

Karakteristik Logam-logam dalam Partikel Tak Terlarut Debu Jatuh di Serpong

Characteristic of Metals in Insoluble Particle of Dustfall in Serpong

Retno Puji Lestari, Bambang Hindratmo, dan Ricky Nelson

Pusat Standardisasi Instrumen dan Kualitas Lingkungan Hidup,
Kawasan PUSPIPTEK Gedung 210, Serpong – Tangerang Selatan 15310, T/F 021-7560981
E-mail: emc_acdep@yahoo.com

Diterima 1 Maret 2022, direvisi 16 Maret 2022, disetujui 7 April 2022

ABSTRAK

Karakteristik Logam-logam dalam Partikel Tak Terlarut Debu Jatuh di Serpong. Partikulat merupakan bentuk polutan yang paling terlihat dalam pencemaran udara. Selain TSP, PM₁₀, dan PM_{2,5}, ada pula debu jatuh yang terdiri dari partikel-partikel yang dapat melewati saringan 1 mm, namun cukup berat untuk dapat jatuh dari udara ambien ke permukaan tanah. Kajian pemantauan debu jatuh di Pusat Standardisasi Instrumen dan Kualitas Lingkungan Hidup (PSIKLH) Serpong dilakukan dalam periode 2018-2020 untuk mengetahui konsentrasi debu jatuh dan logam-logam yang terkandung di dalam partikel tak terlarut. Pengujian debu jatuh mengacu pada ASTM D 1739-1998 (2004): *Standard Methods for Collection and Measurement of Dustfall*. Alat sampling debu jatuh merupakan sebuah kontainer gelas dengan ukuran tertentu yang ditempatkan di tempat terbuka dan dibiarkan selama 30 hari sebelum dianalisis di laboratorium. Air hasil tampungan selama sampling tersebut dikumpulkan dalam wadah sampel. Partikulat tak terlarut dan terlarut dalam debu jatuh ditentukan secara terpisah menggunakan metode gravimetri, sementara logam-logam dianalisis menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom Hitachi ZA-3300 dengan metode modifikasi SNI 7119-4-2017. Konsentrasi rata-rata tahunan debu jatuh di Serpong pada Juni - Desember 2018, Maret - Desember 2019, dan Maret-Desember 2020 masing-masing adalah 4,5±2,9; 5,5±2,3; dan 5,9±4,1 t/km²/bulan. Nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu debu jatuh berdasarkan PP No 41/1999 yaitu 10 t/km²/bulan. Berdasarkan PP No 22/2021 Lampiran VII tentang Baku Mutu Udara Ambien, parameter ini tidak lagi dimasukkan. Lima logam yang dominan ditemukan dalam partikel tak terlarut debu jatuh adalah Fe>K>Zn>Mg>Ca dengan konsentrasi rata-rata 10,3>2,4>1,9>1,5>0,3 mg/kg. Potensi sumber pencemaran diduga berasal dari sumber alami seperti mineral kerak bumi dan kegiatan antropogenik seperti material konstruksi bangunan, sektor industri, dan transportasi.

Kata kunci: Debu jatuh, partikel, logam, pencemaran udara.

ABSTRACT

Characteristic of Metals in Insoluble Particle of Dustfall in Serpong. Particulates are the most visible form of pollutants in air pollution. Apart of TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}, there is dustfall which is consist of any material with particles that can pass through a 1 mm filter; but they are heavy enough to fall from ambient air to the ground. The dustfall monitoring study at The Center for Standardization of Environmental Quality Instrument (CSEQI) Serpong was carried out in 2018-2020 to assess the level of dustfall and metals contained in insoluble dustfall. Dustfall testing referred to ASTM D1739-1998 (2004): *Standard Methods for Collection and Measurement of Dustfall*. A glass container with specific size as dustfall sampling device was placed in the open space and left for 30 days before being analyzed in laboratory. The water collected during sampling period were gathered in a sample container. Insoluble

and dissolved particulates in dustfall were separately determined using gravimetric method, while metals were analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometry Hitachi ZA-3300 using modified method of SNI 7119-4-2017. The annual mean of dustfall concentration in Serpong in June-December 2018, March-December 2019, and March-December 2020 were 4.5 ± 2.9 , 5.5 ± 2.3 , and 6.7 ± 4.1 t/km²/month, respectively. Those values were still below the regulation standard of Government Regulation PP No 41/1999 which is 10 t/km²/month. Based on Government Regulation No 22/2021 Appendix VII about Standard of Ambient Air, this parameter is no longer included. Five dominant metals found in insoluble particles of dustfall were Fe>K>Zn>Mg>Ca with average concentration of $10.3 > 2.4 > 1.9 > 1.5 > 0.3$ mg/kg. The expected potential pollution sources were originated from natural source such as earth crust minerals and anthropogenic activities such as building construction material, industrial, and transportation sectors.

Keywords: dustfall, particle, metal, air pollution

1. Pendahuluan

Polutan gas dan partikulat merupakan kontributor signifikan terhadap terjadinya pencemaran udara. Ukuran partikulat umumnya lebih besar dibandingkan dengan gas. Partikel di atmosfer berasal dari pembakaran, debu yang terbawa angin, maupun berasal dari proses konversi dari gas ke partikulat. Partikel dengan kisaran ukuran 0,5 mm terbentuk dari material yang bervariasi, seperti padatan maupun droplet liquid (Qiao et al., 2013). Partikulat merupakan bentuk yang paling terlihat (visible) dari polutan pencemaran udara, dimana kegiatan industri, domestik dan alamiah berkontribusi dalam pembentukan senyawa partikulat (Santra, 2014). Partikulat ini bisa berupa senyawa organik maupun anorganik dalam bentuk fisik cair maupun padatan. Partikel karbon atau jelaga, *droplet* bersifat asam, oksida dan garam logam, silikat dan debu lainnya termasuk asap logam (*metallurgic fume*) merupakan bentuk-bentuk partikulat yang umum (Almuhanna, 2015).

