

## **Komposisi Kimia Deposisi Basah di Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, dan Maros Selama Tahun 2015-2019**

### ***Chemical Composition of Wet Deposition in Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, and Maros During 2015-2019***

**Retno Puji Lestari<sup>1</sup>, Muharam Syam Nugraha<sup>2</sup>, Asri Indrawati<sup>3</sup>, Suryanti<sup>2</sup>, Eka Suharguniyawan<sup>2</sup>, Sri Wulan Siti Khotijah<sup>2</sup>, Yuni Kartika<sup>2</sup>, Ahmad Rafly Juliana<sup>2</sup>, Bambang Hindratmo<sup>1</sup>, Dyah Aries Tanti<sup>3</sup>, dan Ricky Nelson<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Pusat Standardisasi Instrumen Kualitas Lingkungan Hidup (PSIKLH)-KLHK, Kawasan PUSPIPTEK Gedung 210, Serpong – Tangerang Selatan 15310.

<sup>2</sup>Pusat Informasi Perubahan Iklim, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran Jakarta Pusat, DKI Jakarta 10720.

<sup>3</sup>Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)- Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Dr.Djundjunan No 133 Bandung 40173.

E-mail: emc\_acdep@yahoo.com

Diterima 4 Oktober 2021, direvisi 7 Oktober 2021, disetujui 13 Oktober 2021

#### **ABSTRAK**

**Komposisi Kimia Deposisi Basah di Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, dan Maros Selama Tahun 2015-2019.** Dalam dekade terakhir, peningkatan konsumsi bahan bakar fosil yang berasal dari pembangunan ekonomi yang cepat dari sektor transportasi dan industri. Kegiatan tersebut telah menghasilkan emisi berbagai polutan udara dan menyebabkan masalah lingkungan di seluruh dunia, tak terkecuali di Indonesia. Deposisi asam yang diakibatkan oleh pencemaran udara masih merupakan isu wilayah di Asia. Jaringan Pemantauan Deposisi Asam di Asia Timur (EANET) yang mencakup Asia Timur Laut dan Tenggara, telah melakukan kegiatan pemantauan deposisi asam dan pengaruhnya terhadap ekosistem. Terdapat 5 (lima) lokasi pemantauan deposisi asam di Indonesia yang tergabung dalam EANET, yaitu Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, dan Maros. Parameter air hujan yang dianalisis adalah pH, daya hantar listrik,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , dan  $\text{SO}_4^{2-}$  dan pH air hujan dapat mengindikasikan potensi terjadinya deposisi asam. Selama tahun 2015-2019, rata-rata tingkat keasaman air hujan di Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, dan Maros masing-masing adalah 4,85, 5,17, 5,55, 5,23, dan 5,28. Meskipun masih terindikasi mengalami efek deposisi asam, nilai pH tersebut relatif lebih tinggi dibandingkan dengan periode sebelumnya. Potensi penyebab keasaman air hujan dapat dilihat melalui ion  $\text{NO}_3^-$  dan nss  $\text{SO}_4^{2-}$ , sementara senyawa penetralisasinya adalah  $\text{NH}_4^+$  dan nss  $\text{Ca}^{2+}$ . Fraksi ekuivalen nitrat menunjukkan bahwa  $\text{HNO}_3$  yang lebih berpengaruh dalam terjadinya deposisi asam di Jakarta, Serpong, dan Bandung, tetapi di Kototabang dan Maros lebih disebabkan oleh  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Fraksi ekuivalen amonium di Kototabang menunjukkan bahwa peran  $\text{CaCO}_3$  lebih dominan dalam menetralisasi senyawa asam, sementara di kota-kota lainnya lebih didominasi oleh  $\text{NH}_3$ . Kajian ini mengindikasikan bahwa dominasi sumber pencemaran berasal dari kegiatan antropogenik.

**Kata kunci:** pencemaran udara, deposisi basah, pH, keasaman, *ion chromatography*.

#### **ABSTRACT**

***Chemical Composition of Wet Deposition in Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, and Maros During 2015-2019.*** In recent decade, the growing consumption of fossil fuels has been driven by rapid economic development from transportation and industrial sectors. Those activities had led to enormous emissions of multiple air pollutants and related environmental problems throughout the world, including

*Indonesia. Acid deposition which was induced by air pollution remains as a regional issue in Asia. The Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) covering the area of Northeast and Southeast Asia has been conducted the acid deposition monitoring and its effects on ecosystems. There are 5 (five) acid deposition monitoring sites in Indonesia which are included in EANET, namely Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, and Maros. Rain water parameters analysed were pH, conductivity,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$ . Rain water pH indicates the potential of acid deposition. During the year of 2015-2019, the average rain water acidity in Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, and Maros was 4.84, 5.17, 5.55, 5.23, and 5.28, respectively. Although indication of acid deposition still remained, those pH values are relatively higher than previous period. Potential causes for rain water acidity may be observed through  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ , while the neutralizing species are  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$ . The nitrate equivalent fraction indicates that  $\text{HNO}_3$  has a greater influence on the occurrence of acid deposition in Jakarta, Serpong, and Bandung, but in Kototabang and Maros it is likely caused by  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . The ammonium equivalent fraction in Kototabang shows that the role of  $\text{CaCO}_3$  is more dominant in neutralization of acidic compounds, while in other cities it is more dominated by  $\text{NH}_3$ . This study indicates that the dominant sources of pollution originate from anthropogenic activities.*

**Keywords:** air pollution, wet deposition, pH, acidity, ion chromatography.

## 1. Pendahuluan

Pencemaran udara dapat disebabkan oleh senyawa polutan yang dihasilkan dari kegiatan emisi sumber tidak bergerak seperti cerobong industri, pembangkit listrik, pembakaran sumber domestik, maupun insinerator (APIS, 2016; Burns *et al.*, 2016; Cui *et al.*, 2020; Duan *et al.*, 2016). Pencemaran udara secara lebih lanjut dapat mengakibatkan terjadinya deposisi asam, yaitu salah satu fenomena yang menggambarkan turunnya senyawa bersifat asam dari atmosfer ke permukaan bumi (APIS, 2015). Asam yang mengandung sulfur dan nitrogen merupakan penyebab terjadinya pengasaman pada atmosfer (EANET, 2015b). Turunnya senyawa bersifat asam tersebut salah satunya melalui air hujan, yang dikenal dengan istilah deposisi basah. Polutan atmosfer dan deposisi telah terbukti dipengaruhi tidak hanya oleh sumber lokal tetapi juga oleh transportasi jarak jauh (Itahashi *et al.*, 2020). 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 sehingga dapat bersifat lebih asam.

