

## Analisis Distribusi Ukuran dan Kandungan Logam pada Partikulat di Sekitar Industri Semen Kota Padang

Zaky Farnas<sup>1\*</sup>, Fadjar Goembira<sup>2</sup>, Zulkarnaini<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, 25175, Indonesia

\*Corresponding author, e-mail: zakyfarnas.zf@gmail.com

Received 12<sup>th</sup> March 2023; 1<sup>st</sup> Revision 21<sup>th</sup> March 2023; Accepted 28<sup>th</sup> March 2023

### ABSTRAK

Aktivitas penggunaan bahan bakar batu bara pada industri semen di Kota Padang menjadi salah satu zat pencemar yang dilepaskan di udara ambien dalam bentuk partikulat yang mengandung logam berat, sehingga perlu dilakukan analisis terhadap konsentrasi partikulat Total Suspended Solid (TSP), Particulate Matter ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , dan  $PM_1$ ). Penelitian dilakukan pada perumahan di sekitar industri semen. Pengukuran jumlah partikulat dilakukan dengan menggunakan nano sampler dan analisis jumlah partikulat menggunakan metode gravimetri, untuk analisis logam berat yang terkandung dalam partikulat menggunakan Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP MS). Hasil dari pengukuran didapati bahwa konsentrasi partikulat tertinggi berada di Perumahan Unand Blok D dengan persentase TSP sebesar 41% (konsentrasi  $60,275 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ),  $PM_{10}$  33% (konsentrasi  $49,234 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ),  $PM_{2,5}$  18% (konsentrasi  $26,776 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), dan  $PM_1$  8% (konsentrasi  $12,53 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) dan jika dibandingkan dengan baku mutu, maka konsentrasi partikulat pada udara ambien masih berada di bawah baku mutu. Kandungan logam pada partikulat yang terukur dari tertinggi sampai terendah adalah Ca, Cd, As, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, dan Hg.

**Kata Kunci:** Partikulat; Logam Berat; Udara Ambien; Industri Semen.

### ABSTRACT

The activity of using coal as fuel in the cement industry in Padang City is one of the pollutants released into the ambient air in the form of particulates containing heavy metals, so it is necessary to analyze the concentration of Total Suspended Solid (TSP), Particulate Matter ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , and  $PM_1$ ). The research was conducted on housing around the cement industry. Measurement of the number of particulates was carried out using a nano sampler and analysis of the number of particulates using the gravimetric method, for the analysis of heavy metals contained in particulates using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP MS). The results of the measurements found that the highest concentration of particulate matter was in Unand Housing Block D with a TSP percentage of 41% (concentration  $60.275 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ),  $PM_{10}$  33% (concentration  $49.234 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ),  $PM_{2.5}$  18% (concentration  $26.776 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), and  $PM_1$  8% (concentration  $12.53 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) and when compared with the quality standard, the concentration of particulates in ambient air is still below the quality standard. The metal content in particulates measured from highest to lowest is Ca, Cd, As, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, and Hg.

**Keywords:** Particulates; Heavy Metals; Ambient Air; Cement Industry.

Copyright © Zaky Farnas, Fadjar Goembira, Zulkarnaini

This is an open access article under the: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## PENDAHULUAN

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar oleh industry semen memiliki emisi pencemar yang besar terhadap udara [1]. Batu bara yang digunakan oleh industri semen di Kota Padang merupakan batuan sedimen kaya organik yang banyak mengandung logam berpotensi membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia di antaranya Ca, Cd, As, Hg, Pb, Cr, Cu, Zn, dan Ni [2][3].

*Particulate Matter* (PM) di udara cenderung terakumulasi zat berbahaya dan menghirup PM tersebut menyebabkan efek kesehatan yang merugikan kesehatan manusia [4][5]. Dampak dari PM hasil pembakaran berpotensi menyebabkan gangguan sistem pernapasan, gangguan fungsi jantung, kanker, stres oksidatif dan dapat masuk ke dalam darah dan otak sehingga mempengaruhi sistem kardiovaskular, liver, dan limpa [6][7][8][9].