Dustfall (*settleable particulate matter*) atau debu jatuh merupakan setiap material yang terdiri dari partikel-partikel yang dapat melewati saringan 1 mm namun cukup berat untuk dapat jatuh dari udara

ambien ke dalam *dustfall container* (KLHK, 2014). Debu jatuh atmosferik mengacu pada partikulat yang jatuh ke tanah berdasarkan gaya gravitasi secara alami (Wang et al., 2018). Penentuan debu jatuh mengacu pada metode sampling partikulat setelah partikel di udara turun mengendap ke dalam wadah melalui proses sedimentasi. Metode ini mengindikasikan adanya jumlah partikel yang lebih besar yang memiliki kecepatan pengendapan tinggi dan waktu tinggal di atmosfer relatif singkat (Ram et al., 2014).

Debu jatuh merupakan salah satu polutan kompleks dan cukup berbahaya di atmosfer, karena sifatnya sebagai pembawa (*carrier*) atau *reaction bed* untuk polutan lainnya, dan berpotensi menyebabkan bahaya partikulat yang lebih besar (Bermudez, Jasan, Plá, & Pignata, 2012; Qiao et al., 2013). Debu jatuh akan menyebabkan terjadinya peningkatan paparan logam berat, semi logam dan mineral. Debu jatuh atmosferik merupakan salah satu faktor eksogenus penting terhadap masuknya logam berat ke ekosistem terutama tanah (Fernández-Olmo, Puente, & Irabien, 2015; Shi et al., 2012; Theodosi et al., 2013). Sumber debu jatuh atmosferik dapat dibagi menjadi sumber alamiah, antropogenik, dan sumber campuran. Beberapa logam dan logam berat

yang terkandung dalam partikulat dapat diidentifikasi menggunakan beberapa metode analisis antara lain *Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)*, *X-Ray Fluorescence (XRF)*, dan lain-lain. Identifikasi perbedaan sumber polusi dan kontribusinya diklasifikasikan menjadi *source model* dan *receptor model* (Manoli *et al.*, 2004).

Menurut *Environmental Protection Agency (EPA)* (2003), partikel yang lebih besar dari 30-50 mikron (μ) mengendap dengan cepat, mengendap pada permukaan yang bersih, mobil dan jendela. Konsentrasi debu yang mengganggu di tempat kerja yang berlebihan menyebabkan penurunan jarak pandang; mereka mengendap di mata, telinga dan hidung; mereka merusak kulit dan selaput lendir melalui aktivitas mekanis dan kimiawi (Biglari *et al.*, 2017). Presipitasi debu umumnya berhubungan dengan sumber debu, metode pengumpulan, dan posisi sampling (Bao *et al.*, 2012). Komponen partikulat tak larut dalam air pada debu jatuh biasanya lebih tinggi di kawasan industri dibandingkan kawasan *rural*, sebaliknya partikulat organik yang larut dalam air umumnya terdapat lebih tinggi di kawasan *rural* (Kamble, 2015). Jumlah partikulat umumnya meningkat saat musim kemarau. Pada kondisi kelembapan rendah, air

menguap, bereaksi dengan asam membentuk garam dan aerosol padat (Manahan, 2001).

Kajian pemantauan debu jatuh di PSIKLH Serpong dilakukan dalam periode tahun 2018-2020 baik pada musim hujan maupun musim kemarau. Tujuan kegiatan ini adalah untuk mengetahui konsentrasi debu jatuh dan logam-logam yang terkandung di dalam partikel tak terlarut akibat terjadinya pencemaran udara

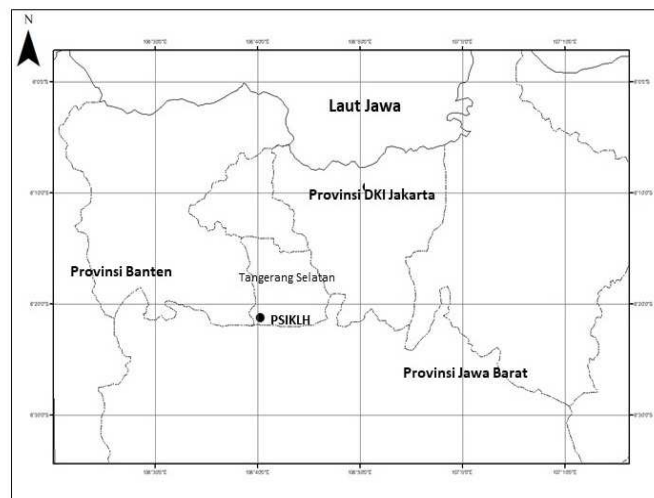
2. Metodologi

2.1 Lokasi Sampling

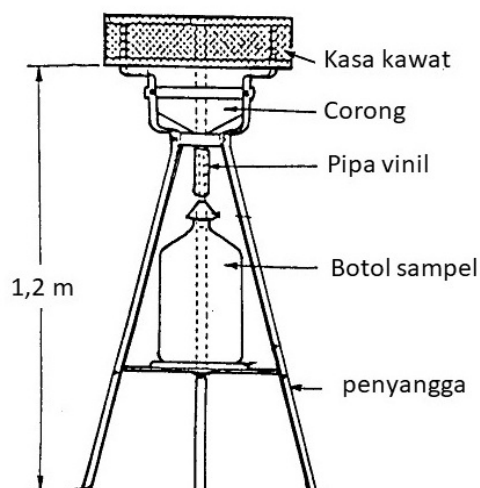
Sampling dilakukan di stasiun pemantauan kualitas udara ambien PSIKLH Serpong dengan titik GPS berada pada 06°21'02.2"S 106°40'04.22"E.

