PENGEMBANGAN SISTEM PENGUKURAN EMISI UDARA JENIS *FINE PARTICLE* SKALA *PORTABLE* UNTUK LABORATORIUM

DEVELOPMENT OF A PORTABLE SCALE FINE PARTICLE AIR EMISSION MEASUREMENT SYSTEM FOR THE LABORATORY

Arif Budianto, Susi Rahayu, Ramadian Ridho Illahi, Lalu Sahrul Hudha, dan Intan Utami
Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, 83115, Indonesia
E-mail: abudianto@unram.ac.id

ABSTRAK

Emisi udara jenis fine particle tergolong partikel submikron yang berukuran sangat kecil dan sangat mudah untuk terhirup. Sistem pengukuran ataupun mitigasi emisi ini tergolong relatif mahal dan kurang portable. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah sistem portable yang relatif murah untuk pengukuran emisi udara jenis fine particle dalam ruang laboratorium. Sistem dirancang dengan sebuah sensor partikulat yang relatif murah namun memiliki performa yang baik. Sensor tersebut dihubungkan dengan sebuah mikrokontroler yang berfungsi memproses sinyal sensor. Sistem diuji di dalam area soldering laboratorium selama satu jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ruang laboratorium, pada area soldering, memiliki konsentrasi fine particle antara 23 sampai dengan 463 µg/m^3. Sistem ini memiliki performa yang baik, ditunjukkan dengan linearitas 99% dan akurasi lebih dari 90%. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa sistem dapat mendeteksi sekaligus mengukur besar konsentrasi emisi udara jenis fine particle skala ruangan dengan rentang 0 – 999 µg/m^3.

Kata kunci: emisi, partikulat, polusi udara, sistem pengukuran

ABSTRACT

Fine particle emission is a submicron particle with a small size and is easy to be inhaled. A measurement system or a mitigation system regarding the fine particle concentration is relatively expensive and not portable. Hence, this study aims to develop a fine particle concentration measurement system for laboratory scale. This system was developed from a low-cost sensor with a good performance. The sensor was connected to a microcontroller to process the signal. The system was tested inside a laboratory, soldering area, for an hour. The results show that the laboratory had 24 to 463 µg/m^3 of fine particle concentrations. The linearity and accuracy levels are 99% and >90%, respectively for linearity and accuracy levels. The results indicate that the system works well in detecting or measuring fine particle concentrations in laboratory scale with the range of 0 – 999 µg/m^3.

Keywords: air pollution, emission, measurement system, particulate

1. PENDAHULUAN

Particulate matter, atau biasa disingkat dengan PM, merupakan campuran antara partikel padatan dan *dropplet* (tetesan air) yang tersuspensi di udara. PM merupakan salah satu jenis emisi, yang juga dikenal sebagai polusi udara jenis partikulat atau *particle pollution* (Budianto, dkk., 2022). Dalam kenyataannya, emisi jenis ini lebih jamak disebut sebagai polusi partikulat, sebagai zat mikroskopis yang mengambang di udara ambien atmosfer. PM dapat mengambang dalam waktu yang cukup lama, bahkan hingga dalam rentang waktu berminggu-minggu (Hadi, dkk., 2021).

Berdasarkan pada disparitas ukurannya, secara umum PM dibagi menjadi $PM_{0,1}$, $PM_{2,5}$, PM_{10}, dan TSP. TSP (*total suspended particle*) merupakan PM dengan ukuran terbesar, dengan diameter lebih dari 10 μm atau dapat juga didefinisikan sebagai gabungan dari keseluruhan PM. PM_{10} atau *coarse particle* memiliki diameter lebih kecil, yakni kurang dari 10 μm (Yang, dkk., 2019; Zhao, dkk., 2019). PM dengan diameter lebih dari 0,1 μm dan kurang dari 2,5 μm dikenal sebagai *fine particle* atau $PM_{2,5}$ (Mertens, dkk., 2020; Piao, dkk., 2020). Adapun PM dengan ukuran terkecil disebut sebagai *ultrafine particle* ($PM_{0,1}$), dengan diameter kurang dari atau sama dengan 0,1 μm, bahkan dapat berukuran hingga kurang dari 0,01 μm (Fujitani, dkk., 2020).