Dalam perkembangannya sejak tahun 1998, melalui kegiatan pemantauan deposisi asam jaringan EANET yang dilakukan secara terpadu di 13 (tiga belas) negara di wilayah Asia Timur Laut dan Tenggara, terlihat bahwa tingkat deposisi sulfur dan nitrogen di negara-negara anggota jaringan memiliki konsentrasi lebih tinggi dibandingkan dengan negara Eropa dan Amerika (Sase, 2017). Berdasarkan hasil identifikasi sumber di Cina, diketahui bahwa deposisi asam memiliki hubungan yang erat antara terjadinya presipitasi dengan faktor sosio-ekonomi yang berhubungan dengan kegiatan antropogenik (Cui *et al.*, 2020).

Kegiatan ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi pencemar parameter deposisi basah di beberapa wilayah di Indonesia yaitu Jakarta, Serpong, Bandung, Kototabang, dan Maros selama periode pemantauan tahun 2015-2019 dan melihat tren yang terjadi dibandingkan dengan periode sebelumnya. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) melakukan pemantauan di Jakarta,

Kototabang, dan Maros, sedangkan Pusat Standardisasi Instrumentasi Kualitas Lingkungan Hidup – Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PSIKLH-KLHK) melakukan pemantauan di Serpong, sementara Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional – Badan Riset dan Inovasi Nasional (LAPAN-BRIN) melakukan kegiatan di Bandung.

## 2. Metodologi

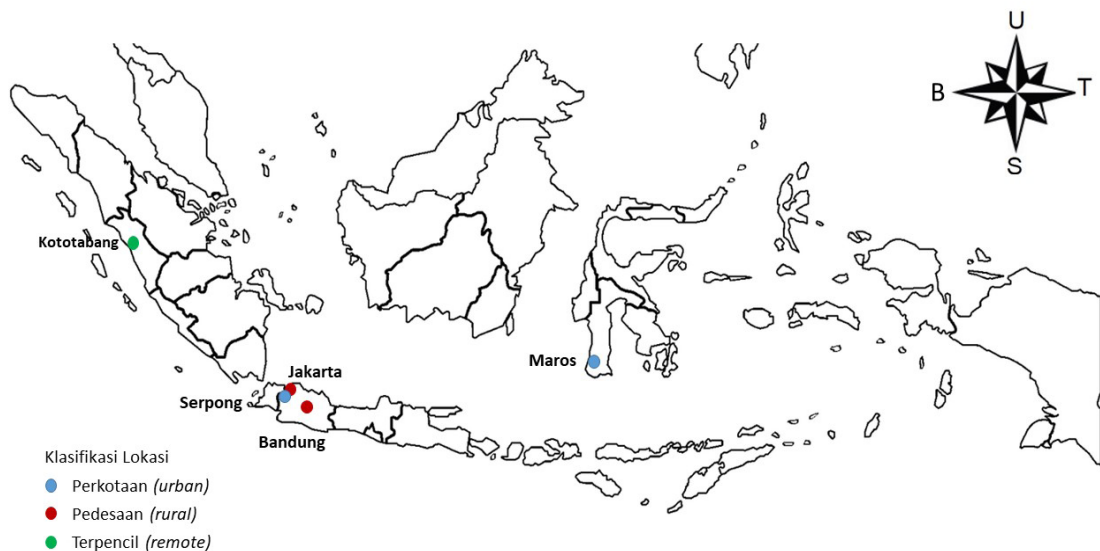
Lokasi kegiatan sampling dilakukan di lima lokasi berbeda seperti terlihat pada Tabel 1. Sampel air hujan di Serpong dan Bandung dikumpulkan setiap hari hujan (*event*) menggunakan *wet-only sampler*, sementara di Jakarta, Kototabang, dan Maros dikumpulkan setiap minggu. Pengukuran pH

dan daya hantar listrik di Kototabang dan Maros dilakukan secara *on-site*, kemudian sampel disimpan dalam botol polietilen dan diawetkan sebelum dikirimkan ke BMKG Jakarta. Sampel dari Jakarta, Kototabang, dan Maros dianalisis oleh Laboratorium Kimia BMKG Jakarta, sementara sampel dari Serpong dianalisis di Laboratorium PSIKLH, dan sampel dari Bandung dianalisis di Laboratorium LAPAN. Metode analisis air hujan yang dilakukan di laboratorium mengacu pada panduan EANET untuk pengujian deposisi basah (EANET, 2010).

Data yang digunakan dalam kajian ini adalah data pemantauan selama tahun 2015-2019 yang telah melewati jaminan mutu dan pengendalian mutu yang dikeluarkan oleh EANET, dan diverifikasi oleh *QA/QC manager*. Masing-masing jumlah total data

**Tabel 1.** Informasi lokasi sampling di Indonesia

Lokasi	Klasifikasi	Lintang	Bujur	Ketinggian (m)
Serpong	pedesaan	06 <sup>o</sup> 21'01,9" LS	106 <sup>o</sup> 40'04,07" BT	64
Bandung	perkotaan	06 <sup>o</sup> 53'41,63" LS	107 <sup>o</sup> 35'11,31" BT	753
Jakarta	perkotaan	06 <sup>o</sup> 09'21,51" LS	106 <sup>o</sup> 50'32,67" BT	7
Kototabang	terpencil	0 <sup>o</sup> 12'8.70"LS	100 <sup>o</sup> 19'4.50"BT	845
Maros	pedesaan	04 <sup>o</sup> 59' 50.29' LS	119 <sup>o</sup> 34' 17.73" BT	1



