

Identifikasi Konsentrasi Emisi *Fine Particle* di Ruang Tertutup dengan Sistem Pendingin Udara Otomatis

Arif Budianto¹, Kasnawi Al Hadi^{1*}, Nanda Medina Apriza¹, Roviq Wijaya¹

¹Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia.

DOI: 10.29303/goescienceed.v5i4.509

Article Info

Received: 22 Oktober 2024

Revised: 29 Oktober 2024

Accepted: 4 November 2024

Correspondence:

Phone: +62 852-2902-2463

Abstrak: *Particulate matter* adalah emisi udara yang terdiri dari kumpulan partikel padat dan cair dan tersuspensi di udara. Emisi ini berukuran sangat kecil (berorde submikron) dan mengambang bebas di udara. *Fine particle* adalah salah satu jenis *particulate matter* yang umum digunakan sebagai komponen penentu kualitas udara di dalam ruangan. Di sisi lain, sistem pengukuran konsentrasi emisi ini relatif mahal dan kurang ekonomis. Sejalan dengan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi *fine particle* dalam ruang berpendingin udara. Pengukuran dilakukan menggunakan sebuah sensor debu digital dan papan mikrokontroler di dalam ruang pengujian selama satu jam. Pengukuran tersebut dilakukan dengan dua variasi kondisi, yakni aktif (banyak orang di dalamnya) dan non aktif (ruang kosong). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa aktivitas dan pergerakan manusia dalam kondisi pengujian aktif memiliki konsentrasi *fine particle* yang lebih tinggi dibandingkan kondisi non aktif. Perbedaan konsentrasi di antara kedua kondisi ini sebesar $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hasil ini menyimpulkan bahwa aktivitas manusia termasuk sebagai faktor yang dapat mempengaruhi distribusi partikulat berorde submikron di dalam ruangan. Ruang berpendingin udara berpotensi memiliki lebih banyak konsentrasi *fine particle* dibandingkan dengan ruang tanpa pendingin udara.

Kata kunci: emisi udara; *fine particle*; kualitas udara; ruangan tertutup; sistem pengukuran.

Citation: Budianto, A., Hadi, K. A., Apriza, N., & Wijaya, R. (2024). Identifikasi konsentrasi emisi *fine particle* di ruangan tertutup dengan sistem pendingin udara otomatis. *Journal of Education, Science, Geology, and Geophysics (GeoScienceEd)*, 5(4), 808-813

Pendahuluan

Monitoring baku mutu udara dan indkes kualitas udara dapat dinyatakan dalam indeks khusus bernama AQI (*Air Quality Index*) yang dipergunakan secara resmi di dunia (Hachem et al., 2021; Zhang et al., 2019). Di Indonesia, indeks ini dikenal sebagai ISPU (Indeks Standar Pencemar Udara). Keberadaan indeks baku mutu udara ini sangat penting, mengingat kualitas udara dalam isu lingkungan udara saat ini relatif dipengaruhi oleh berbagai sumber pencemaran udara (oleh gas dan *particulate matter*), seperti pembakaran biomassa (Sagastume Gutiérrez et al., 2022), kendaraan bermotor (Minguillón et al., 2015), aktivitas industri dan pembangkit listrik (Dimitriou et al., 2021; Oetari et al., 2019), percetakan atau printing (Wang et al., 2019),

aktivitas memasak sehari-hari (Qi et al., 2017), merokok (Marco et al., 2016), dan lain sebagainya.