Paparan kronis terhadap logam berat terkait PM, seperti Ni, Cr, dan Cd secara substansi mengganggu fungsi paru-paru [10] dan mengakibatkan gejala mulai dari asma, emfisema, dan kanker paru-paru [11][12][13]. Selain itu penyakit pernafasan jika menghirup PM terkait logam berat (misalnya Pb dan As) dapat menyebabkan efek merugikan lainnya, seperti neuropati, peningkatan tekanan darah dan anemia, kerusakan, dan kanker ginjal [14][15][16].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis konsentrasi, distribusi ukuran partikulat (TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, dan PM<sub>1</sub>) dan komposisi beberapa logam (Ca, Cd, As, Hg, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni) yang terkandung dalam partikulat pada udara ambien di sekitar industri semen di Kota Padang.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode observasi langsung dan teknik *cluster sampling*. Teknik *cluster sampling* ini memilih sampel berdasarkan pengelompokan wilayah geografis pada 3 tempat, satu wilayah *background* dan dua wilayah terdampak. Untuk wilayah *background* dipilih Kelurahan Limau Manis dan titik sampling diletakkan di Jurusan Teknik Lingkungan dengan jarak 4,2 Km arah Utara industri semen di Kota Padang. Lokasi dari wilayah *background* dipilih karena lokasi tidak berada pada arah angin dominan lebih tepatnya berada di Utara dari industri semen di Kota Padang. Wilayah yang diperkirakan terdampak industri semen di Kota Padang yaitu Perumahan Unand Blok D dengan jarak 1,4 Km dari industri semen di Kota Padang dan Perumahan Atap Genteng dengan jarak 1,6 Km dari industri semen di Kota Padang, dimana merupakan lokasi yang diperkirakan terdampak kegiatan industri semen di Kota Padang berdasarkan arah angin dominan.

### Sampel Partikulat

Sampling partikulat dilakukan untuk pengambilan data primer dan dilakukan selama 3x24 jam untuk masing-masing titik sampling. Lokasi peletakan alat sampling ditentukan sesuai dengan SNI 19-7119.6-2005 tentang Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara Ambien. Sampling partikulat menggunakan alat *Nano Sampler*. Filter yang digunakan adalah PALLFLEX Fiber Filter<sup>TM</sup> dimensi 55 mm untuk ukuran <100 µm (TSP), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> dan PM<sub>1</sub>.

### Konsentrasi Massa Partikulat

Analisis konsentrasi massa partikulat dilakukan dengan metode gravimetri. Massa partikulat dihitung dengan cara menimbang selisih massa filter sebelum dan sesudah sampling

menggunakan neraca analitik tipe Shimadzu BOECO Germany<sup>TM</sup> dengan ketelitian 10 µg. Sebelum penimbangan filter dilakukan, filter dipanaskan pada suhu 350°C selama 1 jam menggunakan *furnace* dan kemudian dikondisikan pada suhu 25°C dan kelembaban 57% selama 24 jam. Data hasil penimbangan selisih massa filter tersebut diolah lebih lanjut untuk memperoleh konsentrasi massa partikulat.

### Analisis Komposisi Partikulat

Kandungan logam (Ca, Cd, As, Hg, Pb, Cr, Cu, Zn, dan Ni) yang terdapat dalam partikulat dianalisis dengan menggunakan alat Shimadzu ICPE 9000<sup>TM</sup> alat ini mengharuskan sampel partikulat berada dalam bentuk cair. Untuk mencairkan partikulat yang telah terkumpul pada filter dilakukan dengan metode destruksi filter. Proses destruksi dilakukan dalam lemari asam karena menggunakan larutan HNO<sub>3</sub> yang bersifat iritan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kondisi Meteorologi

kondisi meteorologi yang berpengaruh antara lain suhu udara (°C), kelembaban (%), tekanan udara (mmHg), kecepatan angin (m/s), dan arah angin.