2.2 Peralatan dan bahan

Alat sampling debu jatuh terdiri dari rangkaian peralatan yang disajikan pada Gambar 2., memiliki luas kontainer sampel sebesar 81,7 cm². Peralatan yang digunakan untuk analisis terdiri dari neraca analitik, *hot plate*, piringan porselen, penyaring, pompa, oven, desikator, Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) Hitachi ZA-3300. Bahan yang digunakan adalah kertas saring, HNO₃, H₂O₂, larutan standar logam, dan asetilen.



Gambar 1. Lokasi Sampling PSIKLH Serpong



Sumber: ASTM, 2004

Gambar 2. Skema Alat Sampling Debu Jatuh

2.3 Sampling

Sampling dilakukan di PSIKLH Serpong pada periode 2018-2020 dengan waktu sampling selama 30 hari. Jumlah total sampel sebanyak 23 sampel, dengan rincian 6 (enam) sampel pada tahun 2018 (Februari, April, Juli, Agustus, September, dan Oktober dengan kode sampel D1-D6), sebanyak 9 (sembilan) sampel pada tahun 2019 (Februari, Maret, April, Juli, Juli, Agustus, Oktober, November dan Desember dengan kode sampel D7-D15), dan 8 (delapan) sampel pada tahun 2020 (Januari, Februari, Maret, Juli, Agustus, September, Oktober, dan November dengan kode sampel D16-D23). Menurut persyaratan penentuan titik sampling yang tercantum pada Kepdal No 205 Tahun 1996, penempatan alat harus berada di area terbuka, bebas dari bangunan berstruktur tinggi dalam radius 20 m dari tiang penyangga, jauh dari sumber polutan lokal dan berbagai obyek yang dapat mempengaruhi jatuhnya partikulat seperti pohon atau *exhaust*. Pengujian debu jatuh mengacu pada *American Standard Testing and Material (ASTM) D 1739-1998 (2004): Standard Methods for Collection and Measurement of Dustfall (ASTM,*

2004). Alat sampling ditempatkan 1,5 m dari atas tanah. Dilakukan perekaman data tanggal dan waktu sampling, serta luas kontainer. Setelah 30 hari, sampel dibawa ke laboratorium untuk dianalisis.

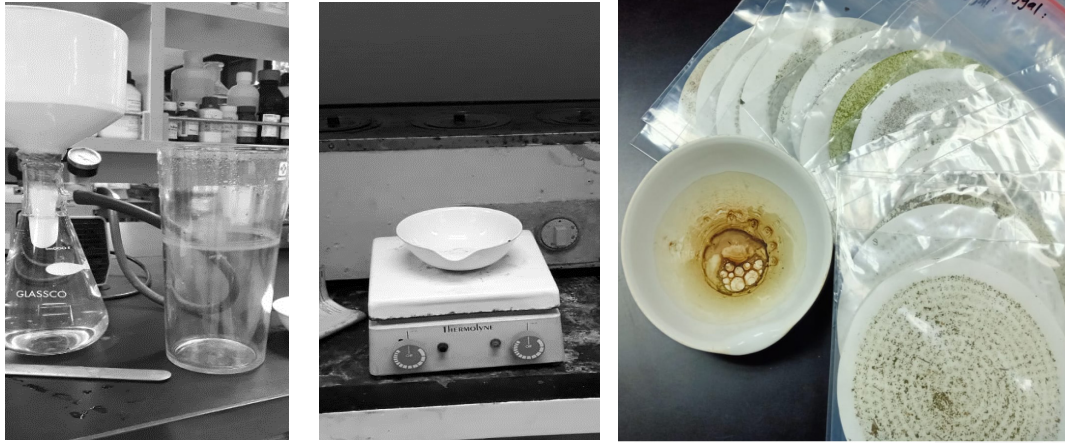
2.4 Analisis

2.4.1 Partikel tak terlarut dan partikel terlarut

Partikulat dan filtrat dipisahkan melalui penyaringan dibantu pompa penghisap menggunakan corong berisi kertas filter yang telah diketahui bobotnya. Partikel tak terlarut terkumpul pada filter. Filter berisi partikel tak terlarut dipanaskan di oven pada 105°C selama 90 menit dan disimpan dalam desikator sebelum ditimbang hingga bobot tetap. Penentuan partikel terlarut dilakukan dengan memanaskan 500 ml filtrat di atas hot plate sampai mencapai mendekati kering, kemudian dipanaskan di oven pada 105°C dan disimpan dalam desikator selama 2 jam sebelum ditimbang hingga bobot tetap.

2.4.2 Pengukuran logam dalam partikulat

Filter yang mengandung partikel tak terlarut didekstruksi dengan menggunakan asam kuat, kemudian dipanaskan sampai mendekati kering dan dilarutkan dengan



Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2020

Gambar 3. Proses Analisis Debu Jatuh

HNO_3 5% dalam labu ukur 50 ml. Logam-logam Pb, Cu, Cd, Fe, Zn, Ni, Cr, Ag, Na, K, Ca, dan Mg dianalisis menggunakan SSA Hitachi ZA-3300. Jaminan mutu pengujian (QA/QC) diterapkan dengan pengukuran blanko filter, replikasi pengukuran, dan kontinuitas kurva kalibrasi (%RCCS) sebesar 100 ± 5 . Konsentrasi logam berat diperoleh melalui perhitungan persamaan garis linier $y = ax + b$, dimana y : absorbansi yang terbaca di alat, x adalah konsentrasi yang terukur di alat, a : kelandaian (*slope*) kurva garis lurus, dan b : perpotongan (*intercept*) kurva dengan sumbu tegak. Konsentrasi akhir logam-logam dalam satuan $\mu\text{g}/\text{kg}$ atau dikonversi ke mg/kg .

