

## Perbandingan Kualitas Udara Berdasarkan Parameter Deposisi Kering di Jakarta, Bandung, dan Serpong

### *Air Quality Comparison Based on Dry Deposition Parameters in Jakarta, Bandung, and Serpong*

Retno Puji Lestari<sup>1</sup>, Dyah Aries Tanti<sup>2</sup>, Miya Riski Utari<sup>3</sup>, dan Yuni Kartika<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan (P3KLL)-KLHK, Kawasan PUSPIPTEK Gedung 210, Serpong – Tangerang Selatan 15310.

<sup>2</sup>Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA)- Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), Jl. Dr.Djundjuran No 133 Bandung 40173.

<sup>3</sup>Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta. Jl. Ir. H. Djuanda No. 95, Ciputat, Tangerang Selatan 15412.

<sup>4</sup>Pusat Informasi Perubahan Iklim, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10720  
E-mail: emc\_acdep@yahoo.com

Diterima 13 Desember 2020, direvisi 2 Januari 2021, disetujui 15 Februari 2021

#### ABSTRAK

**Perbandingan Kualitas Udara Berdasarkan Parameter Deposisi Kering di Jakarta, Bandung, dan Serpong.** Peningkatan emisi gas buang dari kegiatan industri dan transportasi berkontribusi pada terjadinya pencemaran udara dan menyebabkan deposisi asam. Pemantauan deposisi kering di tiga lokasi berbeda (Serpong, Jakarta, dan Bandung) dilakukan selama tahun 2019. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi polutan parameter deposisi kering, serta melihat perbandingan konsentrasi saat musim hujan dan kemarau. Pengukuran deposisi kering dengan metode *filter pack* meliputi dua parameter yaitu partikulat  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , dan  $\text{SO}_4^{2-}$  dalam aerosol serta gas-gas  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ , dan  $\text{HCl}$ . Udara dilewatkan pada *four stage filter pack* yang memiliki spesifikasi untuk tiap komponen kimia di setiap rangkaian filter, selama dua minggu secara kontinyu menggunakan pompa dengan laju alir 1 L/menit. Filter hasil sampling dipreparasi dan dianalisis menggunakan *Ion Chromatography* DIONEX ICS5000 menggunakan eluen campuran  $\text{NaHCO}_3$  2,7 mM dan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0,3 mM untuk anion dan eluen MSA 20 mM untuk kation dengan laju alir pengukuran 1 L/menit. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa gas  $\text{NH}_3$  dan partikulat  $\text{SO}_4^{2-}$  di setiap lokasi merupakan polutan dominan dalam deposisi kering. Konsentrasi  $\text{NH}_3$  tertinggi di Jakarta terjadi pada bulan Desember (4,4 ppb), di Bandung pada bulan November (17 ppb), sementara di Serpong pada bulan Juli (13 ppb). Konsentrasi  $\text{SO}_4^{2-}$  paling tinggi di Jakarta terjadi pada bulan Juli ( $10,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), di Bandung pada bulan Februari ( $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), dan di Serpong pada bulan September ( $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Persentase senyawa  $\text{NH}_3$  di Jakarta, Bandung, dan Serpong masing-masing sebesar 41%, 70%, dan 64%, sementara  $\text{SO}_4^{2-}$  masing-masing sebesar 42%, 49%, dan 58%. Tidak terlihat adanya perbedaan nyata antara konsentrasi pencemar pada musim hujan dan kemarau di Bandung, Jakarta, dan Serpong untuk beberapa parameter, kecuali di Jakarta untuk  $\text{Na}^+$  ( $p < 0,05$ ), di Serpong untuk  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , dan  $\text{K}^+$  berbeda nyata ( $p < 0,05$ ), serta parameter  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{NO}_3^-$  berbeda nyata ( $p < 0,001$ ).

**Kata kunci:** Deposisi kering, *filter pack*, *Ion Chromatography*.

## ABSTRACT

### ***Air Quality Comparison Based on Dry Deposition Parameters in Jakarta, Bandung, and Serpong.***

*The increasing level of gas emissions from fossil-fueled consumption due to transportation and industry in urban areas contributed to air pollution and lead to acid deposition. Dry deposition monitoring in three different sites (Serpong, Jakarta, and Bandung) were conducted in 2019. This study aims to measure dry deposition pollutants' concentration and compare the pollutants level during the rainy and dry seasons. Dry deposition measurement was performed by filter pack method comprising of two parameters, namely the particulates of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$  in aerosol, and gasses of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ , and  $\text{HCl}$ . Air is absorbed through a four-stage filter, which was specifically used for each chemical compound in each stage pack, for two weeks continuously using a pump with a flow rate of 1 L/min. Sampling filters were prepared and analyzed using Ion Chromatography DIONEX ICS5000, using the mixture of 2.7 mM  $\text{NaHCO}_3$  and 0.3 mM  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  eluents for anions and 20 mM MSA eluents for cations with a flow rate measurement of 1 L/min. The results showed that the gas of  $\text{NH}_3$  and  $\text{SO}_2$  particulates were the dominant pollutants in the dry deposition in each location. The highest level of  $\text{NH}_3$  in Jakarta was found in December (4.4 ppb), in Bandung in November (17.8 ppb), and Serpong in July (13 ppb), respectively. The highest level of  $\text{SO}_4^{2-}$  in Jakarta was found in July ( $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), in Bandung in February ( $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), and in Serpong in September ( $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The percentage of  $\text{NH}_3$  in Jakarta, Bandung, and Serpong were 41%, 70%, and 64%, while  $\text{SO}_4^{2-}$  were 42%, 49%, and 58%, respectively. There were no statistically significant differences found in most pollutants during the rainy and dry season in Jakarta, Bandung, and Serpong, except there, were statistically different in Jakarta for  $\text{Na}^+$  ( $p < 0.05$ ), in Serpong for  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , and  $\text{K}^+$  ( $p < 0.05$ ), also  $\text{HNO}_3$  and  $\text{NO}_3^-$  ( $p < 0.001$ ).*

**Keywords:** *Dry deposition, filter pack, Ion Chromatography*

## 1. Pendahuluan

Polutan yang dihasilkan dari kegiatan emisi sumber tidak bergerak seperti pembangkit listrik, cerobong industri, pembakaran sumber domestik, maupun insinerator berpotensi menyebabkan terjadinya pencemaran udara (APIS, 2016; Duan *et al.*, 2016). Deposisi asam merupakan salah satu fenomena akibat pencemaran udara yang menggambarkan turunnya asam dari atmosfer ke permukaan bumi (APIS, 2015). Konsentrasi pencemar di lapisan atmosfer dapat berkurang melalui deposisi, yaitu penurunan konsentrasi pencemar karena pindah ke permukaan, baik sebagai deposisi kering maupun deposisi basah (Kryza, Werner, Dore, Błaś, & Sobik, 2012).