Sumber dari PM sangatlah beragam, baik secara alami maupun buatan manusia, baik secara primer maupun sekunder. Beberapa fragmen dari PM dapat terlepas dari sumber tertentu dan kemudian mengambang di ambien secara langsung. Beberapa jenis lainnya dapat terbentuk dengan serangkaian reaksi kimia yang cukup rumit di udara ambien. Contoh dari sumber alami PM adalah aktivitas vulkanik gunung berapi (Butwin, dkk., 2019; Wardoyo, dkk., 2020). Reaksi pembakaran merupakan salah satu contoh lain sumber dari PM. Aktivitas transportasi bermesin dan berbahan bakar fosil, pembangkit listrik, pembakaran hutan dan lahan pertanian, proses pembakaran pada industri, pembakaran kayu, percetakan, dan beberapa aktivitas mekanis merupakan sumber PM yang berasal dari manusia.

PM terbukti berkontribusi terhadap penurunan kualitas kesehatan. Beberapa penelitian terbarukan membuktikan keberadaan korelasi positif antara paparan PM dengan konsentrasi tertentu dan deformasi sel. Sebagai contoh, $PM_{2,5}$ dapat dikaitkan dengan stres oksidatif di paru-paru dan kerusakan DNA (deoksiribonukleat) (Li, dkk., 2020; Lui, dkk., 2019). Paparan berlebih *fine particle* dapat mengakibatkan deformasi sel eritrosit atau sel darah merah, dengan menggunakan hewan coba berupa mencit. Deformasi yang berhasil diamati akibat deposisi fine particle di sel darah merah meliputi *sickle cell*, *teardrop-shaped cell*, dan lainnya (Hadi, dkk., 2022).

Uraian di atas telah menunjukkan posisi dari *fine particle* dan dampaknya bagi kesehatan. Oleh sebab itu, diperlukan sebuah sistem pengukuran emisi udara jenis ini yang bersifat *portable* dan murah (*low-cost*). Hal ini melatarbelakangi penelitian ini, dengan fokus pengembangan sistem pengukuran konsentrasi emisi udara jenis *fine particle* untuk skala udara ruangan (area soldering laboratorium) dengan berbasis sensor partikulat debu *low-cost*.

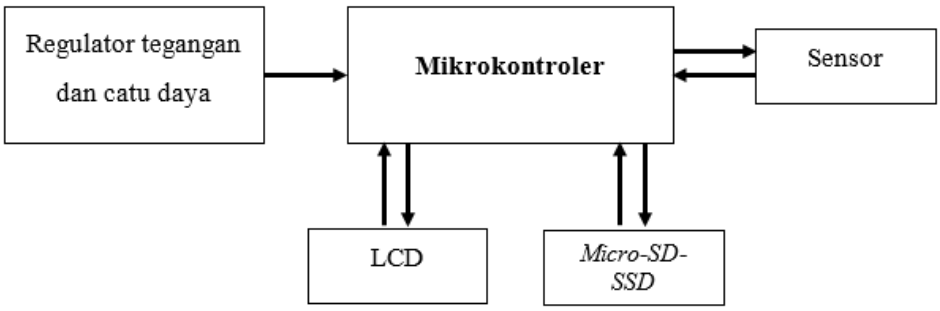
2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Instrumentasi (Fisika Lanjut), Program Studi Fisika, Universitas Mataram. Secara spesifik, keseluruhan pengujian dilakukan di dalam ruangan tertutup

(temperatur terkontrol, 26 ºC -27ºC, dengan kelembaban udara relatif ±68%). Ruang pengujian merupakan area *soldering* atau lokasi khusus proses *soldering* komponen elektronika.