PM atau *particulate matter* merupakan salah satu istilah umum yang seringkali dibicarakan dalam isu lingkungan udara. PM merupakan campuran dalam wujud suspensi antara partikel berbentuk padat dan droplet (tetesan air) di udara (Ravindra et al., 2023). PM merupakan salah satu jenis emisi (selain emisi berbentuk gas seperti emisi karbon dioksida, karbon monoksida, nitrogen dioksida, dan lainnya) yang sangat mudah terdistribusi dan melayang-layang di udara dalam jangka waktu yang cukup lama (Madhwal et al., 2020). Dalam sebuah penelitian, diketahui bahwa PM dengan berbagai variasi ukurannya dapat dengan mudah bergerak, mengambang, melayang-layang di

Email: kasnawi.alhadi@unram.ac.id

udara (ambient air), dan kemudian terdeposisi ataupun mengalami nukleasi dan aglomerasi (Hadi et al., 2021; Wardoyo & Budianto, 2017).

Mengacu pada perbedaan ukuran diameternya, PM diklasifikasikan menjadi $PM_{0,1}$, $PM_{2,5}$, dan PM_{10} . $PM_{0,1}$ atau *ultrafine particle* memiliki ukuran terkecil, yaitu dengan diameter kurang dari atau sama dengan $0,1 \mu m$ (Fujitani et al., 2020; Khoa et al., 2023). *Ultrafine particle* diukur dan dinyatakan dalam satuan konsentrasi distribusi partikel karena ukurannya yang sangat kecil (He et al., 2023), meskipun pada umumnya distribusi partikel ditulis dalam satuan partikel/ cm^3 , atau jumlah partikel per satuan volume. Klasifikasi selanjutnya adalah $PM_{2,5}$ atau yang biasa disebut sebagai *fine particle* dan turunannya. Klasifikasi ini memiliki distribusi massa ($\mu g/m^3$) dan berdiameter lebih dari $0,1 \mu m$ dan kurang dari $2,5 \mu m$ (Mahasakpan et al., 2023). Karena ukurannya yang sedikit lebih besar dibandingkan dengan *ultrafine particle*, maka $PM_{2,5}$ dinyatakan dalam distribusi massa, bukan menggunakan distribusi jumlah partikel. Kelompok ketiga adalah *coarse particle* atau PM_{10} , dengan ukuran yang lebih besar dibandingkan kedua kelompok PM sebelumnya. PM_{10} berdiameter lebih dari $10 \mu m$, dan dinyatakan dalam distribusi massa (Jameson et al., 2020).

PM dapat dihasilkan dari berbagai aktivitas, baik alami maupun buatan. Sebagian besar emisi PM dihasilkan dari reaksi pembakaran yang tidak sempurna. Sumber PM dari reaksi pembakaran contohnya adalah kebakaran hutan, kebakaran lahan (Suriyawong et al., 2023), memasak menggunakan bahan biomassa (seperti kayu bakar) (Hadi et al., 2022), pembangkit listrik, dan sebagainya. Aktivitas transportasi juga merupakan sumber PM yang berasal dari aktivitas manusia karena mengemisikan berbagai ukuran PM (Minguillón et al., 2015). Aktivitas vulkanik gunung berapi juga adalah salah satu sumber emisi PM (Butwin et al., 2019).

Di dalam ruangan, PM juga tersebar dan melayang-layang di udara *ambient*. Sebaran atau distribusi PM tidak hanya untuk PM berdiameter besar, namun juga PM berukuran submikron seperti *ultrafine particle* dan *fine particle* (Shi & Li, 2018). Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran PM di dalam udara ruangan memiliki urgensi tinggi untuk dilakukan.

Distribusi jumlah dan ukuran, konsentrasi, dan durasi paparan emisi PM berkorelasi dengan kesehatan manusia. Beberapa penelitian terbaru membuktikan keberadaan korelasi positif antara paparan PM dengan konsentrasi tertentu dan deformasi sel. Spesifik pada *fine particle*, $PM_{2,5}$ dapat dikaitkan dengan stres oksidatif di paru-paru (Siregar et al., 2023). Paparan berlebih *fine particle* dapat mengubah bentuk alamiah

sel yang selanjutnya berhubungan dengan kerusakan sel, seperti sel sabit atau sickle cell dan teardrop-shaped cell (Hadi et al., 2022). Mengacu pada sebuah studi di Eropa dan Asia, emisi PM dari pembakaran biomassa berkorelasi dengan gangguan sistem kardiovaskular (Sigsgaard et al., 2015). Inhalasi PM bagi manusia dapat mengakibatkan PM terdeposisi dan mengendap di sekitaran permukaan organ paru (Möller et al., 2008; Sioutas et al., 2005). Akibat ukurannya yang kecil, PM dapat terdeposisi lebih jauh ke organ lainnya dengan melalui aliran darah.