Deposisi kering (*dry deposition*) terjadi pada waktu cuaca berawan dan tidak hujan, proses terjadinya deposisi kering berlangsung secara kompleks melalui proses

deposisi dan adsorpsi (ACAP, 2016). Potensi terjadinya deposisi kering berkisar antara 20-70% dari total deposisi asam (Likens, 2020).  $\text{NO}_2$  dan  $\text{SO}_2$  masuk ke atmosfer melalui angin dan terdeposisi pada pohon-pohon, bangunan-bangunan, bahkan dalam sistem pernapasan manusia. Deposisi kering ini mengacu pada proses jatuhnya asam ke permukaan bumi melalui gas dan debu atau partikel, dimana sebagian besar dari deposisi asam terjadi secara kering. Deposisi kering banyak terjadi di daerah perkotaan karena pencemaran udara yang bersumber dari cerobong asap pabrik dan lalu lintas kendaraan bermotor yang berkontribusi pada proses asidifikasi. Deposisi kering pada umumnya terjadi di tempat yang dekat dengan sumber emisi (Cerón *et al.*, 2012). Terdapat beberapa senyawa kimia yang terlibat dalam reaksi atmosfer kimia, dengan demikian menjadi hal yang penting untuk memilih

jenis pencemar secara tepat. Sehubungan dengan kondisi atmosferik yang berkaitan dengan hujan asam, baik spesies kimia yang bersifat asam maupun basa misalnya  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dan  $\text{NH}_3$  harus dianalisis, sementara apabila berkaitan dengan polusi udara, maka  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , ozon, serta partikulat harus diperhitungkan (Aikawa & Hiraki, 2008). Ion-ion  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , dan  $\text{SO}_4^{2-}$  yang terdapat pada deposisi asam merupakan komponen alami air hujan, namun konsentrasinya dapat dipengaruhi oleh berbagai kegiatan antropogenik

Analisis parameter kimia deposisi kering dilakukan dengan instrumen ion kromatografi. Teknik kromatografi ion memiliki kelebihan sensitivitas, selektivitas, dengan waktu analisis yang relatif singkat (Dasgupta & Maleki, 2019; Michalski, 2016; Nesterenko & Paull, 2017). Kromatografi ion mampu mendeteksi ion secara simultan dan memiliki kestabilan pada kolom pemisah mengingat jumlah sampel yang dianalisis relatif dalam jumlah sedikit (Yoshikawa, Uekusa, & Sakuragawa, 2015; Zafirakha, Smolenkov, & Shpigun, 2016).

Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi polutan parameter deposisi kering berupa partikulat dan gas di Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan – Kementerian Lingkungan

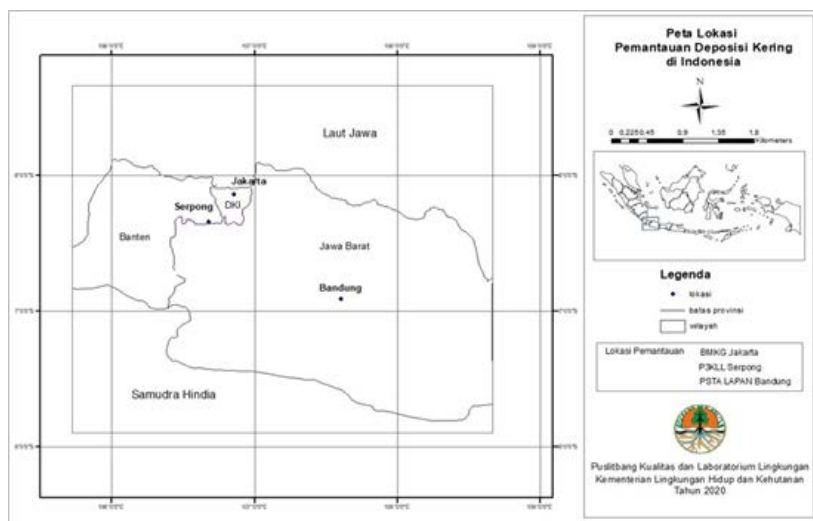
Hidup dan Kehutanan (P3KLL-KLHK) Serpong, di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta, serta di Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (PSTA-LAPAN) Bandung, serta melihat perbandingan konsentrasi saat musim hujan dan kemarau.

Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi polutan parameter deposisi kering berupa partikulat dan gas di Puslitbang Kualitas dan Laboratorium Lingkungan – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (P3KLL-KLHK) Serpong, di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta, serta di Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (PSTA-LAPAN) Bandung, serta melihat perbandingan konsentrasi saat musim hujan dan kemarau.