Tabel 1. Rata-rata Kondisi Meteorologi di sekitar Industri Semen

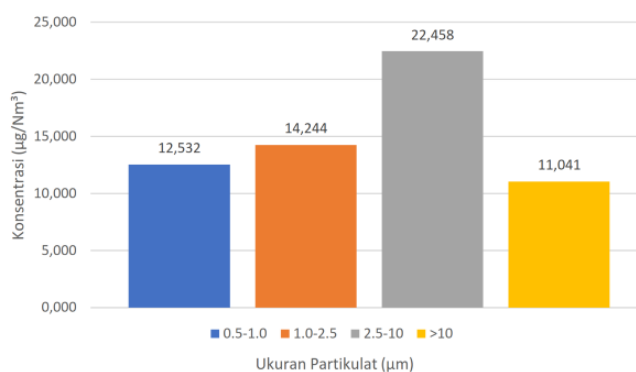
No	Waktu	Temperatur (°C)	Kelembaban (%)	Tekanan (mmHg)	Kecepatan Angin (m/s)
1	Siang	28,3	69,5	731,6	0,7
2	Malam	27,9	74,1	732,3	0,1

Arah angin dominan pada siang dan malam hari berbeda. Siang hari arah angin bergerak dari arah Barat menuju Timur sedangkan pada malam hari angin bergerak dari arah Timur menuju Barat Laut.

### Konsentrasi partikulat

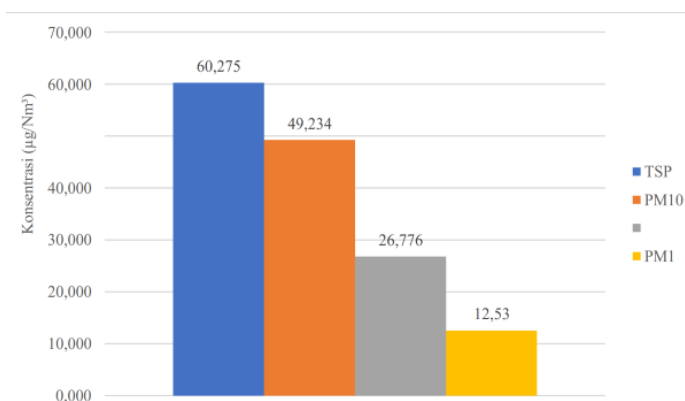
#### Konsentrasi Partikulat di Perumahan Unand Blok D

Hasil pengukuran konsentrasi cenderung berbeda pada hari pertama dengan hari kedua dan ketiga. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan kondisi meteorologi yang berbeda dimana pada hari pertama sampling kondisi cukup panas sehingga kelembaban udara rendah yang menyebabkan partikulat menyebar diudara dalam jumlah banyak.

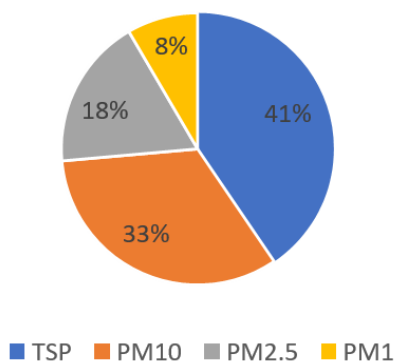


Gambar 1. Konsentrasi Partikulat Berdasarkan Ukuran di Perumahan Unand Blok D

Partikulat yang mendominasi udara ambien Perumahan Unand Blok D adalah partikulat yang berukuran 2,5-10  $\mu\text{m}$  dengan rata-rata konsentrasi 22,458  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , kemudian diikuti dengan partikulat berukuran 1,0-2,5  $\mu\text{m}$  dengan rata-rata konsentrasi 14,244  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , selanjutnya diikuti dengan partikulat berukuran 0,5-1,0  $\mu\text{m}$  dengan rata-rata konsentrasi 12,532  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan terakhir diikuti dengan ukuran partikulat  $>10 \mu\text{m}$  dengan konsentrasi 11,041  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Konsentrasi rata-rata TSP di Perumahan Unand Blok D adalah 60,275  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , konsentrasi PM10 dengan nilai rata-rata 49,234  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , konsentrasi PM2,5 dengan nilai rata-rata 26,776  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .



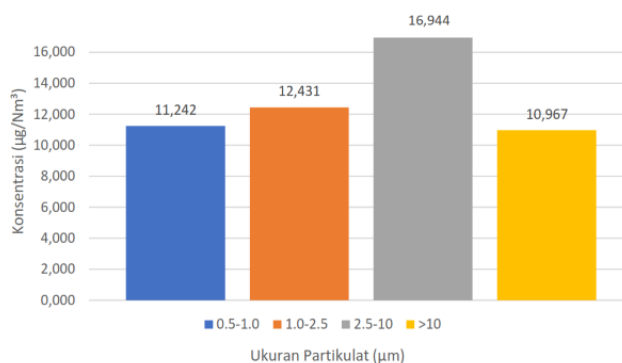
Gambar 2. Konsentrasi Partikulat di Perumahan Unand Blok D



Gambar 3. Persentase Distribusi Partikulat di Perumahan Unand Blok D

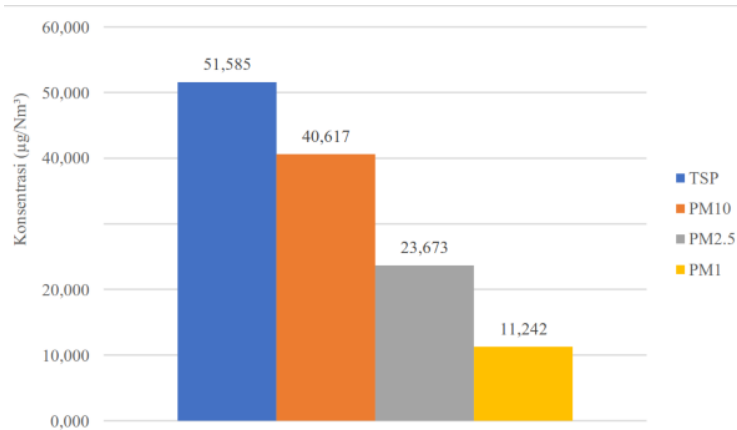
Udara ambien di Perumahan Unand Blok D didominasi oleh TSP sebesar 41% kemudian diikuti oleh PM<sub>10</sub> sebesar 33%, PM<sub>2,5</sub> sebesar 18% dan keberadaan partikel terkecil adalah PM<sub>1</sub> dengan persentase sebesar 8% dari total partikulat di Perumahan Unand Blok D.

### Konsentrasi Partikulat di Perumahan Atap Genteng



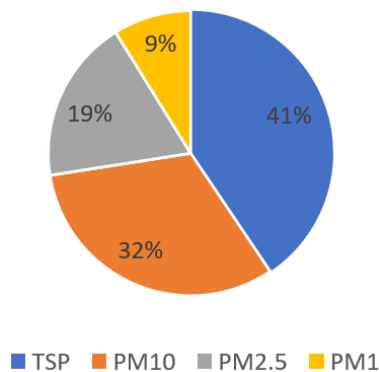
Gambar 4. Konsentrasi Partikulat Berdasarkan Ukuran di Perumahan Atap Genteng

Konsentrasi partikulat tertinggi adalah pada partikel berukuran 2,5-10  $\mu\text{m}$  dengan rata-rata sebesar 16,944  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Sedangkan konsentrasi partikel terendah adalah partikel berukuran  $>10 \mu\text{m}$  dengan rata-rata sebesar 10,967  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .



Gambar 5. Konsentrasi Partikulat di Perumahan Atap Genteng

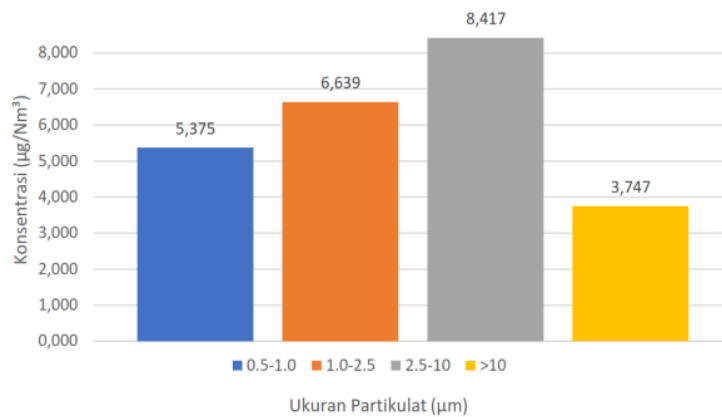
konsentrasi TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, dan PM<sub>1</sub> tertinggi secara berurutan adalah 54,147  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , 45,413  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , 26,340  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , dan 12,772  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Perbandingan jumlah sebaran masing-masing partikulat dapat dilihat pada Gambar 4.6 dimana partikulat pada udara ambien di Perumahan Atap Genteng didominasi oleh TSP dengan persentase sebesar 41% kemudian diikuti oleh PM<sub>10</sub> sebesar 32%, PM<sub>2,5</sub> sebesar 19%, dan PM<sub>1</sub> sebesar 9%. Kondisi persentase sebaran partikulat di Perumahan Atap Genteng sama dengan kondisi di Perumahan Unand Blok D yang artinya pada udara ambien dikedua lokasi terdampak didominasi oleh TSP dan PM<sub>10</sub>.



Gambar 6. Persentase Distribusi Partikulat di Perumahan Atap Genteng

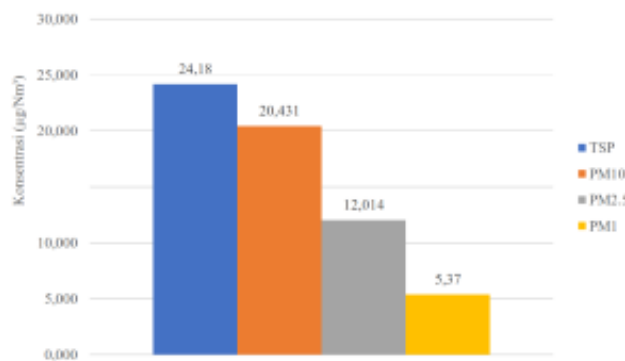
### Konsentrasi Partikulat di Wilayah *Background*

Pengukuran partikulat di Jurusan Teknik Lingkungan dilakukan sebagai daerah *background* atau daerah yang tidak terkena dampak dari pencemaran partikulat akibat pabrik semen. Konsentrasi partikulat di lokasi *background* lebih rendah dari konsentrasi wilayah terdampak. Hal ini dapat dibuktikan dengan konsentrasi tertinggi di lokasi *background* adalah konsentrasi partikel berukuran 2,5-10  $\mu\text{m}$  rata-rata sebesar 8,417  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Sedangkan konsentrasi partikulat terendah adalah partikel berukuran  $>10 \mu\text{m}$  rata-rata sebesar 3,747  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .



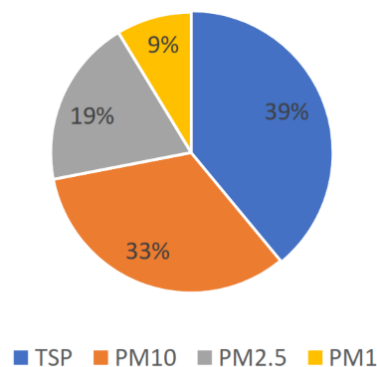
Gambar 7. Konsentrasi Partikulat Berdasarkan Ukuran di Wilayah *Background*

Konsentrasi TSP adalah 24,18 µg/Nm<sup>3</sup>, konsentrasi PM<sub>10</sub> rata-rata pada pengukuran adalah 20,431 µg/Nm<sup>3</sup>, konsentrasi PM<sub>2,5</sub> rata-rata pada penelitian ini adalah 12,014 µg/Nm<sup>3</sup>, sedangkan untuk PM<sub>1</sub> rata-rata adalah 5,37 µg/Nm<sup>3</sup>.



Gambar 8. Konsentrasi Partikulat di Wilayah *Background*

Persentase terbesar berupa TSP sebanyak 39% kemudian PM<sub>10</sub> sebesar 33%, PM<sub>2,5</sub> sebesar 19% dan PM<sub>1</sub> sebesar 9%. Distribusi ukuran partikel di Jurusan Teknik Lingkungan sama dengan daerah terdampak namun dari segi konsentrasi, partikulat di Jurusan Teknik Lingkungan lebih rendah dibanding daerah terdampak.