Latar belakang di atas sekali lagi menunjukkan bahwa udara di dalam ruangan juga tak lepas dari adanya potensi sebaran atau distribusi *fine particle*. Uraian tersebut di atas telah mendeskripsikan gambaran umum PM, secara spesifik *fine particle* dan dampak negatifnya nya bagi kesehatan. Oleh sebab itu, diperlukan sebuah pengukuran terkait besar konsentrasi *fine particle* di udara ruangan sebagai sebuah bentuk mitigasi pencegahan dampak negatif dari PM tersebut.

Metode

Penelitian dilakukan di ruang tertutup di FMIPA Universitas Mataram. Secara spesifik, keseluruhan pengujian dilakukan di dalam ruangan tertutup (temperatur $16-28^\circ C$, dengan kelembaban udara relatif $\pm 68\%$). Ruang pengujian merupakan area yang digunakan sebagai ruang perkuliahan. Kondisi ruangan dibagi ke dalam dua jenis, yakni menggunakan pendingin udara (kondisi A) dan tanpa pendingin udara (kondisi B). Variasi kedua yakni kondisi 1 dan kondisi 2, yang merupakan kondisi ruang kosong (tanpa orang) dan kondisi ruang aktif (terdapat orang di dalamnya) (Tabel 1).

Tabel 1. Variasi Pengukuran Konsentrasi $PM_{2,5}$

Variasi Laju Hisap	A	B
Kosong	A1	B1
Terdapat manusia	A2	B2
Jumlah manusia		
Kosong	0	0
Terdapat manusia	20	20
Pendingin udara	aktif	non aktif

Pengukuran dilakukan menggunakan sebuah mikrokontroler jenis Arduino UNO dan sensor partikulat. Sensor tersebut digunakan sebagai elemen *sensing* untuk mengukur konsentrasi $PM_{2,5}$ secara *real-time*. Keseluruhan sistem dimasukkan ke dalam sebuah boks sensor yang dilengkapi dengan pompa hisap udara terkontrol (Gambar 1). Data hasil pengukuran

ditampilkan pada sebuah layar (LCD) (Budianto et al., 2021). Pengujian dilakukan selama 1 jam untuk seluruh variasi kondisi. Pengujian dilakukan dengan interval waktu 5 menit per satu kali pencacahan data.



Gambar 1. Desain sistem pengukuran konsentrasi

Data yang dihasilkan diinterpretasikan dalam bentuk nilai rata-rata (*mean*) ± standar deviasi (SD). Nilai linearitas (R^2) diperoleh berdasarkan korelasi persamaan linear (1):

$$y = ax + b \tag{1}$$

antara waktu pengukuran (t , dalam sumbu x) dengan konsentrasi yang terbaca (C , dalam sumbu y). Linearitas dinyatakan dalam persentase (%) dari nilai koefisien determinasi (R^2). Adapun *range* dan *span* hasil pengukuran diperoleh berdasarkan pada hasil pengukuran minimal dan maksimal konsentrasi $PM_{2.5}$.

Hasil dan Pembahasan

Ruangan dengan Pendingin Udara.