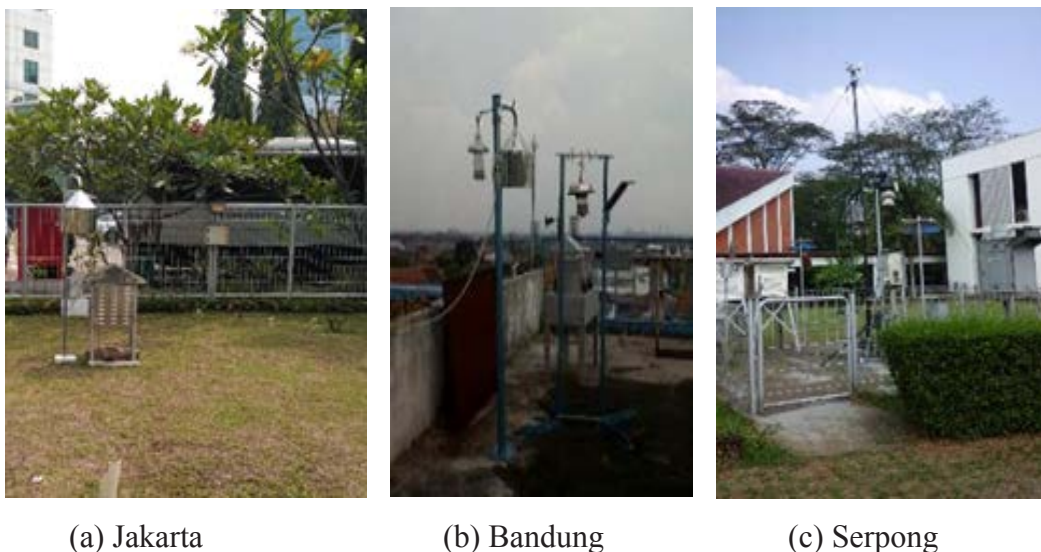
## 2. Metodologi

### 2.1 Lokasi

Lokasi kegiatan sampling dilakukan di tempat berbeda yaitu stasiun BMKG Jakarta, P3KLL Serpong, dan LAPAN Bandung. Sampel dari BMKG dan P3KLL dianalisis di laboratorium P3KLL, sementara sampel LAPAN dianalisis di laboratorium LAPAN.



Gambar 1. Layout Titik Lapang



Sumber : Dokumentasi Pribadi

**Gambar 2.** Lokasi Titik Pemantauan Deposisi Kering

2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan terdiri dari rangkaian *four-stage filter pack* yang dilengkapi selang, *dry gas meter*, dan pompa. Di dalam *four-stage* tersebut dilengkapi dengan filter PTFE, filter poliamida, dan filter selulosa yang telah diimpregnasi dengan pelarut spesifik. Bahan kimia yang digunakan antara lain adalah  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaCO}_3$ , *Methane Sulfonic Acid* (MSA) 99%,  $\text{H}_2\text{O}_2$  30%,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  6%, gliserin 2%,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  5% dan aquades ( $\text{DHL} < 1\mu\text{S/cm}$ ).

2.3 Prosedur

Prosedur pengujian mengacu pada instruksi kerja penentuan komponen partikel

$\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , dan  $\text{SO}_4^{2-}$  dan gas  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ , dan  $\text{HCl}$  dalam deposisi kering dengan metode *Filter Pack* (P3KLL, 2014), yang diadopsi dari panduan yang dipublikasikan oleh EANET dalam dokumen *Technical Manual for Filter Pack Method in East Asia*. Setiap filter dipreparasi dan ditempatkan pada *four-stage filter pack*, kemudian dipasangkan pada selang dan pompa. Laju alir diatur selama 1 L/menit untuk pemasangan selama dua minggu. Volume awal dan volume akhir pada pembacaan *dry gas* meter dicatat. Setelah sampling, filter sampel dilepaskan dari *holder* lalu dimasukkan ke dalam tabung uji polipropilena 50 mL menggunakan pinset,

**Tabel 1.** Spesifikasi Filter untuk Deposisi Kering

No	Spesifikasi Filter	Senyawa yang Terkumpul
F0	Filter PTFE, T080A047A/ADVANTEC (ukuran pori: 0,8 $\mu\text{m}$ , diameter: 47 mm)	Aerosol ( $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{NO}_3^-$ , dan $\text{SO}_4^{2-}$ )
F1	Filter Poliamida, ULTIPOOR N66/PAL (ukuran pori: 0,45 $\mu\text{m}$ , diameter: 47 mm)	Gas ( $\text{HNO}_3$ , $\text{SO}_2$ , $\text{HCl}$ , $\text{NH}_3$ )
F2	Filter Impregnasi 51A/ADVANTEC Diameter: 47 mm (larutan: $\text{K}_2\text{CO}_3$ 6% + gliserin 2%)	Gas ( $\text{SO}_2$ , $\text{HCl}$ )
F3	Filter Impregnasi 51A/ADVANTEC Diameter: 47 mm (larutan: $\text{H}_3\text{PO}_4$ 5% + gliserin 2%)	Gas $\text{NH}_3$

Sumber: (EANET, 2015)

dan ditambahkan pelarut. Filter F0, F1, dan F3 dilarutkan dalam 20 mL H<sub>2</sub>O sementara F2 dengan 20 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0,05%. Ekstraksi dilakukan menggunakan *shaker* dengan kecepatan 5 rpm, kemudian larutan disaring menggunakan filter dengan ukuran pori-pori 0,22 µm sebelum diinjeksikan ke dalam instrumen Kromatografi Ion DIONEX yang dilengkapi dengan *suppressor*. Eluen yang digunakan adalah campuran NaHCO<sub>3</sub> 2,7 mM dan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0,3 mM untuk anion dan eluen MSA 20 mM untuk kation dengan laju alir pengukuran 1 L/menit (DIONEX, 2010). Konsentrasi ion diperoleh melalui perhitungan persamaan kurva kalibrasi antara konsentrasi standar (ppm) dengan luas area.

Konsentrasi parameter di udara dihitung melalui rumus di bawah ini (EANET, 2010), dan masing-masing parameter dihitung berdasarkan persamaan pada Tabel 2:

$$C_{udara} = \alpha * net C_{sol} * V_{sol} / V_{udara} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- C<sub>udara</sub> : konsentrasi parameter pencemar di udara (nmol/m<sup>3</sup>)
- α : 103/BM
- net C<sub>sol</sub> : konsentrasi parameter pencemar dalam larutan setelah dikurangi blanko (mg/L)
- V<sub>sol</sub> : volume larutan (20 mL)

- V<sub>udara</sub> : volume sampel dengan koreksi pada 25°C (m<sup>3</sup>)
- BM : bobot molekul

Angka V<sub>udara</sub> yang tertera pada *dry gas mater* harus dikoreksi pada 25°C menggunakan data suhu yang diperoleh selama sampling sebagai berikut:

$$V_{udara} = V_{udara, sampel} * (25 + 273) / (T + 273)$$

Data yang digunakan dalam kajian ini adalah data pemantauan sepanjang tahun 2019 yang telah melewati jaminan mutu dan pengendalian mutu yang dikeluarkan oleh EANET. Data diolah menggunakan Microsoft Excel dan Graphad Prism 5.0. Uji statistik non parametrik Kruskal-Wallis diaplikasikan untuk mengetahui perbedaan konsentrasi pencemar yang sama di lokasi yang berbeda, sementara uji Mann Whitney untuk melihat adanya pengaruh perbedaan musim di tiap lokasi.