**Gambar 1.** Lokasi pemantauan deposisi asam di Indonesia

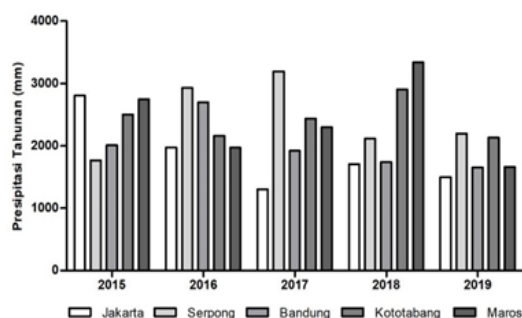
**Tabel 2.** Metode analisis deposisi basah

Lokasi	Parameter	Metode	Instrument
Serpong	pH	Elektroda gelas	HORIBA F-22
	daya hantar listrik	Sel konduktivitas	HORIBA Navi DS-52
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS5000
	Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS5000
Bandung	pH	Elektroda gelas	HORIBA F-51
	EC	Sel konduktivitas	WTW Inolab Cond Level 2
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS 1500
	Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS 1600
Jakarta/ Kototabang/ Maros	pH	Elektroda gelas	THERMO Electron Corp. ORION 3 Star
	EC	Sel konduktivitas	THERMO Electron Corp. ORION 3 Star
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS 1600
	Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Kromatografi ion	DIONEX ICS 1600

di Serpong (n=395), Bandung (n=461), Jakarta (n=155), Kototabang (n=195), dan Maros (n=135). Data diolah menggunakan Microsoft Excel dan *Graphad Prism 5.0*. Uji statistik non parametrik Kruskal-Wallis diaplikasikan untuk mengetahui perbedaan konsentrasi pencemar dominan yang sama di tiap lokasi.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Melalui pemantauan secara berkala selama tahun 2015-2019 diperoleh data sebagai berikut:



Sumber data: PSIKLH, BMKG, dan LAPAN

**Gambar 1.** Total presipitasi tahunan pada tahun 2015-2019

Kondisi topografi daerah yang meliputi wilayah pantai, lereng, pegunungan,

maupun wilayah khusus dapat dihubungkan dengan banyaknya curah hujan di wilayah tersebut (Prasetyo, Irwand, & Pusparini, 2018). Serpong, Jakarta, Bandung, dan Maros terletak di wilayah dengan curah hujan *monsunal*, sementara Kototabang mempunyai curah hujan ekuatorial (Aldrian & Susanto, 2003).

Menurut pengamatan BMKG, dari data curah hujan rata-rata selama rentang waktu minimal 30 tahun, diperoleh normal curah hujan bulanan yang terbagi menjadi 3 kategori, yaitu rendah (0–100 mm), menengah (100–300 mm), tinggi (300–500 mm), dan sangat tinggi (>500 mm) (BMKG, 2017). Melalui Grafik 1 yang menggambarkan total dari presipitasi tahunan dari tiap-tiap kota yang dipantau, terlihat bahwa Jakarta memiliki total presipitasi paling kecil dibandingkan dengan lokasi lainnya. Tren ini berbeda dengan tren presipitasi sebelumnya pada tahun 2008-2015. Saat itu Serpong memiliki total presipitasi paling rendah dibandingkan dengan kota-kota lainnya (Lestari, Nasution, Budiwati, Rachmawati, & Indrawati, 2018).

Dalam kajian Charlson and Rodhe (1982) dinyatakan bahwa nilai pH air hujan dapat mengindikasikan potensi

deposisi asam (Cui *et al.*, 2020). Rata-rata pH tertimbang berdasarkan *weighted precipitation mean* tahunan selama tahun 2015–2019 terlihat pada Tabel 3. Rata-rata nilai pH di lokasi pemantauan ini berada pada kisaran pH 4,6–6,4. Rata-rata pH di Jakarta adalah 4,84, Serpong 5,17, Bandung 5,55, Kototabang 5,23, dan Maros 5,28. Apabila dibandingkan dengan nilai rata-rata tahunan pH presipitasi tertimbang selama tahun 2008-2015 pada tahun kajian sebelumnya di Serpong yaitu 4,86, Bandung 5,30, Jakarta 4,71, Maros 5,39, dan Kototabang 4,93 (Lestari *et al.*, 2018), maka terlihat adanya kenaikan pH di seluruh lokasi pemantauan, kecuali Maros. Dari rata-rata nilai pH setiap tahun sepanjang 2015-2019, terlihat nilai pH < 5,6 yang mengindikasikan bahwa seluruh lokasi terkontaminasi senyawa asam kecuali di kota Bandung pada tahun 2018 dan 2019, yaitu masing-

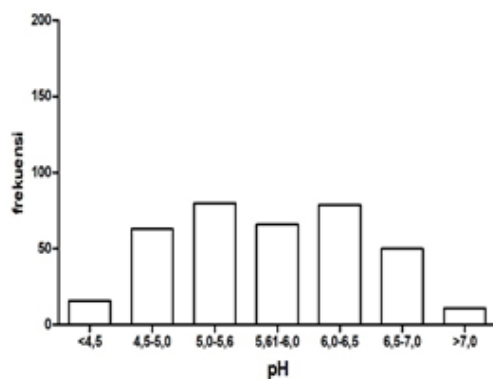
masing 5,66 dan 6,38. Hasil pemantauan ini tidak bertentangan dengan studi pemodelan kualitas udara menggunakan *Weather and Research Forecasting (WRF)-Chem* yang menunjukkan bahwa di kota Jakarta sebagai daerah perkotaan (urban) memiliki pH < 5,6 (Turyanti & Chaerunnisa, 2017). Model tersebut mensimulasikan emisi, transportasi, pencampuran, dan transformasi polutan gas-gas dan aerosol di atmosfer yang didukung oleh kondisi meteorologi (Turyanti & Chaerunnisa, 2017).