Pengukuran konsentrasi *fine particle* pada kondisi A ditunjukkan oleh Tabel 2. Konsentrasi terukur pada kondisi A-1 berkisar antara 13-16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai terendah didapatkan pada pencacahan menit ke-20. Tabel tersebut menunjukkan bahwa kondisi A-1 memiliki lebih sedikit konsentrasi *fine particle* dibandingkan dengan kondisi A-2. Hasil tersebut konsisten untuk keseluruhan waktu pencacahan, mulai dari menit kelima hingga menit terakhir. Tampak bahwasannya konsentrasi *fine particle* pada kondisi ruang dengan aktivitas manusia (A-2) memiliki nilai yang terbesar (31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan manusia ataupun pergerakan/ aktivitas manusia di dalam ruangan tertutup dengan pendingin udara dapat mempengaruhi distribusi massa *fine particle*.

Tabel 2. $PM_{2.5}$ di Ruang Berpendingin Udara

Waktu Pencacahan (menit)	A-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	A-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
5	14	31
10	15	27
15	15	29
20	13	26
25	14	24
30	14	29

35	14	26
40	16	24
45	15	22
50	14	28
55	15	31
60	15	29
Rata-rata	15±1	27±3

Data pada Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran untuk ruang tanpa pendingin udara. Pengukuran ini diperoleh dalam waktu atau durasi 60 menit.

Tabel 3. $PM_{2.5}$ di Ruang Tanpa Pendingin Udara

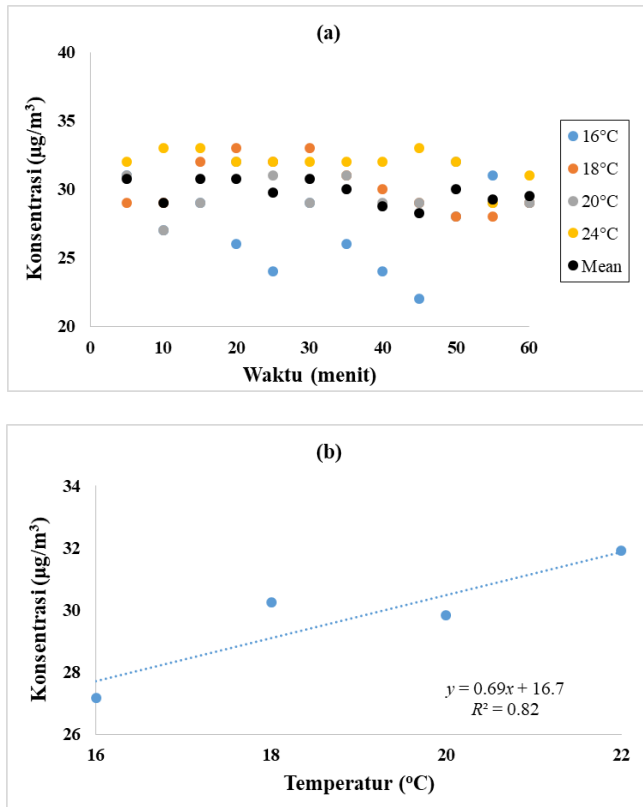
Waktu Pencacahan (menit)	A-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	A-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
5	9	22
10	9	19
15	10	24
20	9	21
25	9	21
30	9	23
35	11	20
40	9	20
45	9	23
50	9	22
55	9	19
60	11	19
Rata-rata	9±1	21±2

Data tersebut diperoleh untuk pencacahan setiap 5 menit secara langsung. Tabel tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi terendah sebesar 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ terdapat pada kondisi B-1. Pada variasi ini (B-1), nilai konsentrasi terbesar hanyalah sebesar 11, yang diperoleh pada waktu pencacahan 35 menit dan 60 menit. Hasil ini jauh berbeda dibandingkan dengan pengukuran pada kondisi B-2 atau ruangan dengan terdapat aktivitas manusia di dalamnya. Pada kondisi B-2, konsentrasi terbesar yakni sebesar 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai ini diperoleh pada waktu pencacahan menit 15, yang berbeda sebesar 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dibandingkan nilai terbesar kondisi B-1.

Pengaruh Temperatur Terhadap Konsentrasi.