Jaminan mutu dan pengendalian mutu (QA/QC) memainkan peran penting untuk pemantauan deposisi asam. Jaminan data dengan tingkat akurasi, presisi, kelengkapan, komparabilitas tinggi dan keterwakilan tinggi dilakukan menurut panduan EANET (2010). Dalam deposisi asam, ditekankan prinsip *electroneutrality* yang mensyaratkan bahwa konsentrasi anion total

**Tabel 2.** Ringkasan perhitungan parameter deposisi kering

Parameter	BM	Persamaan
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	96,06	$C_{udara} = \alpha \times net C_{sol} F0 * V_{sol} / V_{udara}$
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62,01	
Cl <sup>-</sup>	35,45	
Na <sup>+</sup>	22,99	
K <sup>+</sup>	39,10	$C_{udara} = \alpha \times (net C_{sol} F1 + net C_{sol} F2) \times V_{sol} / V_{udara}$
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	18,04	
Ca <sup>2+</sup>	40,08	
Mg <sup>2+</sup>	24,31	$C_{udara} = \alpha \times net C_{sol} F1 \times V_{sol} / V_{udara}$
SO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	96,06 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	
HNO <sub>3</sub>	62,01 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	$C_{udara} = \alpha \times (net C_{sol} F1 + net C_{sol} F2) \times V_{sol} / V_{udara}$
HCl	35,45 (Cl <sup>-</sup> )	
NH <sub>3</sub>	18,04 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	$C_{udara} = \alpha \times (net C_{sol} F1 + net C_{sol} F3) \times V_{sol} / V_{udara}$

akan ekivalen dengan jumlah kation total. Dengan demikian, kesetimbangan ion dalam sampel F0 diverifikasi melalui persamaan  $R1=(C-A)/(C+A) \times 100\%$ , dimana C dan A mewakili anion dan kation ekivalen ( $\mu\text{eq/L}$ ), yang disederhanakan dari persamaan yang terdapat dalam USEPA (1994).

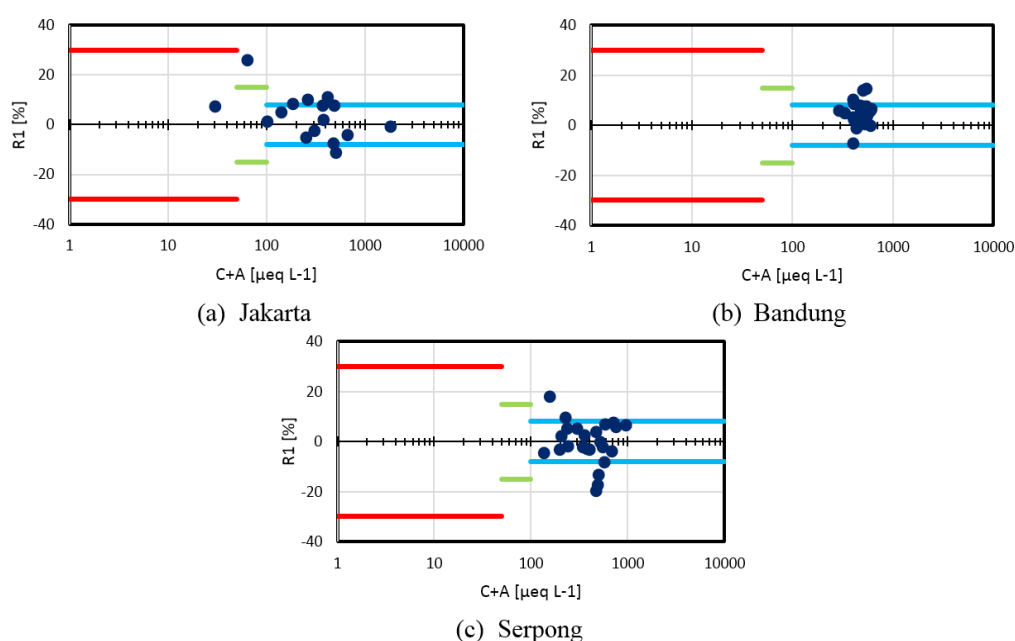
### 3. Hasil dan Pembahasan

Rekapitulasi hasil perhitungan jaminan mutu dan pengendalian mutu dari sampling deposisi kering setiap dua minggu selama setahun dengan jumlah total data masing-masing lokasi sebanyak 24 data, dapat dilihat pada Gambar 2.