2.5 Perhitungan

Deposition rate yang merupakan bobot total partikel yang diperoleh melalui pengujian partikel tak terlarut dan partikel terlarut dibagi luas area kontainer dalam satuan $\text{g}/(\text{m}^2/30 \text{ hari})$ dan dikonversikan ke dalam satuan baku mutu ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{bulan}$).

$$D = \frac{W}{A} \times \frac{30}{d} \times 10000 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- D = *deposition rate* ($\text{t}/\text{km}^2/\text{bulan}$)
- A = luas area bagian atas container (m^2)
- W = berat total partikel (selama 30 hari) (g)
- d = lama pemaparan (hari)

2.6 Pengolahan Data

Pengolahan data secara statistik dilakukan dengan menggunakan *software* Excel dan *GraphPad Prism 5*. Simulasi model dilakukan dengan menjalankan model *The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) secara interaktif di web <https://www.arl.noaa.gov/>. HYSPLIT merupakan model untuk melihat potensi asal sumber polutan secara *forward* maupun *backward trajectory* (NOAA, 2021).

3. Hasil dan Pembahasan

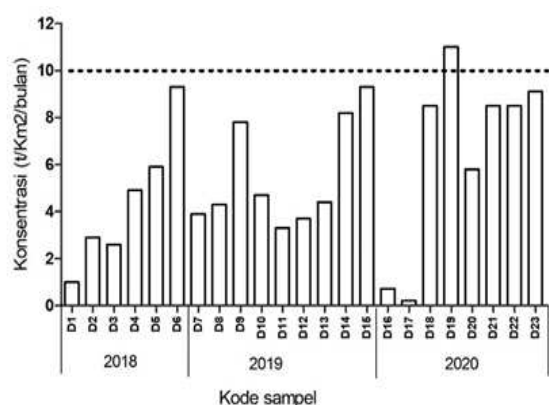
Dalam PP No 41 Tahun 1999 tentang Baku Mutu Udara Ambien Nasional, parameter debu jatuh menggunakan metode *canister* dengan waktu pengukuran 30 hari masih menjadi bagian dari baku mutu yang dipersyaratkan. Baku mutu debu jatuh masing-masing adalah $10 \text{ t}/\text{km}^2/\text{bulan}$ untuk kawasan pemukiman dan $20 \text{ t}/\text{km}^2/\text{bulan}$ untuk kawasan industri. Dalam PP No 22/2021 Lampiran VII tentang Baku Mutu Udara Ambien, parameter debu jatuh ini tidak lagi dimasukkan. Dari hasil pemantauan ini, konsentrasi total debu jatuh bervariasi dari 0,2 sampai $11 \text{ t}/\text{km}^2/\text{bulan}$ (Gambar 4.). Adanya pembangunan gedung atau pekerjaan konstruksi lainnya yang berdekatan dengan lokasi sampling sepanjang tahun 2018-

2020 berpotensi menimbulkan peningkatan konsentrasi debu jatuh. Beberapa nilai yang diketahui mendekati 10 t/km²/bulan yaitu pada bulan Oktober 2018, Desember 2019, dan November 2020, masing-masing sebesar 9,3; 9,3; dan 9,1 t/km²/bulan, sementara di bulan Juli 2020 sebesar 11 t/km²/bulan. Konsentrasi rata-rata tahunan debu jatuh pada periode pemantauan tersebut adalah:

Tabel 1. Konsentrasi Rata-Rata Debu Jatuh di Udara Ambien (t/km²/bulan)

	Partikel tak terlarut	Partikel terlarut	Total
2018	3,1±1,9	1,4±1,3	4,5±2,9
2019	4,0±2,0	1,5±0,7	5,5±2,3
2020	4,8±2,9	1,9±1,2	6,7±4,1

Sumber: Data Primer, 2020



Sumber: Data Primer, 2020

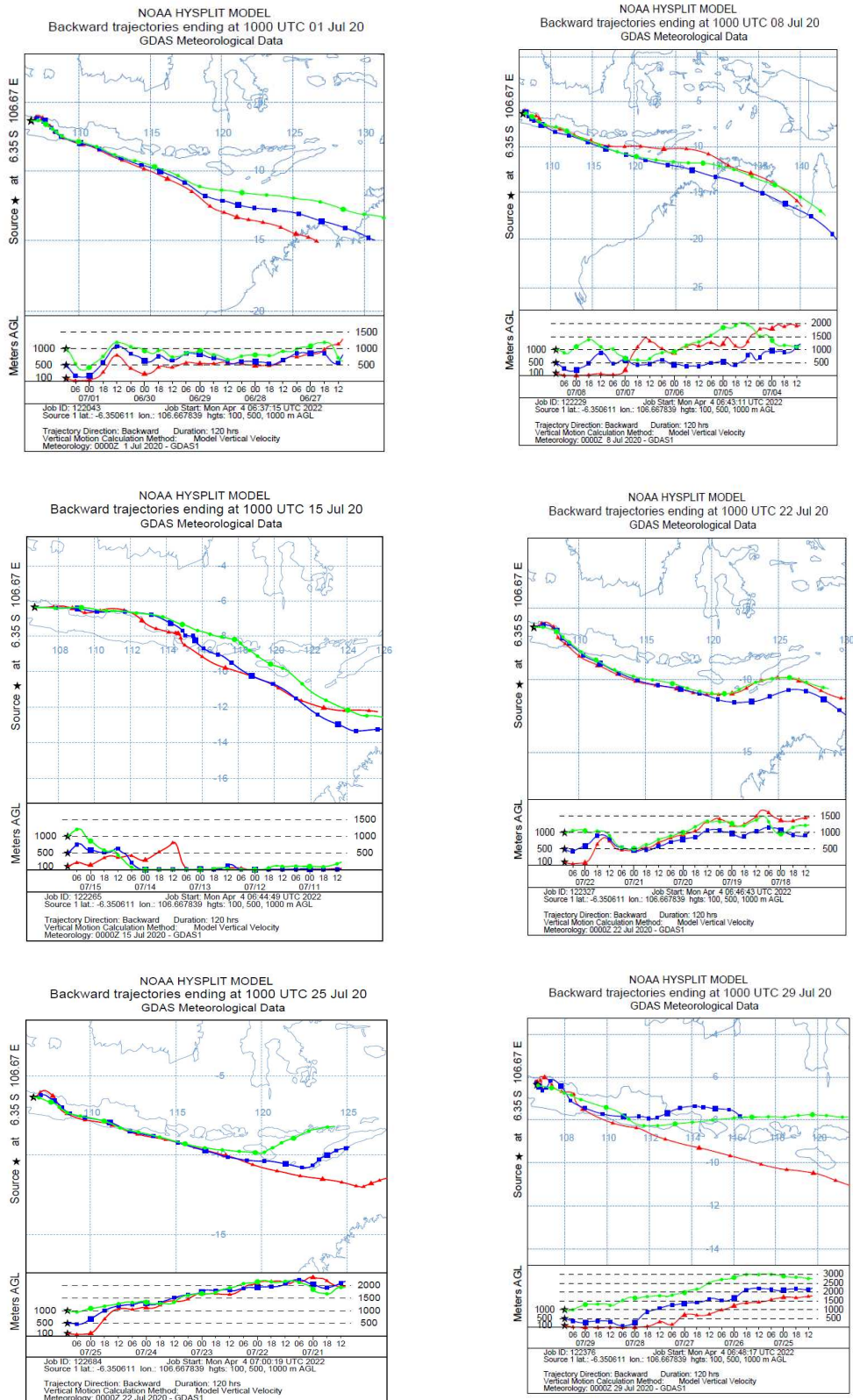
Gambar 4. Konsentrasi Debu Jatuh di Serpong