Data sebelumnya mengindikasikan bahwasannya kondisi ruangan yang dilengkapi sistem pendingin udara memiliki konsentrasi *fine particle* yang lebih besar

jika dibandingkan dengan ruangan tanpa pendingin ruangan. Selanjutnya, dilakukan identifikasi pengaruh temperatur terhadap konsentrasi *fine particle*. Gambar 2 menunjukkan hasil analisis korelasi linear yang menunjukkan hubungan antara temperatur terhadap konsentrasi *fine particle* di ruangan dengan sistem pendingin udara.



Gambar 2. (a) Pengukuran *fine particle* di kondisi A-2 pada beberapa variasi temperatur; dan (b) Analisis pengaruh temperatur terhadap konsentrasi *fine particle* ($R^2 = 0.82$).

Hasil ini sesuai dengan teori, di mana dengan luas penampang (A) yang sama dan dengan waktu sampling (t) yang sama, maka volume udara (V) akan berubah-ubah sesuai dengan laju aliran udara (2):

$$Q = A \cdot v \quad (2)$$

Debit Q juga bisa dinyatakan dalam (3):

$$Q = V / t \quad (3)$$

Dengan memasukkan persamaan (2) ke persamaan (3), didapatkan persamaan (4):

$$A \cdot v = V / t \quad (4)$$

Persamaan (4) ini menunjukkan bahwa laju alir udara (v) menentukan volume udara yang dianalisis. Di sisi lain, temperatur ruangan atau kondisi panas dingin udara (T) di dalam ruangan juga berbanding lurus dengan volume udara tersebut (5):

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (5)$$

Hal ini menunjukkan bahwa volume udara berisi *fine particle* di dalam ruang dengan temperatur yang lebih tinggi akan lebih besar jika dibandingkan dengan ruangan bertemperatur lebih rendah. Di sisi lain, volume udara yang rendah sebanding dengan lebih rendahnya konsentrasi *fine particle* yang terukur di dalam medium udara ruangan. Faktor inilah yang menyebabkan ruangan dengan temperatur lebih tinggi memiliki konsentrasi *fine particle* yang lebih tinggi pula. Meskipun ruangan berpendingin udara memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan ruangan tanpa pendingin udara, konsentrasi *fine particle* yang lebih besar justru terdapat pada ruangan berpendingin udara. Dalam hal ini, faktor kecepatan atau laju alir udara menentukan pergerakan partikel. Pergerakan acak partikel berukuran kecil ini kemudian menimbulkan efek gerak *Brownian motion*, yang mengakibatkan partikulat mengalami nukleasi dan aglomerasi untuk membentuk partikulat yang baru (Wardoyo & Budianto, 2017).

Kesimpulan

Hasil penelitian menghasilkan data pengukuran konsentrasi *fine particle* atau $\text{PM}_{2.5}$ skala ruangan yang dilengkapi pendingin udara. Ruangan dengan pendingin udara relatif memiliki konsentrasi *fine particle* yang lebih besar jika dibandingkan dengan ruangan tanpa sistem pendingin udara. Perbedaan konsentrasi di antara keduanya yakni sebesar $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aktivitas manusia juga menentukan sebaran konsentrasi *fine particle*, di mana ruangan dengan aktivitas manusia berpotensi memiliki konsentrasi *fine particle* yang lebih besar dibandingkan ruangan kosong.

Ucapan Terima Kasih

Seluruh penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan dalam skema PDP (Penelitian Dosen Pemula) yang diberikan oleh Universitas Mataram.

Daftar Pustaka

- Budianto, A., Wardoyo, A. Y. P., Masruroh, Dharmawan, H. A., & Nurhuda, M. (2021). Performance test of an aerosol concentration measurement system based on quartz crystal microbalance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1811(1).