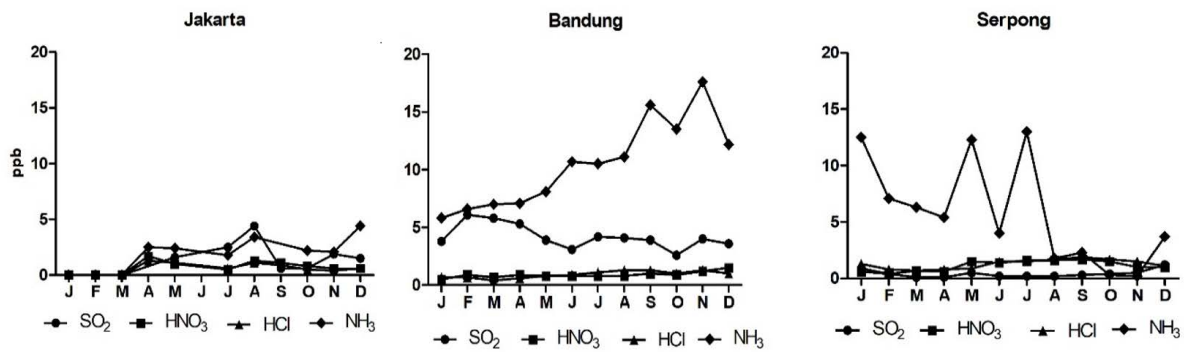
Hasil analisis menunjukkan bahwa sebanyak 83% data Bandung, 69% data Jakarta, dan 75% data Serpong berada dalam rentang keberterimaan yang diprasyaratkan dalam panduan EANET yaitu sebesar 70%, kecuali di Jakarta. Data *outlier* dapat terjadi karena adanya kontaminasi saat analisis maupun selama pengambilan contoh uji. Pada pemantauan selama tahun 2019 ini telah terjadi beberapa kendala di lapangan selama proses sampling di Jakarta. Adanya

data *outlier* dapat diminimalisasi dengan pengulangan analisis, namun karena volume sampel relatif sedikit maka pengulangan agak sulit dilakukan, sehingga untuk pengujian menggunakan metode *filter pack* harus memperhatikan prosedur secara seksama, baik saat sampling maupun analisis untuk mengurangi adanya kontaminasi.

Variabilitas bulanan untuk konsentrasi gas  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ , dan  $\text{NH}_3$  di tiap lokasi menunjukkan bahwa  $\text{NH}_3$  mendominasi komposisi kimia dalam fase gas (Gambar 3). Konsentrasi  $\text{NH}_3$  di Bandung relatif lebih tinggi dibanding lokasi lainnya. Konsentrasi  $\text{NH}_3$  tertinggi di terjadi pada bulan November yaitu 17,3 ppb, sementara di Jakarta pada bulan Desember sebesar 4,4 ppb, dan di Serpong pada bulan Juli 13 ppb. Konsentrasi gas lainnya berada pada kisaran 0,4-2 ppb. Sumber  $\text{NH}_3$  umumnya berasal dari proses industri seperti pupuk urea, atau hasil pemupukan kotoran hewan. Masalah timbunan sampah di kawasan Jalan Dr. Djundjungan yang berdekatan dengan lokasi sampling di Bandung, serta aerosol  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  dan  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  dari debu

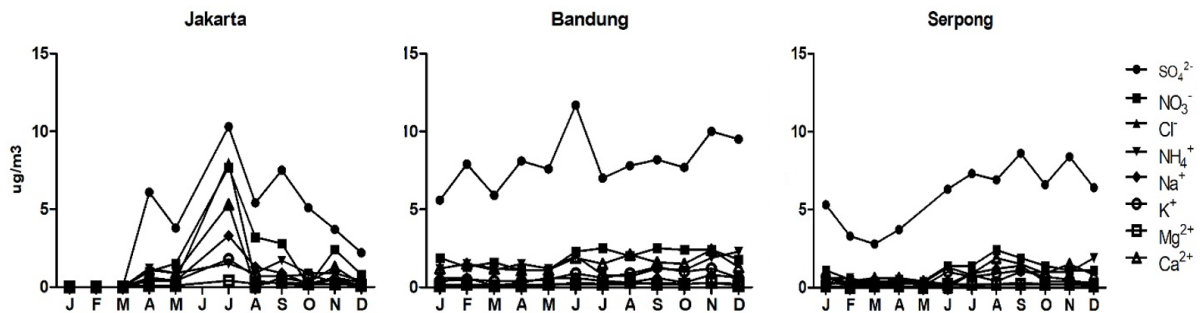


Gambar 3. Grafik Jaminan Mutu dan Pengendalian Mutu



**Gambar 4.** Konsentrasi rata-rata bulanan parameter gas (ppb) dalam deposisi kering di Jakarta, Bandung, dan Serpong

Sumbu x merepresentasikan konsentrasi gas SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, NH<sub>3</sub> dalam satuan ppb dan sumbu y untuk nama-nama bulan dalam periode setahun.



**Gambar 5.** Konsentrasi rata-rata bulanan parameter partikulat ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) dalam deposisi kering di Jakarta, Bandung, dan Serpong

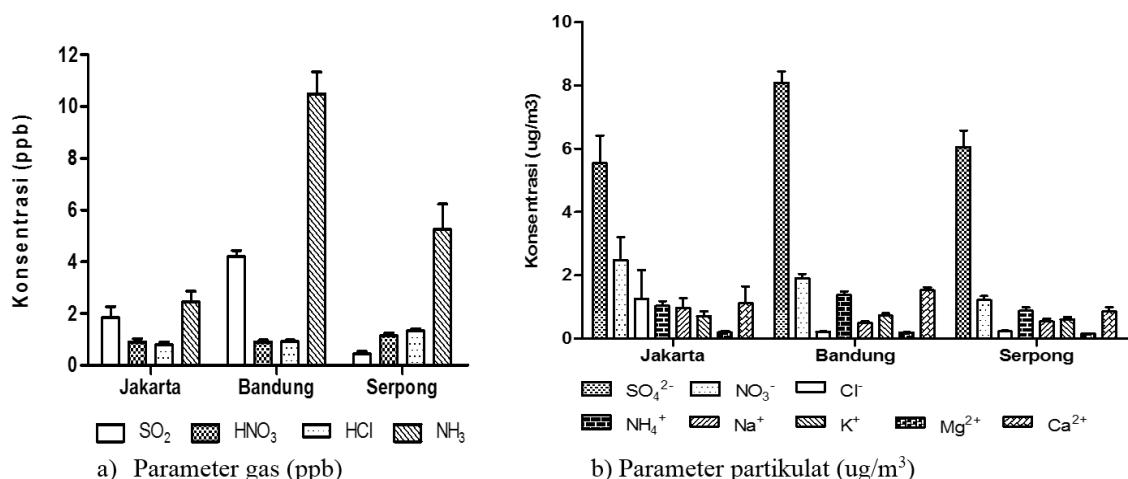
Sumbu x merepresentasikan konsentrasi partikulat SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> dalam satuan  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sementara sumbu y untuk nama-nama bulan dalam periode setahun.

tanah berpotensi sebagai sumber NH<sub>3</sub> yang tinggi (Budiwati, Budiyo, Setyawati, & Indrawati, 2010). Hal ini juga selaras dengan konsentrasi NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dalam air hujan di Bandung yang relatif cukup tinggi (Budiwati, 2018). Lokasi sampling di Serpong selain dikelilingi oleh pepohonan, juga berjarak 5 km ke arah utara dengan lokasi penimbunan sampah kota (Lestari & Nelson, 2017).