Kondisi meteorologis di lokasi pemantauan Serpong ini memiliki kecepatan angin rata-rata <1 m/s (*calm*) dan arah angin dominan dari timur (E). Terdapat kemungkinan bahwa pencemaran partikulat dapat berasal dari sumber lokal, meskipun tidak menutup kemungkinan juga berasal dari polutan lintas batas sehingga dilakukan pengecekan melalui *backward trajectory*. *Running* model HYSPLIT dilakukan menggunakan *backward trajectory* untuk melihat posisi sumber polutan sebelumnya. HYSPLIT membantu pemodelan *transboundary pollution* dan

long range transport air pollution (Báez A., 2007; Nurlatifah & Driejana, 2019). Data meteorologi yang digunakan adalah *Global Data Assimilation System* (GDAS) dengan resolusi 0,5° dan 1°. HYSPLIT diaplikasikan pada periode pengukuran dengan konsentrasi tertinggi di bulan Juli yang telah memasuki musim kemarau, yaitu pada tanggal 1, 8, 15, 22, 25, dan 29 Juli 2020. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sumber polutan dominan berasal dari arah tenggara. Kajian lebih lanjut terkait potensi dan identifikasi sumber pencemar masih harus dilakukan di masa mendatang.

Variasi musiman akibat faktor meteorologi berkontribusi terhadap laju jatuhnya debu. Debu jatuh akan jatuh dari atmosfer melalui rute deposisi basah dan deposisi kering, dan tergantung pada faktor meteorologi (Mohamed, Mohamed, Rabeiy, & Ghandour, 2013). Karena ukurannya yang kecil, debu berdampak buruk pada kesehatan manusia dan berpotensi menyebabkan kerugian ekonomi di wilayah terdampak (Kamble, 2015). Hasil studi yang dilakukan di kota Qom, Iran menunjukkan adanya korelasi signifikan secara statistik antara debu jatuh dengan suhu namun berkorelasi terbalik dengan kelembaban, sementara itu tidak terdapat korelasi dengan kecepatan angin maupun tekanan (Biglari et al., 2017). Fitur senyawa kimia yang berada pada debu jatuh atmosferik dapat merefleksikan proses migrasi, transportasi, dan difusi polutan. Analisis deposisi debu memberikan informasi mengenai total debu yang terdeposisi sesuai dengan kondisi yang terjadi pada saat-saat tertentu. Seperti halnya studi yang dilakukan di kota Riyadh, Saudi sehubungan dengan terjadinya badai debu menunjukkan konsentrasi debu jatuh yang lebih tinggi (12,8 g/m².d) dibandingkan dengan kondisi normal rata-rata bulanan (1,6 g/m².d) (Almuhanna, 2015).

Indikasi kemungkinan asal sumber pencemar partikel dapat dilihat dari konsentrasi logam berat dan logam alkali



Gambar 5. Hasil Aplikasi Model HYSPLIT di Serpong tanggal 1, 8, 15, 22, 25, dan 29 Juli 2020

yang berada dalam partikel tak terlarut debu jatuh ini. Parameter logam dalam debu maupun debu jatuh tidak diatur secara spesifik dalam baku mutu, kecuali untuk logam Pb dari TSP. Logam-logam tersebut terlihat pada Tabel 2.

Beberapa logam yang memiliki konsentrasi relatif tinggi dalam sampel partikel tak terlarut debu jatuh antara lain Fe, K, Zn, Mg, dan Ca, kesemuanya dalam satuan mg/ kg. Uji normalitas dilakukan untuk menilai sebaran data dalam suatu variabel telah terdistribusi secara normal (Usmadi, 2020). Hasil uji normalitas ($\alpha=0,05$) terhadap sampel dinyatakan memenuhi untuk logam Fe, Zn, dan Mg, sementara logam K dan Ca tidak memenuhi. Pada kajian ini, variasi konsentrasi dua logam dominan yaitu logam Fe adalah 3,4 - 15,9 mg/kg dan logam K adalah 1,4 – 5,6 mg/kg.

