diketahui bahwa sebagian besar sumber pencemar dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik. Dengan mengetahui karakteristik sumber pencemar diharapkan



Sumber: Data Primer, 2022

Gambar 6. Profil sumber pencemar di Kotatabang

Tabel 3. PMF Spesies Ion pada Deposisi Basah di Kotatabang Tahun 2015-2019

Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
ss-SO ₄ ²⁻	83,62 %	-	0,64%	7,17%	-	8,58%
nss-SO ₄ ²⁻	0,05%	5,25%	27,47%	47,96%	14,99%	4,27%
NO ₃ ⁻	0,21%	2,67%	68,80%	9,35%	11,27%	7,70%
Cl ⁻	35,40%	58,16%	-	-	-	-
NH ₄ ⁺	2,17%	2,02%	0,16%	8,67%	84,89%	2,09%
Na ⁺	83,62%	-	0,64%	7,17%	-	8,58%
K ⁺	0,05%	95,14%	-	1,72%	-	3,10%
Ca ²⁺	3,86%	1,66%	9,23%	0,07%	3,88%	81,29%
nss-Ca ²⁺	3,06%	1,68%	9,32%	-	3,92%	82,02%
Mg ²⁺	47,37%	3,68%	22,00%	24,53%	2,33%	0,10%
<i>Possible source [13,21]</i>	<i>Marine contribution</i>	<i>Biomass Burning</i>	<i>Combustion Process</i>	<i>Combustion Process</i>	<i>Agricultural source</i>	<i>Marine Contribution</i> <i>Soil dust source</i>

Sumber: Data Primer, 2022

Tabel 4. Database *Fingerprint* PMF

Sumber Pencemar	Elemen Penanda
Debu tanah/kerak bumi	Al, Sc, Si, Ti, Fe, Sm, nss-Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Al ³⁺
Proses pembakaran	V, Ni, Mn, Fe, Cr, As, S, nss-SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Al, Sc, Se, Co, As, Ti, Th
Industri besi dan baja	Mn, Cr, Fe, Zn, W, Rb
Industri logam non-besi	Zn, Cu, As, Sb, Pb, Al
Industri kaca	Sb, As, Sb
Industri semen	Ca
Pembakaran biomassa	K, C, Br, K ⁺ , Cl ⁻ , F
Kendaraan bensin	C, Br, Ce, La, Pt, nss-SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ ,
Kendaraan diesel	C, S, nss-SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ ,
Pertanian	NH ₄ ⁺
Kontribusi garam laut	ss-SO ₄ ²⁻ ; ss-Ca ²⁺ ; Na ⁺ ; Cl ⁻

Sumber: (Oanh, 2018; Pawarmart dan Sato, 2013)

penanganan sumber pencemar lebih objektif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi pengambil kebijakan dalam mengatasi permasalahan lingkungan secara tepat sasaran.

4. Simpulan

Hasil identifikasi karakteristik sumber pencemar deposisi basah di Serpong,

Jakarta, dan Kotatabang tahun 2015–2019 menggunakan model PMF menunjukkan bahwa sumber pencemar di Serpong berasal dari tanah dan debu, kontribusi air laut, sumber pertanian, pembakaran biomassa, dan proses pembakaran. Hasil identifikasi sumber pencemar di Jakarta terdapat 5 sumber pencemar yaitu tanah dan debu, kontribusi laut, sumber pertanian, proses

pembakaran, dan pembakaran biomassa, dan untuk lokasi Kotatabang sumber pencemar berasal dari kontribusi laut, pembakaran biomassa, proses pembakaran, sumber pertanian, dan tanah dan debu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi pengambil kebijakan dalam mengatasi permasalahan lingkungan secara tepat sasaran.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada seluruh staf laboratorium udara PSIKLH, BMKG Kemayoran, serta BMKG Kotatabang atas kerjasamanya dalam penyediaan data, sehingga makalah ini dapat selesai dengan baik.

6. Kepengarangan

Seluruh penulis berkontribusi dalam melakukan penyusunan makalah menjadi suatu kesatuan tak terpisahkan. Penulis ke satu melakukan penyusunan naskah, pengolahan data, dan studi pustaka, penulis ke dua melakukan verifikasi data dan editing naskah, penulis ke tiga melakukan verifikasi hasil pengujian dan pengolahan data, penulis ke empat, lima, dan enam melakukan sampling, pengujian, dan pelaporan hasil.

Daftar Pustaka

- Budiwati, T., Tanti, D. A., Sumaryati, & Rachmawati, E. (2013). *Kecenderungan Temporal Deposisi Asam di Serpong dan Jakarta (2001-2009): Studi Transboundary Polutan*. Jakarta: CV. Andira.
- Duan, L., Yu, Q., Zhang, Q., Wang, Z., Pan, Y., Larssen, T., ... Mulder, J. (2016). Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment*, 146, 55–69.
- EANET. (2010). *Technical Manual for Wet Deposition Monitoring in East Asia - 2010*. Niigata: Asia Center for Air Pollution Research (ACAP).
- Handriyono, R. E., & Dewi, A. W. S. (2018). Studi Kandungan Asam Pada Air Hujan di Kawasan Surabaya Timur. *Teknik Lingkungan*, 1, 52–55.
- Hasan, N. Y., Driejana, Sulaeman, A., & Ariesyady, H. D. (2018). Acidic Wet Deposition in Bandung City Indonesia. *MATEC Web of Conferences*, 147, 08007.
- Lestari, R. P., & Nelson, R. (2017). Komposisi Kimia Deposisi Kering di Dua Wilayah Sub Perkotaan di Indonesia, Serpong dan Bogor. *Ecolab*, 11(2), 92-102.
- Nugroho, W. (2012). *Pengembangan Sistem Peralatan Pengambilan Sampel Air Hujan Otomatis*. Universitas Indonesia.
- Oanh, N. T. K. (2018). Understanding Air Pollution and Effects for Development Of Clean Air Action Plans. *IAEA-Capacity Building Program*. Bandung.
- Pawarmart, I., & Sato, K. (2013). Identifying of Acid Deposition Potential Sources in Thailand using PMF Model and PCA Analysis. *EANET Research Fellowship Program 2012*, 3, 91–124.
- Sholehudin, A. (2009). *Hujan Asam*. Semarang: Ghyyas Putra.
- Sudalma, & Purwanto. (2012). Analisis Sifat Hujan Asam di Kota Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 1–7.
- Sutanto, & Iryani, A. (2011). Hujan Asam Dan Perubahan Kadar Nitrat dan Sulfat Dalam Air Sumur di Wilayah Industri Cibinong-Citeureup Bogor. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14(1), 1-9.
- Tomich, S. D., & Dana, M. T. (1990). Computer-Controlled Automated Rain Sampler (CCARS) for Rainfall Measurement and Sequential Sampling. *Atmospheric and Oceanic Technology*, 541–549.
- Wardhana, A. W. (2004). *Dampak Pencemaran Lingkungan (edisi revisi) (3rd ed.)*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Watson, D. (2012). *Pharmaceutical Analysis: A Textbook for Pharmacy Students and Pharmaceutical Chemists*. In *Pharmaceutical Chemist (Vol. 70)*. Elsevier Ltd.