Secara umum, tidak terlihat adanya pola konsentrasi yang jelas pada musim kemarau maupun hujan. Hasil uji statistik yang dilakukan untuk melihat perbandingan konsentrasi pencemar saat musim hujan pada bulan Oktober – Maret dan kemarau pada bulan April - September, menunjukkan bahwa di Jakarta tidak ada perbedaan nyata

secara statistik untuk parameter gas SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl, NH<sub>3</sub>, serta partikulat SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> sedangkan Na<sup>+</sup> berbeda nyata ( $p < 0,05$ ). Tidak ada perbedaan nyata untuk seluruh parameter di Bandung. Demikian pula di Serpong tidak ada perbedaan untuk parameter NH<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, dan Ca<sup>2+</sup>, sementara itu untuk parameter SO<sub>2</sub>, HCl, dan K<sup>+</sup> berbeda nyata ( $p < 0,05$ ), serta parameter HNO<sub>3</sub> dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup> berbeda nyata ( $p < 0,001$ ).

Dalam fase partikulat, ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> merupakan spesies dominan di tiap lokasi. Konsentrasi SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> paling tinggi terjadi bulan Februari di Bandung sebesar 11.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , di Jakarta pada bulan Juli sebesar 10.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dan di Serpong pada bulan September



**Gambar 6.** Konsentrasi Parameter Gas dan Partikulat dalam Deposisi Kering di Jakarta, Bandung, dan Serpong tahun 2019

**Tabel 3.** Hasil uji beda parameter deposisi kering di tiap lokasi

	SO <sub>2</sub>	HNO <sub>3</sub>	HCl	NH <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Jakarta vs Bandung	*	ns	ns	***	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	**
Jakarta vs Serpong	*	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bandung vs Serpong	***	ns	**	***	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	*

Sumber data: P3KLL (2020), LAPAN (2020)

Jumlah data (n) masing-masing kota; Jakarta (n=16), Bandung (n=24), Serpong (n=24)

ns menunjukkan tidak ada perbedaan nyata secara statistik

\*, \*\*, and \*\*\* menunjukkan perbedaan nyata secara statistik pada  $p < 0,05$ ,  $p < 0,001$ , and  $p < 0,0001$ , secara terpisah

sebesar 8.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tidak seperti di Bandung dan Serpong, rasio komposisi partikulat anion  $\text{SO}_4^{2-}$  dan  $\text{NO}_3^-$  di Jakarta relatif lebih setara. Keberadaan ion  $\text{SO}_4^{2-}$  dan  $\text{NO}_3^-$  di dalam partikulat merupakan salah satu tanda sumber emisi antropogenik, diduga berasal dari kegiatan yang menggunakan bahan bakar fosil dan emisi berbagai kegiatan industri yang berada di sekitar lokasi.

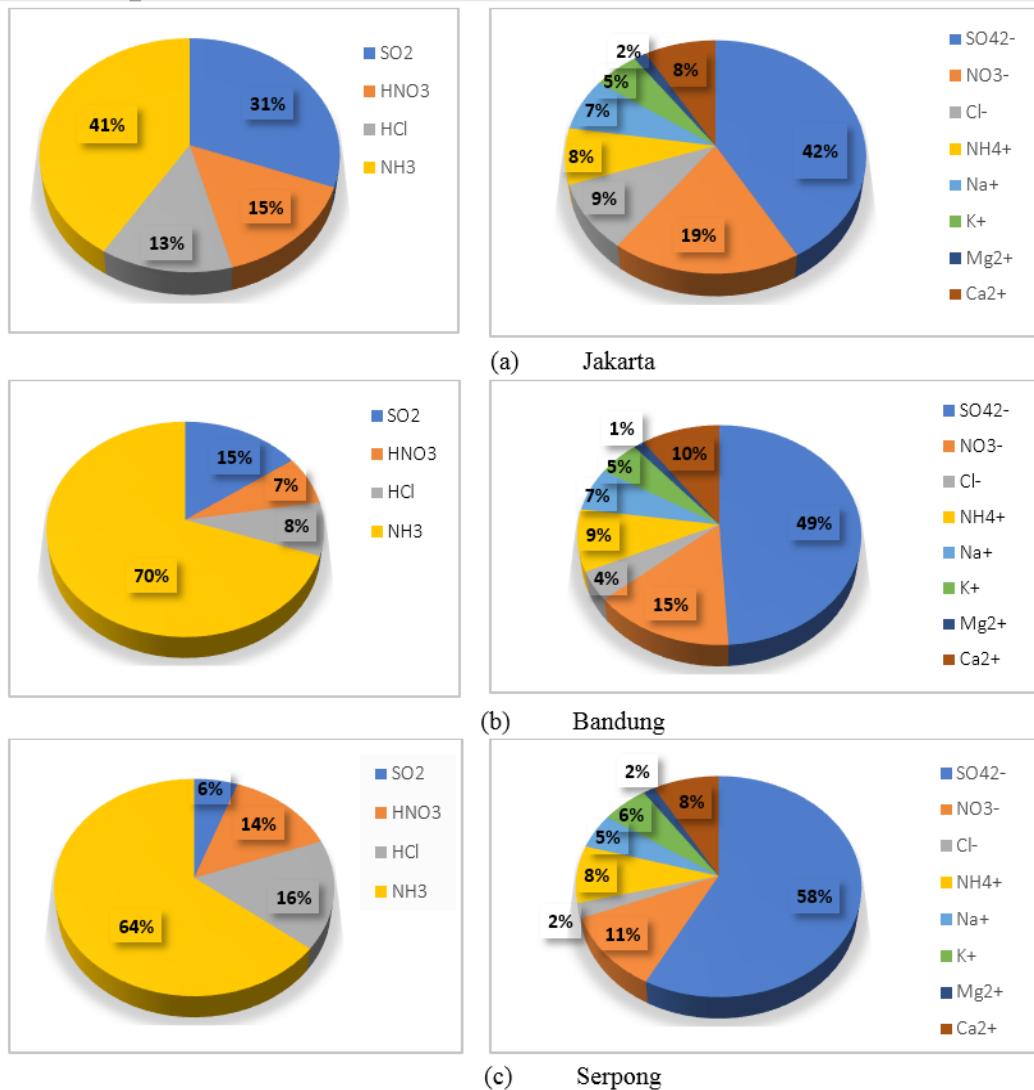
Hasil uji statistik Kruskal-Wallis pada Tabel 3. menunjukkan adanya perbedaan nyata secara statistik pada  $p < 0,05$ ,  $p < 0,001$ , and  $p < 0,0001$ , secara terpisah untuk konsentrasi beberapa parameter deposisi kering di tiap lokasi, meskipun ada pula parameter yang tidak berbeda nyata.