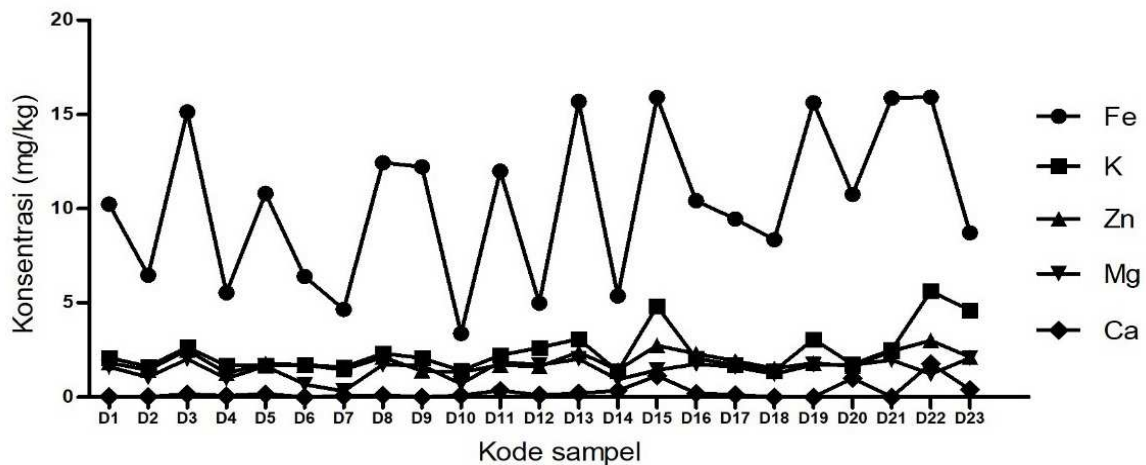
Logam Fe, Ca, K, dan Mg merupakan bagian dari elemen mineral kerak bumi (Eivazzadeh, Hassanvand, Faridi, & Gholampour, 2021; Sharma, Singh, & Kulshrestha, 2017), namun logam Mg dan Ca bisa juga berasal dari material konstruksi bangunan. Logam Cd dan Na dalam seluruh sampel berada di bawah limit deteksi ($<0,003$ $\mu\text{g}/\text{kg}$), sementara itu ada beberapa sampel

untuk parameter logam Ca, Ni, Cr yang berada di bawah limit deteksi, yaitu masing-masing sebesar $<0,003$ $\mu\text{g}/\text{kg}$. Logam Cr, Cu, dan Zn umumnya diemisikan dari industri metalurgi, sementara dari sektor transportasi akan mengemisikan Fe, Ba, Pb, Cu, dan Zn (Pacyna, 1986; Qiao et al., 2013; Sharma et al., 2017). Hal ini juga serupa dengan studi yang dilakukan di Kuala Lumpur, dengan lokasi yang berdekatan di area semi-urban/urban dengan transportasi padat memiliki konsentrasi Zn tinggi, dimana emisi Zn berasal aktivitas rem mobil dan penggunaan bahan bakar petroleum (Alahmr, Othman, Abd Wahid, Halim, & Latif, 2012). Hasil riset di Vancouver, Canada menunjukkan bahwa emisi kendaraan akibat usia suku cadang kendaraan, seperti Zn dari ban mobil, Cu dari kampas rem, Mn, Ni, dan Cd dari komponen kendaraan lainnya (Preciado & Li, 2006). Grup elemen transisi ke 1 dalam sistem periodik unsur (V, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, dan Zn) lazim ditemukan dalam *fly ash*, Fe juga berasal dari elemen tanah/mineral bumi (Hulett Jr, Weinberger, Northcutt, & Ferguson, 1980). Adanya logam-logam tersebut bisa jadi dihasilkan dari emisi terak (*slag*) dan emisi gas buang lingkungan perkotaan (Qiao et al., 2013). Hasil kajian di beberapa kota berkembang di China

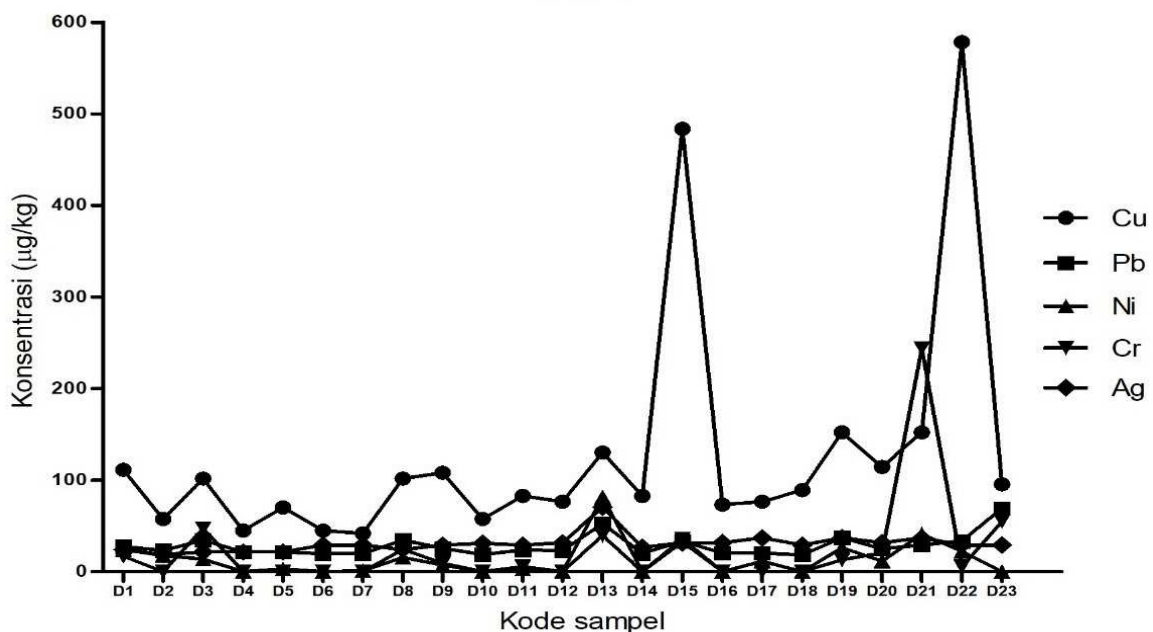
Tabel 2. Konsentrasi Logam-Logam dalam Partikel Tak Terlarut Debu Jatuh