- <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012033>
- Butwin, M. K., von Löwis, S., Pfeffer, M. A., & Thorsteinsson, T. (2019). The effects of volcanic eruptions on the frequency of particulate matter suspension events in Iceland. *Journal of Aerosol Science*, 128(November 2018), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.12.004>
- Dimitriou, K., Bougiatioti, A., Ramonet, M., Pierros, F., Michalopoulos, P., Liakakou, E., Solomos, S., Quehe, P. Y., Delmotte, M., Gerasopoulos, E., Kanakidou, M., & Mihalopoulos, N. (2021). Greenhouse gases (CO₂ and CH₄) at an urban background site in Athens, Greece: Levels, sources and impact of atmospheric circulation. *Atmospheric Environment*, 253(March), 118372. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118372>
- Fujitani, Y., Takahashi, K., Fushimi, A., Hasegawa, S., Kondo, Y., Tanabe, K., & Kobayashi, S. (2020). Particle number emission factors from diesel trucks at a traffic intersection: Long-term trend and relation to particle mass-based emission regulation. *Atmospheric Environment: X*, 5, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100055>
- Hachem, M., Loizeau, M., Saleh, N., Momas, I., & Bensefa-Colas, L. (2021). Short-term association of in-vehicle ultrafine particles and black carbon concentrations with respiratory health in Parisian taxi drivers. *Environment International*, 147, 106346. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106346>
- Hadi, K. Al, Wardoyo, A. Y. P., Juswono, U. P., Naba, A., Budianto, A., & Adi, E. T. P. (2022). A Study of Erythrocyte Deformation Level Related to Biomass Burning Emission Exposures Using Artificial Neural Networks. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(6), 5037–5046. <https://doi.org/10.15244/pjoes/150643>
- Hadi, K. A., Wardoyo, A. Y. P., Naba, A., Juswono, U. P., & Budianto, A. (2021). Investigation of burning rate on particulate matter emission factor of rice straw burning (case study in Lombok Island, Indonesia). *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012051>
- He, Y., Lan, X., & Zhu, L. (2023). Effect of urban green infrastructure on pedestrian exposure to ultrafine particles: A case study of Guangzhou, China. *Urban Climate*, 49(August 2022), 101453. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101453>
- Jameson, G. J., Cooper, L., Tang, K. K., & Emer, C. (2020). Flotation of coarse coal particles in a fluidized bed: The effect of clusters. *Minerals Engineering*, 146(October 2019), 106099. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106099>
- Khoa, N. D., Li, S., Phuong, N. L., Kuga, K., Yabuuchi, H., Kan-O, K., Matsumoto, K., & Ito, K. (2023). Computational fluid-particle dynamics modeling of ultrafine to coarse particles deposition in the human respiratory system, down to the terminal bronchiole. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 237, 107589. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107589>
- Madhwal, S., Prabhu, V., Sundriyal, S., & Shridhar, V. (2020). Ambient bioaerosol distribution and associated health risks at a high traffic density junction at Dehradun city, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8158-9>
- Mahasakpan, N., Chaisongkaew, P., Inerb, M., Nim, N., Phairuang, W., Tekasakul, S., Furuuchi, M., Hata, M., Kaosol, T., Tekasakul, P., & Dejchanchaiwong, R. (2023). Fine and ultrafine particle- and gas-polycyclic aromatic hydrocarbons affecting southern Thailand air quality during transboundary haze and potential health effects. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.11.005>
- Marco, C. De, Ruprecht, A. A., Pozzi, P., Munarini, E., Ogliari, A. C., Mazza, R., & Boffi, R. (2016). Particulate matters from diesel heavy duty trucks exhaust versus cigarettes emissions: a new educational antismoking instrument. *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, 1–5. <https://doi.org/10.1186/s40248-016-0042-7>
- Minguillón, M. C., Rivas, I., Moreno, T., Alastuey, A., Font, O., Córdoba, P., Álvarez-Pedrerol, M., Sunyer, J., & Querol, X. (2015). Road traffic and sandy playground influence on ambient pollutants in schools. *Atmospheric Environment*, 111, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.011>
- Möller, W., Felten, K., Sommerer, K., Scheuch, G., Meyer, G., Meyer, P., Häussinger, K., & Kreyling, W. G. (2008). Deposition, Retention, and Translocation of Ultrafine Particles from the Central Airways and Lung Periphery. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 177, 426–432. <https://doi.org/10.1164/rccm.200602-301OC>
- Oetari, P. S., Hadi, S. P., & Huboyo, H. S. (2019). Trace elements in fine and coarse particles emitted