Distribusi frekuensi pH > 5,6 di Bandung memiliki jumlah lebih tinggi dibanding kota lainnya, kemudian diikuti dengan distribusi pH di Serpong. Dua lokasi ini, Serpong (n=395) dan Bandung (n=461), memiliki jumlah sampel lebih banyak karena diambil setiap hari hujan apabila dibandingkan dengan lokasi-lokasi pemantauan milik BMKG yaitu Jakarta

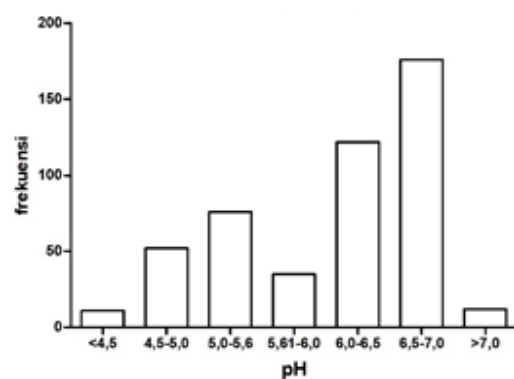
**Tabel 3.** Rata-rata tahunan pH pada tahun 2015-2019

Lokasi/Tahun	2015	2016	2017	2018	2019	Rata-rata 2015-2019 ± SD
Serpong	4,94	5,18	5,20	5,21	5,34	5,17 ± 0,15
Jakarta	4,84	4,95	4,89	4,69	4,86	4,85 ± 0,10
Bandung	5,36	5,08	5,25	5,66	6,38	5,55 ± 0,51
Kototabang	4,91	5,30	5,20	5,31	5,44	5,23 ± 0,20
Maros	5,24	5,24	5,31	5,38	5,23	5,28 ± 0,06

Sumber data: PSIKLH, BMKG, dan LAPAN



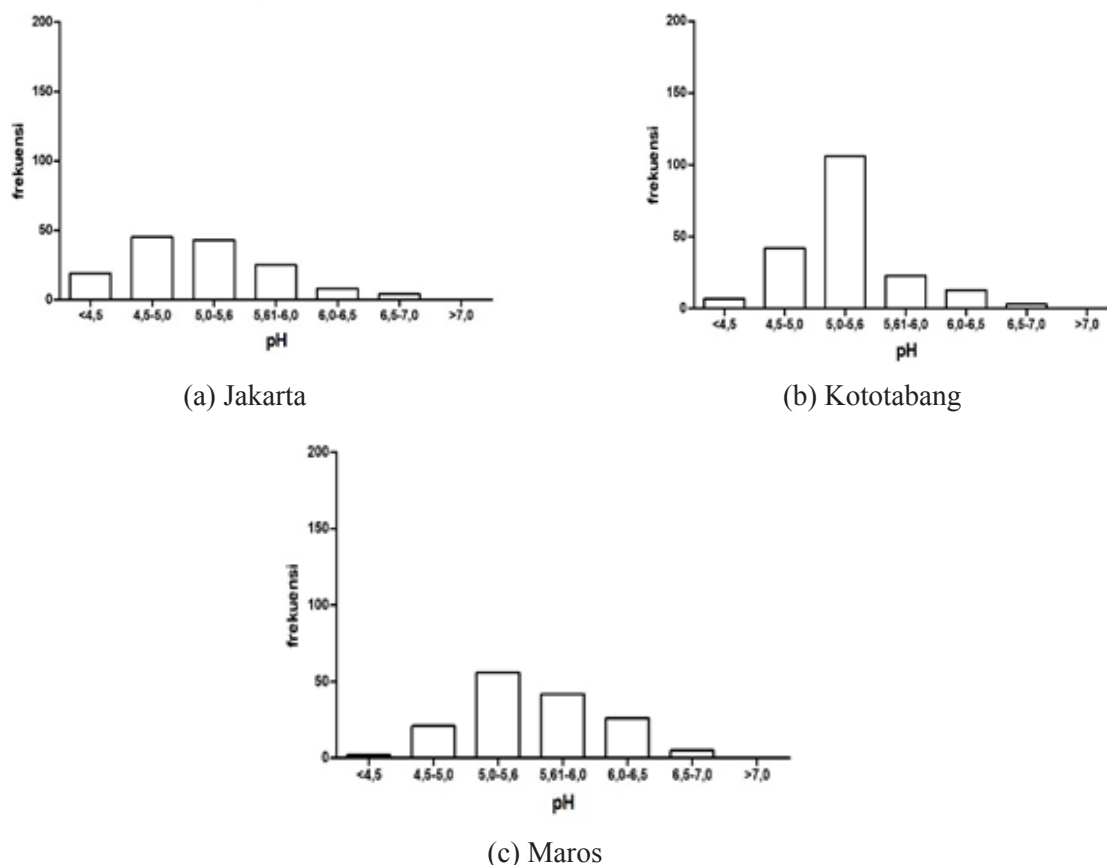
(a) Serpong



(b) Bandung

sumber data: PSIKLH & LAPAN

**Gambar 3.** Distribusi pH di Serpong dan Bandung pada tahun 2015-2019



Sumber data: BMKG Jakarta

**Gambar 4.** Distribusi pH di Jakarta, Kototabang dan Maros pada tahun 2015-2019

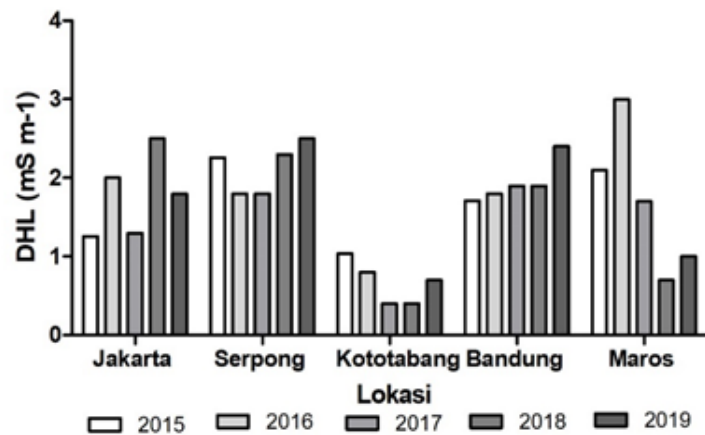
(n=155), Kototabang (n=195), dan Maros (n=135) yang mempunyai sampel mingguan. Dominasi distribusi sampel tertinggi di Jakarta berada pada kisaran pH 4,5–4,9, sementara di Kototabang dan Maros pada kisaran pH 5,0–5,6.