Logam	Satuan	Mean	Max	Min
Pb	$\mu\text{g}/\text{kg}$	28,4	69,2	14,6
Cu	$\mu\text{g}/\text{kg}$	128	582	43,3
Ni	$\mu\text{g}/\text{kg}$	20,9	81,5	0,9
Cr	$\mu\text{g}/\text{kg}$	43,0	244	5,5
Ag	$\mu\text{g}/\text{kg}$	30,5	70,5	18,9
Cd	$\mu\text{g}/\text{kg}$	$<0,003$	$<0,003$	$<0,003$
Na	$\mu\text{g}/\text{kg}$	$<0,003$	$<0,003$	$<0,003$
Zn	mg/kg	1,9	2,9	1,0
Fe	mg/kg	10,3	15,9	3,4
Ca	mg/kg	0,3	1,7	$<0,003$
Mg	mg/kg	1,5	2,1	0,3
K	mg/kg	2,4	5,6	1,4

Sumber: Data Primer, 2020



(a) Konsentrasi logam dalam partikel tak terlarut debu jatuh (mg/kg)



(b) Konsentrasi logam dalam partikel tak terlarut debu jatuh (µg/kg)

Sumber: Data Primer, 2020

Gambar 6. Konsentrasi Logam dalam Partikel Tak Terlarut Debu Jatuh

menunjukkan bahwa logam Cu, Ni, Cr, Zn, Pb, dan Cd berasal dari debu konstruksi. Adanya Cu-Zn berkorelasi signifikan dengan debu yang berasal dari konstruksi bangunan dan bawah tanah, sementara Pb-Cd pada debu konstruksi pembangunan jalan (Yang *et al.*, 2020). Berdasarkan pemantauan PM_{2.5} dan logam-logam elemental secara kontinyu tahun 2010-2017 di Serpong menggunakan

Gent Sampler dan dianalisis dengan XRF menunjukkan bahwa konsentrasi maksimum logam Pb terdeteksi cukup tinggi sebesar 2.3 µg m⁻³ dan rata-rata sebesar 0,22 µg m⁻³ (Santoso *et al.*, 2020). Sumber Pb dalam PM_{2.5} di Serpong diidentifikasi terkait dengan adanya proses daur ulang baterai mengandung Pb (Santoso *et al.*, 2011).

Di sisi lain, sebuah kajian mengenai sistem atmosferik-tanah di Lanzhou City menunjukkan kandungan logam berat Pb, Cu, Zn, Cr, Cd, dan Ni dalam debu jatuh lebih tinggi dibanding lapisan tanah teratas (*top soil*) menjadi indikator sumber yang berasal dari kegiatan pembakaran biomassa dan batubara, transportasi, serta kegiatan industri (Li et al., 2020). Selain itu, senyawa *polycyclic aromatic hydrocarbon* (PAHs) di udara ambien secara signifikan terkait dengan debu jatuh, yang menunjukkan korelasi positif dengan permukaan tanah karena adanya proses pertukaran senyawa pada media udara dan tanah (Zhang et al., 2018), namun pada kajian ini tidak dilakukan. Identifikasi tipikal debu jatuh dalam suatu area dapat dilakukan dengan mengamati bentuk dan jenis debu secara *granulometric*, jenis mineral, dan karakteristik elemennya (Al-Awadhi, 2005). Umumnya hal tersebut akan bersifat spesifik, contohnya jenis debu jatuh di wilayah gurun seperti Subiya di Kota Kuwait bagian utara terdiri dari lanau berpasir (*sandy silt*) yang terbentuk dari mineral kuarsa, tanah liat, *feldspars* ($\text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), dan karbonat (Al-Awadhi, 2005). Pada studi tersebut diketahui bahwa terbentuknya partikel seukuran pasir dikaitkan dengan terjadinya erosi dan degradasi lahan dari endapan permukaan lokal akibat kegiatan antropogenik.

4. Simpulan

Konsentrasi debu jatuh rata-rata di udara ambien pada tahun 2018-2020 masing-masing adalah $4,4 \pm 2,9$, $5,5 \pm 2,3$, dan $6,7 \pm 4,1$ t/km²/bulan. Nilai tersebut berada di bawah baku mutu PP No 41/1999 yaitu 10 t/km²/bulan. Berdasarkan PP No 22/2021 Lampiran VII, parameter debu jatuh tidak lagi diatur di dalamnya. Adapun logam-logam dominan yang terdapat dalam debu jatuh ini adalah Fe, K, Zn, Mg, dan Ca dengan konsentrasi rata-rata $10,3 > 2,4 > 1,9 > 1,5 > 0,3$ mg/kg.

Potensi sumber pencemaran logam ini dapat berasal dari sumber alami seperti mineral kerak bumi dan kegiatan antropogenik seperti material konstruksi bangunan, sektor industri, maupun transportasi.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PSIKLH atas SDM dan fasilitas yang tersedia, serta kepada siswa Praktik Kerja Lapangan yang telah membantu kegiatan pengujian di laboratorium udara, Sayyidina Alifia dan Siti Nurhaliza.

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 sampling, pengujian dan pelaporan hasil, sementara penulis ke tiga melakukan verifikasi hasil pengujian dan membantu pengolahan data.