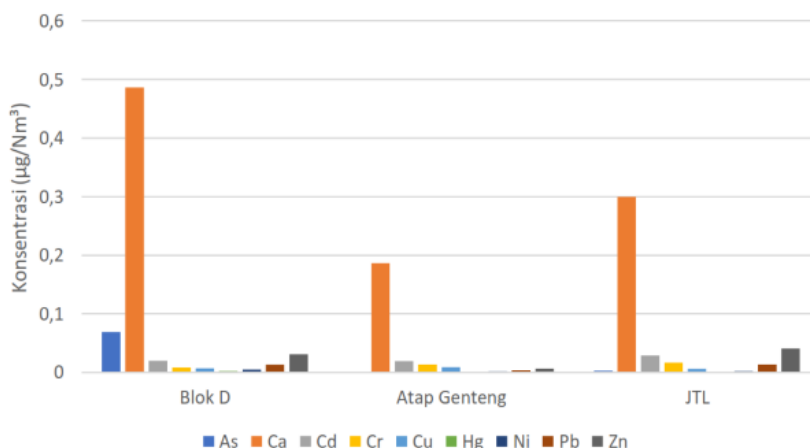


Gambar 9. Persentase Distribusi Partikulat di Wilayah *Background*

### Analisis Konsentrasi Logam dalam Partikulat

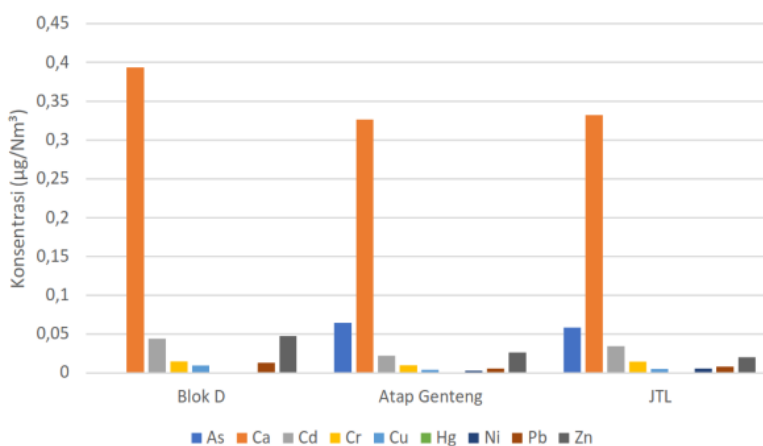
Analisis logam yang terkandung di dalam partikulat diantaranya logam Kalsium (Ca), Cadmium (Cd), Arsen (As), Mercury (Hg), Timbal (Pb), Kromium (Cr), Tembaga (Cu), Zink (Zn), dan Nikel (Ni).

### Konsentrasi Logam dalam TSP Udara Ambien



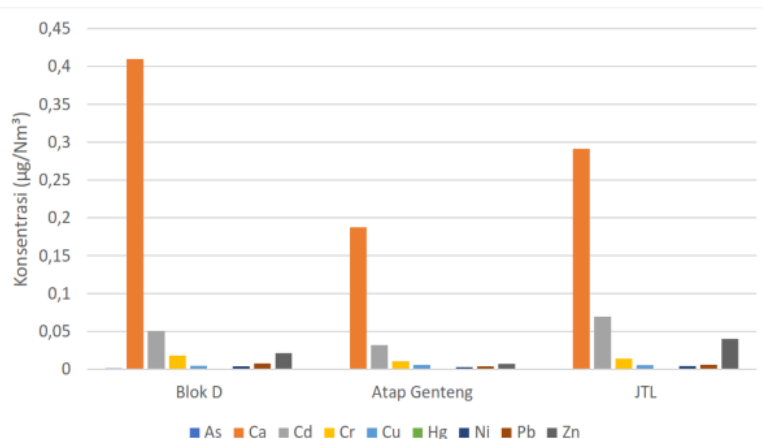
Gambar 10. Konsentrasi Logam dalam TSP di Udara Ambien

Konsentrasi logam paling tinggi di ketiga lokasi penelitian adalah logam Kalsium (Ca) dengan konsentrasi  $0,486 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  di Perumahan Unand Blok D,  $0,186 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  di Perumahan Atap Genteng dan  $0,299 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  di Jurusan Teknik Lingkungan.