Sifat asam air hujan yang dilihat dari nilai pH tergantung pada konsentrasi ion-ion yang terkandung di dalamnya seperti  $\text{SO}_4^{2-}$  dan  $\text{NO}_3^-$ , namun apabila pHnya lebih tinggi dari 6,0, maka hal tersebut diakibatkan oleh tingginya konsentrasi  $\text{NH}_4^+$  sehingga terjadi netralisasi (EANET, 2016). Banyaknya asam yang jatuh ke permukaan bumi akan berpengaruh pada efek deposisi asam di lingkungan (Anil, Alagha, & Karaca, 2017; EANET, 2016).

Rata-rata DHL di seluruh lokasi bervariasi dari 0,4–3,0  $\text{mS m}^{-1}$ . Beberapa studi yang mengkaji hubungan korelasi

matriks antara DHL dengan ion-ion dalam air hujan menunjukkan adanya korelasi positif antara tingginya nilai DHL dengan konsentrasi ion (Chon, Kim, Bae, & Cho, 2015; Lara *et al.*, 2001; Martins, Nogarotto, Mortatti, & Pozza, 2019; Xiao, 2016). Gambar 6. menunjukkan rata-rata DHL yang terukur dalam air hujan, terlihat bahwa Kototabang memiliki nilai DHL paling rendah dibanding kota-kota lainnya.

Karakteristik senyawa kimia dalam air hujan berdasarkan data rata-rata tahunan di tiap lokasi dapat dilihat pada Gambar 6. Komponen kimia dari presipitasi di masing-masing lokasi akan membantu mengungkapkan informasi tingkat pencemaran, potensi sumber dan transportasi polutan (Anil *et al.*, 2017; Chon *et al.*, 2015). Di Serpong dan Jakarta,  $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{NO}_3^-$  merupakan ion kimia dominan, sementara



Sumber data: PSIKLH, BMKG, dan LAPAN

**Gambar 5.** Rata-rata tahunan daya hantar listrik (DHL) pada tahun 2015-2019

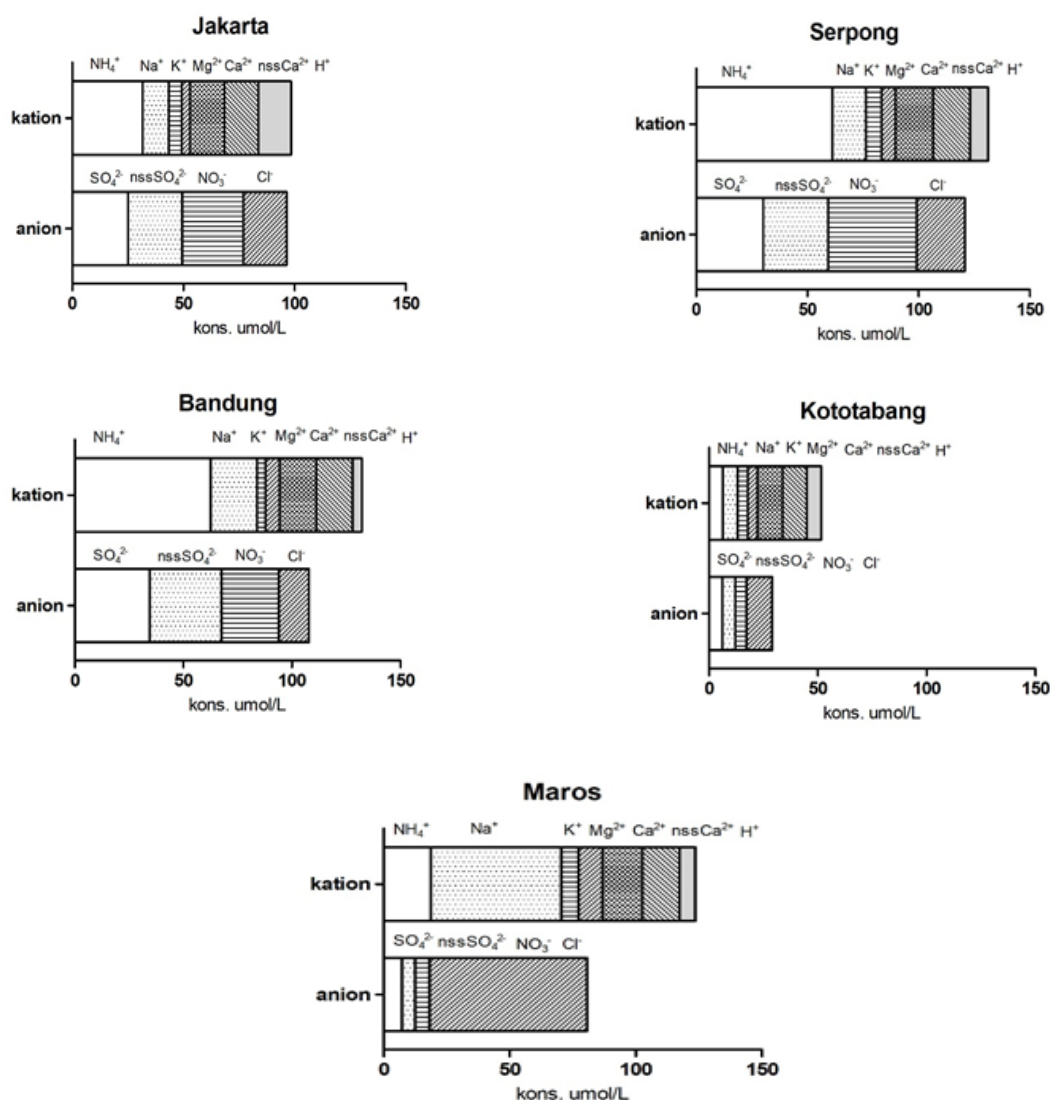
di Bandung adalah  $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ion  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  di kota umumnya diakibatkan oleh kegiatan antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil, sementara sumber  $\text{NH}_4^+$  kemungkinan besar didominasi oleh sumber alamiah (Ceron *et al.*, 2013; Likens, 2020; Yim, Gu, Shapiro, & Stephens, 2019). Hasil uji statistik Kruskal-Wallis tidak menunjukkan adanya perbedaan nyata secara statistik untuk parameter dominan yaitu  $\text{NH}_4^+$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  di seluruh lokasi pemantauan ( $p < 0.05$ ).