2.2. Sistem Pengukuran



Gambar 1. Desain sistem pengukuran konsentrasi emisi $PM_{2.5}$ skala ruangan.

Sistem pengukuran konsentrasi emisi $PM_{2.5}$ dikembangkan menggunakan sebuah mikrokontroler jenis Arduino UNO yang dilengkapi dengan sistem komunikasi serial dan *Inter Integrated Circuit*. Mikrokontroler ini dihubungkan dengan sumber tegangan searah sebesar 12 Volt (DC, *direct current*) melalui sebuah adaptor. Mikrokontroler ini digunakan untuk memproses sinyal keluaran sensor partikulat tipe ZH03a *dust sensor* (Winsen). Sensor tersebut digunakan sebagai elemen *sensing* untuk mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$ secara *real-time.* Aplikasi Arduino IDE digunakan untuk memprogram mikrokontroler via komunikasi digital. 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) berukuran 16x2 (Budianto, dkk., 2022).

2.3. Pengujian Sistem

Sistem yang telah dirancang kemudian diuji dengan empat variasi kecepatan hisap (v) menggunakan Anemomaster (Kanomax) (Hadi, dkk., 2021). Variasi tersebut yakni V1 (2 m/s), V2 (1,5 m/s), V3 (1 m/s), dan V4 (0,5 m/s). Adapun variabel kontrol yang digunakan adalah V1 (0 m/s) yang dilakukan dengan mematikan pompa hisap. Pada variasi V1, alat dipasang di tengah ruangan. Selanjutnya, alat dinyalakan untuk mengukur konsentrasi $PM_{2.5}$ di dalam ruang pengujian. Pada saat pengujian, solder dinyalakan tepat 1 meter (dengan temperatur terkontrol 420ºC, panjang timah sebesar 2 meter) di depan sistem sebagai sumber emisi. Selama pengujian berlangsung, ruangan dikontrol sehingga tidak terdapat aktivitas lain ataupun sumber emisi lainnya. Pengujian dilakukan selama 60 menit dengan interval pengambilan data setiap 5 menit. Keseluruhan langkah ini diterapkan untuk seluruh variasi kecepatan hisap.

2.4. Analisis Data

Keseluruhan data ditampilkan dalam bentuk nilai rata-rata (*mean*) ± standar deviasi. Nilai akurasi (%A) diperoleh dari komparasi hasil pengukuran alat dengan nilai referensi alat komparator yang terkalibrasi. Nilai linearitas (R^2) diperoleh berdasarkan persamaan korelasi persamaan linear antara waktu pengukuran dengan konsentrasi yang terbaca. Adapun *range* dan *span* hasil pengukuran diperoleh berdasarkan pada hasil pembacaan minimal dan maksimal konsentrasi $PM_{2.5}$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengukuran Laju Pompa Hisap

Tabel 1. Data Pengujian Laju atau Kecepatan Hisap Pompa untuk Keseluruhan Variasi

Variasi Laju Hisap	Nilai Skala (m/s)	Hasil Pengujian (m/s)
V1	2	1,98
V2	1,5	1,48
V3	1	0,99
V4	0,5	0,47

Pengaturan laju hisap pompa (v) dilakukan dengan menggunakan piranti Anemomaster untuk memastikan skala kecepatan yang digunakan pada pompa dengan hasil penilaian atau pembacaan. Nilai tersebut ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 menunjukkan bahwa skala penuh pada pompa benar menghasilkan laju hisap sebesar 1,98 m/s. Hal ini berarti V1 memiliki nilai terbesar (±2 m/s). Nilai terkecil dihasilkan pada variasi laju V4, dengan nilai 0,47 m/s, yang mendekati nilai skala (0,5 m/s). Hasil ini kemudian dapat digunakan untuk memastikan kecepatan yang digunakan di dalam menghisap emisi udara jenis *fine particle* (tingkat akurasi >90%).