Gambar 11. Konsentrasi Logam dalam PM<sub>10</sub> di Udara Ambien

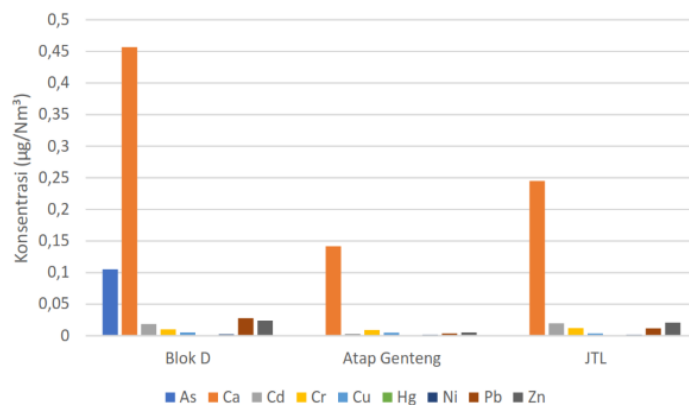
Kandungan logam tertinggi adalah logam Ca untuk ketiga lokasi penelitian, dimana konsentrasi logam Ca untuk Perumahan Unand Blok D adalah  $0,393 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , Perumahan Atap Genteng adalah  $0,326 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan untuk Jurusan Teknik Lingkungan  $0,332 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Berbeda dengan kandungan logam dalam TSP, Logam As pada Perumahan Unand Blok D tidak ditemukan menggunakan ICP MS, begitu juga dengan logam Hg dan Ni. Sedangkan untuk logam yang teridentifikasi kandungannya adalah logam Ca, Cd, Cr, Pb, Zn, dan Cu.



Gambar 12. Konsentrasi Logam dalam PM<sub>2,5</sub> di Udara Ambien

Konsentrasi logam tertinggi adalah logam Ca dengan konsentrasi di Perumahan Unand Blok D sebesar 0,409  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , Perumahan Atap Genteng sebesar 0,187  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  dan Jurusan Teknik Lingkungan sebesar 0,291  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Kandungan logam berat akibat industri semen pada PM<sub>2,5</sub> tidak sebanyak kandungan logam pada PM<sub>10</sub> dan TSP.

Kandungan logam yang tertinggi pada PM<sub>1</sub> di tiga lokasi penelitian adalah logam Ca. Dari semua parameter partikulat, logam Ca lah yang terkandung paling banyak di udara ambien sekitar pabrik semen. Konsentrasi logam Ca di Perumahan Unand Blok D adalah 0,456  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , Perumahan Atap Genteng 0,141  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ , dan Jurusan Teknik Lingkungan sebesar 0,244  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ .



Gambar 13. Konsentrasi Logam dalam PM<sub>1</sub> di Udara Ambien

## KESIMPULAN

Distribusi ukuran partikulat di Perumahan Unand Blok D adalah TSP sebanyak 41% (konsentrasi 60,275  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>10</sub> 33% (konsentrasi 49,234  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>2,5</sub> 18% (konsentrasi 26,776  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), dan PM<sub>1</sub> 8% (konsentrasi 12,53  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ). Untuk Perumahan Atap Genteng distribusi partikulat TSP 41% (konsentrasi 51,585  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>10</sub> 32% (konsentrasi 40,617  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>2,5</sub> 19% (konsentrasi 23,673  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), dan PM<sub>1</sub> 9% (konsentrasi 11,242  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) sedangkan untuk wilayah *background* komposisi partikulat berupa TSP 39% (konsentrasi 24,18  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>10</sub> 33% (konsentrasi 20,431  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), PM<sub>2,5</sub> 19% (konsentrasi 12,014  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ), dan PM<sub>1</sub> 9% (konsentrasi 5,37  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ ) dan jika dibandingkan dengan baku mutu maka seluruh konsentrasi partikulat masih berada di bawah



baku mutu yang ditetapkan. Konsentrasi dan kandungan logam pada partikulat pada ketiga lokasi sampling dari tertinggi sampai terendah adalah Ca, Cd, As, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, dan Hg.