Melalui kajian karakterisasi deposisi asam di Jakarta berdasarkan model *Positive Matrix Factorization* (PMF) menunjukkan 70,3%  $\text{SO}_4^{2-}$  dan 71,6%  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  berasal dari proses pembakaran bahan mengandung sulfur yang berasal dari emisi kendaraan diesel, sementara 90,6 %  $\text{NH}_4^+$  dari sumber alami dan kegiatan pertanian, demikian pula dengan perhitungan PMF di Serpong yaitu 60,0%  $\text{SO}_4^{2-}$  dan 61,8%  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  berasal dari proses pembakaran, serta 60,5%  $\text{NH}_4^+$  berasal dari sektor pertanian (Mukhtar *et al.*, 2019). Karakteristik kimia di Kototabang dan Maros berbeda dengan lokasi lainnya. Ion dominan di Kototabang adalah  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Cl}^-$ , sementara di Maros adalah  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$ . Karakteristik wilayah pesisir pantai di Maros ini serupa dengan studi yang dilakukan di kota pesisir Wanli, Taiwan yang

juga didominasi oleh  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  (Chen, Hsu, Huang, & Zheng, 2020).

Pada Gambar 7. memperlihatkan komposisi ion-ion dalam air hujan di lokasi-lokasi pemantauan. Komposisi kimia air hujan di Kototabang memiliki konsentrasi paling rendah di antara kota lainnya. Hal ini sesuai dengan nilai DHL Kototabang yang juga paling rendah dibanding lokasi lainnya.

Secara ideal, komposisi anion dan kation seharusnya seimbang satu sama lainnya karena berhubungan dengan rumus kesetimbangan kimia (EANET, 2015a). Adapun adanya perbedaan konsentrasi total anion dan total kation biasanya disebabkan oleh adanya kontaminasi contoh serta beberapa parameter anion anorganik yang tidak dianalisis seperti  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , dan  $\text{PO}_4^{3-}$  ataupun parameter anion organik seperti  $\text{HCOO}^-$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ , dan  $(\text{COO}^-)_2$  (EANET, 2015a). Winkler (1986) menyatakan bahwa senyawa-senyawa karbonat ( $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ – $\text{H}_2\text{CO}_3$ – $\text{HCO}_3^-$ – $\text{CO}_3^{2-}$ ) harus diperhitungkan dalam keseimbangan ion, ketika pH mendekati netral atau lebih tinggi dari 6,0 (Pye *et al.*, 2020). Analisis parameter kimia untuk seluruh ion-ion dalam deposisi basah ini dilakukan dengan instrumen ion kromatografi (IC) dengan mempertimbangkan jenis kolom yang dimiliki. IC memiliki kelebihan sensitivitas,



**Gambar 6.** Komposisi kimia dalam air hujan pada tahun 2015-2019

selektivitas, dengan waktu analisis yang relatif singkat (Dasgupta & Maleki, 2019; Michalski, 2016; Nesterenko & Paull, 2017).

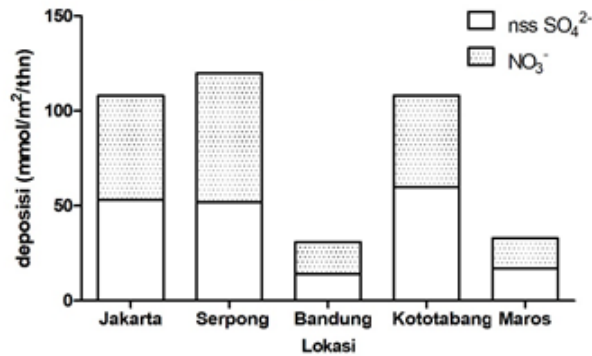
Potensi penyebab keasaman air hujan dapat dilihat melalui ion NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> yang diidentifikasi melalui perhitungan fraksi nitrat untuk total NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dan nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dengan persamaan  $[\text{NO}_3^-]/([\text{NO}_3^-]+[\text{nss SO}_4^{2-}])$ , sementara dalam proses netralisasi dihitung melalui fraksi amonium dengan persamaan  $[\text{NH}_4^+]/([\text{NH}_4^+]+[\text{nss Ca}^{2+}])$  (Balasubramanian, Victor, & Chun, 2001; Chate & Devara, 2009; EANET, 2016; Szép *et al.*, 2018; Thepanondh, 2004).

Seperti terlihat pada Tabel 4. fraksi ekuivalen nitrat pada tahun 2015–2019 di Jakarta, Serpong, dan Bandung memiliki nilai >0,5. Nilai tersebut menunjukkan bahwa HNO<sub>3</sub> lebih berpengaruh dalam terjadinya deposisi asam, tetapi di Kototabang dan Maros lebih disebabkan oleh H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Hal ini juga didukung dengan rata-rata deposisi perbandingan nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mmol/m<sup>2</sup>/tahun) pada tahun 2015–2019 (Gambar 7.) menunjukkan bahwa konsentrasi NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lebih tinggi dibanding dengan nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. dan mengindikasikan kesesuaian potensi keasaman air hujan dari ion-ion tersebut



**Tabel 4.** Fraksi ekuivalen nitrat dan amonium

Lokasi	Fraksi ekuivalen nitrat	Fraksi ekuivalen amonium
Serpong	0,567	0,788
Jakarta	0,509	0,675
Bandung	0,548	0,790
Kototabang	0,444	0,362
Maros	0,485	0,558

**Gambar 7.** Rata-rata perbandingan deposisi nss SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pada tahun 2015-2019

dengan nilai pH yang diperoleh selama pemantauan.

Di sisi lain, fraksi ekuivalen amonium (nilai < 0,5) di Kototabang menunjukkan bahwa peran CaCO<sub>3</sub> lebih dominan dalam menetralkan senyawa asam, sementara di kota-kota lainnya lebih didominasi oleh NH<sub>3</sub>. Hal ini masih memiliki pola serupa dengan perhitungan fraksi ekuivalen nitrat dan amonium di tahun sebelumnya.