Kegiatan antropogenik diduga menjadi sumber penyebab pola komposisi kimia. Profil komposisi kimia berkaitan dengan klasifikasi lokasi dan potensi sumber emisi

di sekitar lokasi sampling (Monteith *et al.*, 2016). Komposisi kimia pada parameter deposisi kering di kota Jakarta, Bandung, dan Serpong memperlihatkan komposisi  $\text{NH}_3$  masing-masing sebesar 41%, 70%, dan 64%. Gas  $\text{SO}_2$  di Jakarta menempati 31% dari total fase gas, berbeda dengan konsentrasi di Bandung dan Serpong yang relatif kecil, yaitu 15% dan 6%. Kontribusi senyawa garam laut juga terlihat pada  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$ , dimana hasil di Jakarta menunjukkan kecenderungan keseimbangan lebih tinggi dibanding di lokasi lain karena letaknya yang berdekatan dengan laut.

Dominasi deposisi basah dan atribusi dari deposisi kering di wilayah Asia secara konsisten ditemukan dari berbagai aplikasi model (Yu *et al.*, 2017). Adanya deposisi berlebih dibandingkan dengan emisi antropogenik dijumpai di wilayah Jepang,





**Gambar 7.** Komposisi Kimia Deposisi Kering pada Fase Gas dan Partikulat Tahun 2019 di Jakarta, Bandung, dan Serpong

Asia bagian utara, dan Asia Tenggara menunjukkan indikasi kemungkinan adanya transportasi jarak jauh di dalam maupun luar wilayah benua Asia (Yu *et al.*, 2017).

Variasi komposisi kimia dapat disebabkan oleh pola musim, kondisi meteorologi, kondisi permukaan, dan jenis spesies kimia (EANET, 2015b) serta adanya kontribusi campuran sumber lokal dan regional (Ceron *et al.*, 2013). Sebuah studi yang dilakukan di Tieshanping, kota Chongqing menunjukkan adanya beban deposisi kering sulfur, kalsium, dan nitrogen yang lebih tinggi dibanding deposisi basah

(Jin, Shao, Zeng, Zhao, & Tang, 2006). Studi komprehensif di China menunjukkan adanya dinamika spasiotemporal deposisi asam selama tiga dekade terakhir menunjukkan strategi hemat energi dan penggunaan teknologi canggih guna pengendalian emisi polutan efektif dalam mengurangi hal tersebut (Yu *et al.*, 2017). Sebuah studi di Sri Lanka menunjukkan bahwa ibukota Kolombo memiliki tingkat deposisi sulfur paling rendah karena terletak di dekat laut dan berada pada permukaan yang datar, sementara kota Jaffna terindikasi paling tinggi karena letaknya yang berdekatan

dengan India, dimana lintas batas pencemar sangat berpengaruh (Ileperuma, 2015).

Secara teoritis, total konsentrasi partikulat dan senyawa gas di wilayah selain perkotaan umumnya relatif lebih rendah dibanding wilayah perkotaan yang dianggap sebagai cerminan klasifikasi lokasi (Aikawa, Hiraki, Mukai, & Murano, 2008). Namun pada kajian ini sedikit berbeda untuk lokasi di Jakarta dengan total konsentrasi yang lebih rendah dibanding Bandung. Biasanya terjadi perbedaan konsentrasi yang jelas di negara sub tropis, dimana konsentrasi senyawa nitrat di tiap musim umumnya rendah di musim panas dan tinggi di musim dingin, sementara untuk parameter amonium maupun sulfat tidak ada perbedaan (Aikawa *et al.*, 2008). Seperti halnya di lokasi Jakarta, Bandung, dan Serpong, dalam beberapa studi juga diketahui bahwa  $\text{NH}_3$  merupakan bagian terbesar dari komponen fase gas dalam deposisi kering (Aikawa *et al.*, 2008). Data emisi  $\text{NH}_3$  dan  $\text{NH}_4^+$  dalam air hujan yang cukup tinggi di kawasan Asia Timur mendukung hasil pemantauan ini (Chao, Zi-Fa, & Gbaguidi, 2010; EANET, 2015a).  $\text{NH}_4^+$  merupakan senyawa penting dalam presipitasi kimia di wilayah kontinental Asia Timur karena rasio  $\text{NH}_4^+$  di daratan kontinental umumnya lebih tinggi pada dibanding daerah pesisir dan pulau (Chao *et al.*, 2010).

#### 4. Simpulan

Berdasarkan analisis data dapat disimpulkan bahwa gas  $\text{NH}_3$  dan partikulat  $\text{SO}_4^{2-}$  merupakan senyawa pencemar tertinggi yang terdapat dalam deposisi kering. Dalam penelitian selama tahun 2019 ini tidak terlihat adanya perbedaan nyata secara statistik untuk konsentrasi polutan di musim hujan dan kemarau kecuali untuk  $\text{Na}^+$  di Jakarta ( $p < 0,05$ ), dan di Serpong  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ , dan  $\text{K}^+$  ( $p < 0,05$ ), serta parameter  $\text{HNO}_3$  dan  $\text{NO}_3^-$  ( $p < 0,001$ ).