## REFERENSI

- [1] Zhang, S., Worrell, E., Crijns-Graus, W. 2015. Cutting air pollution by improving energy efficiency of China's cement industry. *Energy Procedia* 83, 10–20.
- [2] Saikia, B. K., Ward, C. R., Oliveira, M. L. S., Hower, J. C., De Leao, F., Johnston, M.N., ... Silva, L. F. O. 2015. Geochemistry and nano-mineralogy of feed coals, mine overburden, and coal-derived fly ashes from Assam (North-east India): A multi-faceted analytical approach. *International Journal of Coal Geology*, 137, 19–37. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.11.002>.
- [3] Saikia, B. K., Saikia, J., Rabha, S., Silva, L. F. O., & Finkelman, R. 2017. Ambient nanoparticles/nanominerals and hazardous elements from coal combustion activity: Implications on energy challenges and health hazards. *Geoscience Frontiers*, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.11.013>
- [4] Cheng, Z., Jiang, J., Fajardo, O., Wang, S., Hao, J. 2013. Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011). *Atmos. Environ.* 65,186e194.
- [5] Kim, K.H., Kabir, E., Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ. Int.* 74, 136–143.
- [6] Donaldson, K., Tran, L., Jimenez, L. A., Duffin, R., Newby, D. E., Mills, N., ... Stone, V. 2005. Combustion-derived nanoparticles: A review of their toxicology following inhalation exposure. *Particle and Fibre Toxicology*, 2, 1–14. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-2-10>.
- [7] Huang, D., Xu, J., & Zhang, S. 2012. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta, China. *Environmental Science and Policy*, 15(1), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.09.007>.
- [8] Liang, J. 2013. *Particulate matter. Chemical Modeling for Air Resources*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408135-2.00009-4>.
- [9] Harrison, R. M., Bousiotis, D., Mohorjy, A. M., Alkhalaf, A. K., Shamy, M., Alghamdi, M., Costa, M. 2017. Health risk associated with airborne particulate matter and its components in Jeddah, Saudi Arabia. *Science of the Total Environment*, 590–591, 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.216>.
- [10] Rastogi, S.K., Gupta, B.N., Husain, T., Chandra, H., Mathur, N., Pangtey, B.S., Chandra, S.V., Garg, N. 1991. A cross-sectional study of pulmonary function among workers exposed to multimetals in the glass bangle industry. *Am. J. Ind. Med.* 20, 391e399.
- [11] Kuo, C., Wong, R., Lin, J., Lai, J., Lee, H. 2006. Accumulation of chromium and nickel metals in lung tumors from lung cancer patients in Taiwan. *J. Toxicol. Environ. Health*

---

A 69, 1337e1344.

- [12] Nawrot, T., Plusquin, M., Hogervorst, J., Roels, H.A., Celis, H., Thijs, L., Vangronsveld, J., Van Hecke, E., Staessen, J.A. 2006. Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study. *Lancet Oncol.*7, 119e126.
- [13] Franck, U., Odeh, S., Wiedensohler, A., Wehner, B., Herbarth, O. 2011. The effect of particle size on cardiovascular disorders-The smaller the worse. *Sci. Total Environ.* 409, 4217e4221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.049>.
- [14] Dai, Q., Bi, X., Wu, J., Zhang, Y., Wang, J., Xu, H., Yao, L., Jiao, L., Feng, Y. 2015. Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM10 and PM2.5 in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site. *Aerosol Air Qual. Res.* 15, 875e887.
- [15] Kampa, M., Castanas, E. 2008. Human health effects of air pollution. *Environ. Pollut.* 151, 362e367.
- [16] Hua, S., Tian, H., Wang, K., Zhu, C., Gao, J., Ma, Y., Xue, Y., Wang, Y., Duan, S., Zhou, J. 2016. Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections. *Atmos. Environ.* 128, 1–9.