Daftar Pustaka

- Al-Awadhi, J. M. (2005). Dust fallout characteristics in Kuwait: a case study. *Kuwait Journal of Science and Engineering*, 32(2), 135.
- Alahmr, F. O. M., Othman, M., Abd Wahid, N. B., Halim, A. A., & Latif, M. T. (2012). Compositions of dust fall around semi-urban areas in Malaysia. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(4), 629-642.
- Almuhanna, E. A. (2015). Dustfall associated with dust storms in the Al-Ahsa Oasis of Saudi Arabia. *Open Journal of Air Pollution*, 4(2), 11. doi:10.4236/ojap.2015.42007.
- ASTM. (2004). Standard methods for collection and measurement of dustfall *ASTM D 1739-1998 (2004)*.
- Báez A., R. B., R. García, H. Padilla, M.C. Torres. (2007). Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric*

- Research*, 86(1), 61-75. doi://10.1016/j.atmosres.2007.03.005.
- Bao, K., Xing, W., Yu, X., Zhao, H., McLaughlin, N., Lu, X., & Wang, G. (2012). Recent atmospheric dust deposition in an ombrotrophic peat bog in Great Hinggan Mountain, Northeast China. *Sci. Total Environ.*, 431, 33-45.
- Bermudez, G. M., Jasan, R., Plá, R., & Pignata, M. L. (2012). Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out: their relationship with topsoil and wheat element composition. *Journal of Hazardous Materials*, 213, 447-456.
- Biglari, H., Geravandi, S., Mohammadi, M. J., Porazmey, E. J., Chuturkova, R. Z., Khaniabadi, Y. O., . . . Yari, A. R. (2017). Relationship between air particulate matter and meteorological parameters. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(6), 4047-4056.
- Eivazzadeh, M., Hassanvand, M. S., Faridi, S., & Gholampour, A. (2021). Source apportionment and deposition of dustfall-bound trace elements around Tabriz, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13.
- Fernández-Olmo, I., Puente, M., & Irabien, A. (2015). A comparative study between the fluxes of trace elements in bulk atmospheric deposition at industrial, urban, traffic, and rural sites. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22(17), 13427-13441.
- Hulett Jr, L., Weinberger, A., Northcutt, K., & Ferguson, M. (1980). Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science*, 210(4476), 1356-1358.
- Kamble, R. (2015). Dust fall rate and its composition in Chandrapur industrial cluster, central India. *International Journal of Environment*, 4(3), 96-110.
- KLHK. (2014). IK-3/U/LPDL Penentuan Dustfall di Udara Ambien. P3KLL Serpong.
- Li, Y., Zhao, B., Duan, K., Cai, J., Niu, W., & Dong, X. (2020). Assessments of Water-Soluble Inorganic Ions and Heavy Metals in Atmospheric Dustfall and Topsoil in Lanzhou, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2970.
- Mohamed, T. A., Mohamed, M. A.-K., Rabeiy, R., & Ghandour, M. A. (2013). A study of heavy metals in the dust fall around Assiut fertilizer plant. *Journal of Environmental Protection*, 4(12), 1488.
- NOAA. (2021). Air Resource Laboratory: Transport & Dispersion Modeling HYSPLIT. Retrieved from <https://www.ready.noaa.gov/>
- Nurlatifah, A., & Driejana, R. (2019). Penelusuran trajektori aerosol di kota Bandung menggunakan HYSPLIT-4 back trajectory model studi kasus: kejadian kabut asap tanggal 23-28 oktober 2015. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 20(2), 91-99.
- Pacyna, J. M. (1986). Atmospheric trace elements from natural and anthropogenic sources. *Toxic metals in the atmosphere*, 33-52.
- Preciado, H. F., & Li, L. Y. (2006). Evaluation of metal loadings and bioavailability in air, water and soil along two highways of British Columbia, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 172(1), 81-108.
- Qiao, Q., Huang, B., Zhang, C., Piper, J. D., Pan, Y., & Sun, Y. (2013). Assessment of heavy metal contamination of dustfall in northern China from integrated chemical and magnetic investigation. *Atmospheric Environment*, 74, 182-193.
- Ram, S., Kumar, R., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S., Sudarshan, M., & Chakraborty, A. (2014). Physico-chemical characterization of street dust and re-suspended dust on plant canopies: An approach for finger printing the urban environment. *Ecological indicators*, 36, 334-338.
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Kurniawati, S., Damastuti, E., Kusmartini, I., Atmodjo, D. P. D., . . . Suprayadi, L. S. (2020). Assessment of Urban Air Quality in Indonesia. *Aerosol and Air Quality Research*, 20. doi://10.4209/aaqr.2019.09.0451/
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Mukhtar, R., Hamonangan, E., Syafrul, H., Markwitz, A., & Hopke, P. K. (2011). Preliminary study of the sources of ambient air pollution in Serpong, Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*, 2(2), 190-196. doi://10.5094/APR.2011.024.

- Sharma, A., Singh, S., & Kulshrestha, U. (2017). Determination of urban dust signatures through chemical and mineralogical characterization of atmospheric dustfall in east Delhi (India). *J Ind Geophys Union*, 21(2), 140-147.
- Shi, G., Chen, Z., Teng, J., Bi, C., Zhou, D., Sun, C., . . . Xu, S. (2012). Fluxes, variability and sources of cadmium, lead, arsenic and mercury in dry atmospheric depositions in urban, suburban and rural areas. *Environ. Res.*, 113, 28-32.
- Theodosi, C., Stavrakakis, S., Koulaki, F., Stavrakaki, I., Moncheva, S., Papathanasiou, E., . . . Mihalopoulos, N. (2013). The significance of atmospheric inputs of major and trace metals to the Black Sea. *J Mar Syst*, 109, 94-102.
- Usmadi, U. (2020). Pengujian persyaratan analisis (Uji homogenitas dan uji normalitas). *Inovasi Pendidikan*, 7(1).
- Wang, J., Zhang, X., Yang, Q., Zhang, K., Zheng, Y., & Zhou, G. (2018). Pollution characteristics of atmospheric dustfall and heavy metals in a typical inland heavy industry city in China. *J. Environ. Sci.*, 71, 283-291.
- Yang, S., Liu, J., Bi, X., Ning, Y., Qiao, S., Yu, Q., & Zhang, J. (2020). Risks related to heavy metal pollution in urban construction dust fall of fast-developing Chinese cities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 197, 110628. doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110628
- Zhang, Y., Hou, D., Xiong, G., Duan, Y., Cai, C., Wang, X., . . . Liu, W. (2018). Structural equation modeling of PAHs in ambient air, dust fall, soil, and cabbage in vegetable bases of Northern China. *Environ. Pollut.*, 239, 13-20.