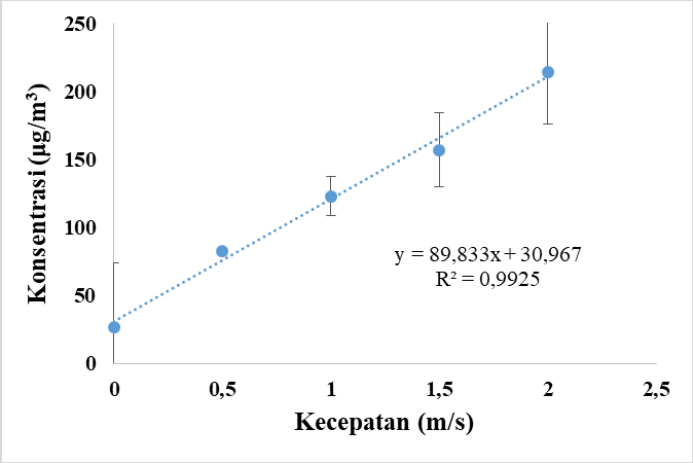
3.2 Pengukuran Konsentrasi

Data pada **Tabel 2** menunjukkan hasil pengukuran konsentrasi emisi *fine particle* selama 1 jam (60 menit). Data tersebut diperoleh dengan waktu respon 1 s, untuk interval 5 menit. Data hasil pengukuran secara langsung, yakni dengan udara di area soldering, hasil tersebut di atas menunjukkan bahwa konsentrasi terendah sebesar 23 μg/m^3 sangat jauh berbeda dengan 463 μg/m^3 yang sama-sama diperoleh pada menit terakhir pengujian (menit ke-60). Dengan kata lain, penggunaan kecepatan V1 atau varian tercepat (2 m/s) menghasilkan pembacaan terbesar jika dibandingkan dengan V2, V3, dan V4. Hasil ini menunjukkan adanya indikasi hubungan antara kecepatan hisap dengan hasil pembacaan pengukuran konsentrasi.

Tabel 2. Data Pengukuran Konsentrasi *Fine Particle* untuk Satu Jam (60 Menit) Non Stop

Waktu (menit)	Rata-rata Konsentrasi $PM_{2.5}$ (μg/m^3)				
	V1	V2	V3	V4	V0
5	42	23	23	23	29
10	74	36	28	24	28
15	81	45	48	26	26
20	86	57	56	28	24
25	92	88	67	59	27
30	103	92	79	88	28
35	176	112	92	95	29
40	228	156	131	101	30
45	347	204	180	113	23
50	422	296	209	136	25

Waktu (menit)	Rata-rata Konsentrasi $PM_{2.5}$ (µg/m^3)				
	V1	V2	V3	V4	V0
55	457	375	257	148	26
60	463	402	306	151	28



Gambar 2. Analisis linearitas hubungan antara kecepatan hisap dengan hasil pengukuran konsentrasi *fine particle* (R^2 = 0,9925).

Gambar 2 menunjukkan hasil analisis korelasi linear performa sistem. Hasil yang dimiliki relatif sangat baik, yakni mendekati 1. Kurva tersebut menunjukkan bahwa kecepatan hisap berkorelasi linear positif dengan kemampuan mendeteksi dan mengukur konsentrasi emisi udara jenis *fine particle*.

Hasil ini sesuai dengan teori, di mana dengan luas penampang (A) lubang (sensor) yang tetap, serta dengan waktu sampling (t) yang konsisten tetap, maka laju alir udara (v) sebanding dengan volume udara (V). Dalam hal ini, dengan pengukuran yang konstan selama 60 menit, maka volume udara yang melewati sensor jauh lebih besar pada saat menggunakan kecepatan hisap yang lebih besar. Secara fisis, terdapat prinsip kesetaraan debit aliran udara (Q), seperti pada Pers. (1).