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam kegiatan ini, yaitu P3KLL-KLHK, PSTA-LAPAN, dan BMKG yang menyediakan dana pemantauan, serta seluruh tim yang melakukan sampling dan analisis di laboratorium.

#### 6. Kepenghargaan

Seluruh penulis merupakan suatu kesatuan tim tak terpisahkan yang memberikan kontribusi dalam tiap bagiannya. Penulis ke 1 melakukan penyusunan tulisan dan verifikasi data, sementara Penulis ke 2, 3, dan 4 melakukan pengujian, pengolahan, dan membantu interpretasi data.

#### Daftar Pustaka

- Aikawa, M., & Hiraki, T. (2008). Methodology of analysis associating survey results by the filter-pack method with those of precipitation- Acid-base balance on acid-related and alkali-related chemical species in urban ambient air and its influence on the acidification of precipitation. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 61(1), 21-29. doi:10.1007/s10874-009-9122-9
- Aikawa, M., Hiraki, T., Mukai, H., & Murano, K. (2008). Characteristic variation of concentration and chemical form in sulfur, nitrate, ammonium, and chloride species observed at urban and rural sites of Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 190(1), 287-297. doi:10.1007/s11270-007-9600-0
- APIS. (2016). Sulphur dioxide: emission and trends. Retrieved from [http://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/overview\\_SO2.htm](http://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/overview_SO2.htm)
- Budiwati, T. (2018). Analisis hujan asam dan  $\text{CO}_2$  atmosfer (pp. 276-281). Yogyakarta: UNY.
- Budiwati, T., Budiyono, A., Setyawati, W., & Indrawati, A. (2010). Analisis korelasi pearson untuk unsur-unsur kimia air hujan di Bandung. *Jurnal Sains Dirgantara*, 7(2).

- Cerón, R., Cerón, J., Aguilar, C., Montalvo, C., Carballo, C., Cárdenas, B., . . . Carrillo, J. (2012). Atmospheric dry deposition in the proximity of oil-fired power plants at Mexican Pacific coast. *Journal of Environmental Protection*, 3(9), 1228-1237.
- Ceron, R. M., Ceron, J. G., Carballo, C. G., Aguilar, C. A., Montalvo, C., Benitez, J. A., . . . Gomez, M. M. (2013). Chemical composition, fluxes and seasonal variation of acid deposition in Carmen Island, Campeche, Mexico. *Journal of Environmental Protection*, 50-56. doi:10.4236/jep.2013.48A1007.
- Chao, G., Zi-Fa, W., & Gbaguidi, E. A. (2010). Ammonium variational trends and the ammonia neutralization effect on acid rain over East Asia. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3(2), 120-126.
- Dasgupta, P. K., & Maleki, F. (2019). Ion exchange membranes in ion chromatography and related applications. *Talanta*, 204, 89-137.
- DIONEX. (2010). Ion chromatography from basis to application. In Dionex (Ed.), *Dionex Ion Chromatography Seminar*. Jakarta.
- 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. doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.018
- EANET. (2010). Technical manual on dry deposition flux estimation in East Asia. Niigata: EANET.
- EANET. (2015a). *Data Report of Acid Deposition in East Asia 2014*. Retrieved from Niigata:
- EANET. (2015b). *Strategy paper on future direction of monitoring for dry deposition of the EANET (2016-2020)*. Retrieved from Niigata
- Ileperuma, O. (2015). Model assessment of acid deposition potential by SO<sub>x</sub> in Sri Lanka. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 43(3).
- Jin, L., Shao, M., Zeng, L., Zhao, D., & Tang, D. (2006). Estimation of dry deposition fluxes of major inorganic species by canopy throughfall approach. *Chinese Science Bulletin*. doi:10.1007/s11434-006-2040-1.
- Kryza, M., Werner, M., Dore, A. J., Błaś, M., & Sobik, M. (2012). The role of annual circulation and precipitation on national scale deposition of atmospheric sulphur and nitrogen compounds. *Journal of environmental management*, 109, 70-79.
- Lestari, R. P., & Nelson, R. (2017). Komposisi kimia deposisi kering di dua wilayah kategori pedesaan, Serpong dan Bogor. *Ecolab*, 11(2), 92-102.
- Likens, G. E. (2020). Atmospheric acid deposition. *Atmosphere and Climate*, 45.
- Michalski, R. (2016). *Application of IC-MS and IC-ICP-MS in environmental research*: Wiley Online Library.
- Monteith, D., Henrys, P., Banin, L., Smith, R., Morecroft, M., Scott, T., . . . Bowmaker, V. (2016). Trends and variability in weather and atmospheric deposition at UK Environmental Change Network sites (1993–2012). *Ecological Indicators*, 68, 21-35.
- Nesterenko, P. N., & Paull, B. (2017). Ion chromatography *Liquid Chromatography* (pp. 205-244): Elsevier.
- P3KLL. (2014). Instruksi kerja : penentuan komponen partikel Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan gas-gas SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, dan HCl dalam deposisi kering dengan metode filter pack (Vol. IK-1/U/LPDL (2014)). Serpong: P3KLL.
- Yoshikawa, K., Uekusa, Y., & Sakuragawa, A. (2015). Determination of sulphite in wines using suppressed ion chromatography. *Food Chemistry*, 174, 387-391. doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.066
- Yu, H., He, N., Wang, Q., Zhu, J., Gao, Y., Zhang, Y., . . . Yu, G. (2017). Development of atmospheric acid deposition in China from the 1990s to the 2010s. *Environmental Pollution*, 231, 182-190.
- Zatirakha, A., Smolenkov, A., & Shpigun, O. (2016). Preparation and chromatographic performance of polymer-based anion exchangers for ion chromatography: A review. *Analytica Chimica Acta*, 904, 33-50