Hasil perhitungan komposisi kimia dalam deposisi basah ini menunjukkan hasil yang serupa dalam deposisi kering di lokasi Jakarta, Bandung, dan Serpong, yang menyatakan bahwa NH<sub>3</sub> merupakan bagian terbesar dari komponen fase gas (Aikawa, Hiraki, Mukai, & Murano, 2008). Kawasan Asia Timur yang memiliki data emisi NH<sub>3</sub> dan NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dalam air hujan yang cukup tinggi (Chao, Zi-Fa, & Gbaguidi, 2010; EANET, 2015a) tidak bertentangan dengan hasil pemantauan dalam penelitian ini. Pemantauan sebelumnya di tahun 2008-2015 pun memberikan pola karakteristik yang serupa (Lestari *et al.*, 2018). Rasio

NH<sub>4</sub><sup>+</sup> di daratan kontinental umumnya lebih tinggi dibanding daerah pesisir dan pulau, sehingga NH<sub>4</sub><sup>+</sup> merupakan senyawa penting dalam presipitasi kimia di wilayah benua Asia Timur (Chao *et al.*, 2010). NH<sub>3</sub> atmosferik memegang peranan penting dalam proses terjadinya hujan asam, deposisi nitrogen, dan polusi akibat partikel halus (Liu *et al.*, 2019). NH<sub>3</sub> juga sebagian besar berpartisipasi menjadi butiran awan untuk nilai pH < 6, tetapi fraksi yang cukup besar dapat tetap berada dalam fase gas untuk nilai pH > 6 (Pye *et al.*, 2020). Berdasarkan kajian *The Model Inter-Comparison Study for Asia (MICS-Asia) phase III*, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> aerosol dan NH<sub>3</sub> merupakan ekuivalen dari SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sifat deposisi aerosol NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dan NH<sub>3</sub> menunjukkan perpaduan kriteria deposisi sulfur (S) dan deposisi nitrogen (N) (Itahashi *et al.*, 2020).

Adanya perbedaan pola komposisi kimia di setiap lokasi disebabkan oleh sumber pencemar yang berbeda. Kegiatan antropogenik yang terdapat pada setiap klasifikasi lokasi akan memberikan potensi

sumber emisi yang berbeda di sekitar lokasi sampling (Monteith *et al.*, 2016). Sebuah studi di China menunjukkan bahwa area terdampak deposisi asam yang parah di wilayah selatan telah berkurang melalui pengendalian polutan emisi, tetapi area terdampak deposisi asam dalam kategori sedang telah meluas di wilayah utara, terkait dengan tingginya perkembangan industri dan transportasi (Yu *et al.*, 2017).

Di negara dengan empat musim, variasi komposisi kimia dapat berbeda-beda seiring adanya perbedaan pola musim, kondisi meteorologi, kondisi permukaan, dan jenis spesies kimia (EANET, 2015b) serta adanya kontribusi campuran sumber lokal dan regional (Ceron *et al.*, 2013). Konsentrasi senyawa nitrat umumnya tinggi di musim dingin dan relatif rendah di musim panas, sementara untuk parameter amonium maupun sulfat tidak ada perbedaan (Aikawa *et al.*, 2008). Kontribusi pencemar lintas batas yang lebih tinggi dari Asia terjadi pada musim semi di Jepang dan musim dingin di Korea Selatan, dan kondisi ini diprediksi akan mengalami penurunan seiring perubahan cuaca dan iklim (Yim *et al.*, 2019). Beberapa kajian di wilayah Asia Timur menekankan pentingnya data  $PM_{2,5}$  dalam kaitannya dengan pencemar lintas batas yang berkontribusi pada deposisi asam, namun di Indonesia, data tersebut hanya tersedia di kota Jakarta pada tahun 2017-2019.

Pada skala internasional, kajian mengenai deposisi asam yang berlangsung di negara-negara Eropa dan Amerika Utara sejak tahun 1970 menunjukkan bahwa melalui pengendalian pencemaran udara, di wilayah-wilayah tersebut, termasuk Jepang dan Australia, telah mengalami peningkatan kualitas udara (Grennfelt *et al.*, 2020). Hal tersebut ditandai dengan terjadinya penurunan emisi  $SO_2$ ,  $NO_x$ , senyawa organik volatil (VOCs), dan senyawa polutan lainnya (Maas *et al.*, 2016), meskipun di beberapa

negara, masalah pencemaran udara masih menjadi isu lingkungan prioritas (Grennfelt *et al.*, 2020).

#### 4. Simpulan

Berdasarkan analisis data dapat disimpulkan bahwa ion  $NH_4^+$  dan  $SO_4^{2-}$  merupakan senyawa pencemar dominan yang terdapat dalam deposisi basah. Dalam pemantauan selama tahun 2015-2019 menunjukkan tidak adanya perbedaan nyata secara statistik untuk parameter  $NH_4^+$  dan  $SO_4^{2-}$  di tiap lokasi. Meskipun pH di seluruh lokasi  $<5,6$ , namun hasil evaluasi selama 5 tahun ini menunjukkan adanya kenaikan nilai pH air hujan di seluruh lokasi pemantauan dibandingkan dengan tahun-tahun sebelumnya. Melalui perhitungan fraksi ekuivalen nitrat, diketahui bahwa  $NO_3^-$  lebih berpengaruh dalam terjadinya deposisi asam di Jakarta, Serpong, dan Bandung, namun di Kototabang dan Maros lebih disebabkan oleh  $H_2SO_4$ . Fraksi ekuivalen amonium di Kototabang menunjukkan peran  $CaCO_3$  yang lebih dominan dalam proses netralisasi senyawa asam, sementara di kota-kota lainnya lebih didominasi oleh  $NH_3$ .

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam kegiatan ini, yaitu PSIKLH-KLHK, LAPAN-BRIN, dan BMKG yang menyediakan fasilitas, sumber daya, dan dana pemantauan, serta seluruh tim yang melakukan sampling dan analisis di masing-masing laboratorium.