- from coal-fired power plants with different air pollution control systems. *Journal of Environmental Management*, 250(August), 109497.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109497>
- Qi, M., Zhu, X., Du, W., Chen, Y., Chen, Y., Huang, T., Pan, X., Zhong, Q., Sun, X., Zeng, E. Y., Xing, B., & Tao, S. (2017). Exposure and health impact evaluation based on simultaneous measurement of indoor and ambient PM_{2.5} in Haidian, Beijing. *Environmental Pollution*, 220, 704–712.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.035>
- Ravindra, K., Singh, T., Singh, V., Chintalapati, S., Beig, G., & Mor, S. (2023). Understanding the influence of summer biomass burning on air quality in North India: Eight cities field campaign study. *Science of the Total Environment*, 861(December 2022), 160361.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160361>
- Sagastume Gutiérrez, A., Mendoza Fandiño, J. M., Cabello Eras, J. J., & Sofan German, S. J. (2022). Potential of livestock manure and agricultural wastes to mitigate the use of firewood for cooking in rural areas. The case of the department of Cordoba (Colombia). *Development Engineering*, 7(October 2021).
<https://doi.org/10.1016/j.deveng.2022.100093>
- Shi, Y., & Li, X. (2018). Purifier or fresh air unit? A study on indoor particulate matter purification strategies for buildings with split air-conditioners. *Building and Environment*, 131(December 2017), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.033>
- Sigsgaard, T., Forsberg, B., Annesi-Maesano, I., Blomberg, A., Bølling, A., Boman, C., Bønløkke, J., Brauer, M., Bruce, N., Héroux, M. E., Hirvonen, M. R., Kelly, F., Künzli, N., Lundbäck, B., Moshhammer, H., Noonan, C., Pagels, J., Sallsten, G., Sculier, J. P., & Brunekreef, B. (2015). Health impacts of anthropogenic biomass burning in the developed world. *European Respiratory Journal*, 46(6), 1577–1588.
<https://doi.org/10.1183/13993003.01865-2014>
- Sioutas, C., Delfino, R. J., & Singh, M. (2005). Exposure Assessment for Atmospheric Ultrafine Particles (UFPs) and Implications in Epidemiologic Research. *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 947–956.
<https://doi.org/10.1289/ehp.7939>
- Siregar, U. A., Valzon, M., Fitrianti, & Budianto, A. (2023). Effect of peat biomass smoke exposure on oxidative stress in Wistar rats. *Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Indonesia*, 14(2), 121–127.
<https://doi.org/10.20885/JKKI.Vol14.Iss2.art2>
- Suriyawong, P., Chuetor, S., Samae, H., Piriyaakarnsakul, S., Amin, M., Furuuchi, M., Hata, M., Inerb, M., & Phairuang, W. (2023). Airborne particulate matter from biomass burning in Thailand: Recent issues, challenges, and options. *Heliyon*, 9(3), e14261.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14261>
- Wang, Y., Wang, Y., Liu, W., Chen, D., Wu, C., & Xie, J. (2019). An aerosol sensor for PM₁ concentration detection based on 3D printed virtual impactor and SAW sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 288, 67–74.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.01.013>
- Wardoyo, A., & Budianto, A. (2017). A DC Low Electrostatic Filtering System For PM_{2.5} Motorcycle Emission. *IEEE Xplore*, 1, 51–54.
- Zhang, J. J., Wei, Y., & Fang, Z. (2019). Ozone pollution: A major health hazard worldwide. *Frontiers in Immunology*, 10(October), 1–10.
<https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>