#### 6. Kepengarangan

Seluruh penulis merupakan suatu kesatuan tim tak terpisahkan yang memberikan kontribusi dalam tiap bagiannya. Penulis pertama melakukan penyusunan tulisan dan verifikasi data, sementara penulis lainnya melakukan pengujian, pengolahan, dan membantu interpretasi data di masing-masing institusi.

## Daftar Pustaka

- 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, Soil Pollut.*, *190*(1), 287-297. doi:10.1007/s11270-007-9600-0
- Aldrian, E., & Susanto, D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *Int J of Climatol.*, *23*(12), 1435-1452.
- Anil, I., Alagha, O., & Karaca, F. (2017). Effects of transport patterns on chemical composition of sequential rain samples: trajectory clustering and principal component analysis approach. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *10*(10), 1193-1206.
- 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)
- Balasubramanian, R., Victor, T., & Chun, N. (2001). Chemical and statistical analysis of precipitation in Singapore. *Water, Air, and Soil Pollution*, *130*(1), 451-456.
- BMKG. (2017). Normal hujan bulanan. Retrieved from <https://bmkg.sampali.net/normal-hujan-bulanan/>
- Burns, D. A., Aherne, J., Gay, D. A., & Lehmann, C. M. (2016). Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. *Atmospheric Environment*, *146*, 1-4.
- 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. *J. Environ. Prot.*, *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.
- Chate, D., & Devara, P. (2009). Acidity of raindrop by uptake of gases and aerosol pollutants. *Atmospheric Environment*, *43*(8), 1571-1577.
- Chen, H.-Y., Hsu, L.-F., Huang, S.-Z., & Zheng, L. (2020). Assessment of the Components and Sources of Acid Deposition in Northeast Asia: A Case Study of the Coastal and Metropolitan Cities in Northern Taiwan. *Atmosphere*, *11*(9), 983.
- Chon, K., Kim, Y., Bae, D., & Cho, J. (2015). Confirming anthropogenic influences on the major organic and inorganic constituents of rainwater in an urban area. *Drinking Water Engineering and Science*, *8*(2), 35-48.
- Cui, L., Liang, J., Fu, H., & Zhang, L. (2020). The contributions of socioeconomic and natural factors to the acid deposition over China. *Chemosphere*, *253*, 126491.
- Dasgupta, P. K., & Maleki, F. (2019). Ion exchange membranes in ion chromatography and related applications. *Talanta*, *204*, 89-137.
- 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 wet deposition*. 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:
- EANET. (2016). Third periodic report on the state of acid deposition in East Asia *Part II- National assesment*. Niigata: EANET.
- Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., & Cowling, E. (2020). Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, *49*(4), 849-864.
- Itahashi, S., Ge, B., Sato, K., Fu, J. S., Wang, X., Yamaji, K., . . . Liao, H. (2020). MICS-Asia III: overview of model intercomparison and evaluation of acid deposition over Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(5), 2667-2693.
- Lara, L., Artaxo, P., Martinelli, L., Victoria, R., Camargo, P., Krusche, A., . . . Ballester,

- M. (2001). Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Atmospheric Environment*, 35(29), 4937-4945.
- Lestari, R. P., Nasution, R. I., Budiwati, T., Rachmawati, E., & Indrawati, A. (2018). Status deposisi basah di beberapa wilayah pemantauan di Indonesia periode 2008-2015. *Ecolab*, 12(2), 71-82.
- Likens, G. E. (2020). Atmospheric acid deposition. *Atmosphere and Climate*, 45.
- Liu, M., Huang, X., Song, Y., Tang, J., Cao, J., Zhang, X., . . . Zhu, T. (2019). Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(16), 7760. doi:10.1073/pnas.1814880116.
- Maas, R., Grennfelt, P., Amann, M., Harnett, B., Kerr, J., Berton, E., . . . Reis, S. (2016). Towards Cleaner Air. *Scientific Assessment Report 2016*.
- Martins, E. H., Nogarotto, D. C., Mortatti, J., & Pozza, S. A. (2019). Chemical composition of rainwater in an urban area of the southeast of Brazil. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 520-530.
- 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.
- Mukhtar, R., Lestari, R., Hindratmo, B., Nelson, R., Nugraha, M., & Suharguniyawan. (2019). *Characterizing acid deposition's pollutant sources in Serpong and Jakarta using positive matrix factorization model*. Paper presented at the INAFOR, Bogor.
- Nesterenko, P. N., & Paull, B. (2017). Ion chromatography *Liquid Chromatography* (pp. 205-244): Elsevier.
- Prasetyo, B., Irwand, H., & Pusparini, N. (2018). Karakteristik curah hujan berdasarkan ragam topografi di Sumatera Utara. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 19(1), 11-20.
- Pye, H. O., Nenes, A., Alexander, B., Ault, A. P., Barth, M. C., Clegg, S. L., . . . Herrmann, H. (2020). The acidity of atmospheric particles and clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(8), 4809-4888.
- Sase, H. (2017). Acid deposition *air pollution impacts on plants in East Asia* (pp. 43-53): Springer.
- Szép, R., Mateescu, E., Niță, I.-A., Birsan, M.-V., Bodor, Z., & Keresztesi, Á. (2018). Effects of the Eastern Carpathians on atmospheric circulations and precipitation chemistry from 2006 to 2016 at four monitoring stations (Eastern Carpathians, Romania). *Atmospheric Research*, 214, 311-328.
- Thepanondh, S. (2004). *A study of wet and dry deposition processes for regional air pollution and atmospheric deposition modeling*. (Ph.D), Monash University, Melbourne.
- Turyanti, A., & Chaerunnisa, C. (2017). The estimation of rainwater acidity level based on the ambient air pollutants concentration (Case Study: DKI Jakarta). *Agromet*, 31(2), 71-79.
- Xiao, J. (2016). Chemical composition and source identification of rainwater constituents at an urban site in Xi'an. *Environmental earth sciences*, 75(3), 209.
- Yim, S. H. L., Gu, Y., Shapiro, M. A., & Stephens, B. (2019). Air quality and acid deposition impacts of local emissions and transboundary air pollution in Japan and South Korea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(20), 13309-13323.
- 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. *Environ. Pollut.*, 231, 182-190.