$$A \,.\, v = \frac{V}{t} \qquad (1)$$

Sebagaimana pada persamaan tersebut, maka kecepatan secara signifikan sebanding dengan volume (dalam satuan m^3). Hal ini berarti semakin besar laju hisap udara yang digunakan pada pompa, maka semakin banyak pula massa *fine particle* (m, dalam satuan µg) yang melewati sensor. Hasilnya, tingkat pembacaan pengukuran konsentrasi semakin besar pada laju atau kecepatan hisap pompa terbesar.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menghasilkan sebuah sistem pengukuran konsentrasi *fine particle* atau $PM_{2.5}$ skala ruangan yang bersifat *portable*. Sistem yang dikembangkan dengan sensor *low-cost* ini menunjukkan bahwa ruang laboratorium, pada area *soldering*, memiliki konsentrasi *fine particle* antara 23 sampai dengan 463 µg/m^3. Sistem ini memiliki kinerja linearitas sebesar 99% dengan tingkat akurasi lebih

dari 90%. Sistem yang dikembangkan dapat mendeteksi sekaligus mengukur besar konsentrasi emisi udara jenis *fine particle* skala ruangan dengan rentang 0 – 999 μg/m^3.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini mendapatkan pendanaan DIPA BLU Universitas Mataram dengan Nomor Kontrak 2458/UN18.L1/PP/2023.

DAFTAR PUSTAKA

Budianto, A., A.Y.P. Wardoyo, Masruroh, and H.A. Dharmawan (2022). An Airborne Fungal Spore Mass Measurement System Based on Graphene Oxide Coated QCM. *Polish Journal of Environmental Studies*, *31(4)*, 1–7.

Butwin, M.K., S.V. Lowis, M.A. Pfeffer, and T. Thorsteinsson (2019). The Effects of Volcanic Eruptions on the Frequency of Particulate Matter Suspension Events in Iceland. *Journal of Aerosol Science*, *128*, 99–113.

Fujitani, Y. K. Takahashi, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, and S. Kobayashi. (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.

Hadi, K.A., A.Y.P. Wardoyo, A. Naba, U.P. Juswono, and A. Budianto (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*.

Hadi, K.A., A.Y.P. Wardoyo, U.P. Juswono, A. Naba, A. Budianto, and E.T.P. Adi (2022). "A Study of Erythrocyte Deformation Level Related to Biomass Burning Emission Exposures Using Artificial Neural Networks. *Polish Journal of Environmental Studies 31(6)*, 5037–46.

Li, J., Y. Hu, L. Liu, Q. Wang, J. Zeng, and C. Chen (2020). $PM_{2.5}$ Exposure Perturbs Lung Microbiome and Its Metabolic Profile in Mice. *Science of the Total Environment 721*, 137432.

Lui, K.H., T. Jones, K. BéruBé, S.S.H. Ho, S.H.L. Yim, J.J Cao, S.C. Lee, L. Tian, D.W. Min, and K.F. Ho (2019). The Effects of Particle-Induced Oxidative Damage from Exposure to Airborne Fine Particulate Matter Components in the Vicinity of Landfill Sites on Hong Kong. *Chemosphere 230*, 78–86.

Mertens, J., H. Lepaumier, P. Rogiers, D. Desagher, L. Goossens, A. Duterque, E. Le Cadre, M. Zarea, J. Blondeau, and M. Webber (2020). Fine and Ultrafine Particle Number and Size Measurements from Industrial Combustion Processes: Primary Emissions Field Data. *Atmospheric Pollution Research 11(4)*:, 803–14.

Piao, Z., J.K. Yoo, B.W. Park, S.B. Seo, S.J. Park, H.Y. Jeon, M.M. Rahman, N. Kim, and S. Kim (2020). Therapeutic Effects of Shibashin Misena® against Fine-Dust-Induced Pulmonary Disorders in Mice. *Biomedicine and Pharmacotherapy 125(January)*, 110018.

Wardoyo, A.Y.P., J.A.E. Noor, G. Elbers, S. Schmitz, S.T. Flaig, and A. Budianto (2020). Characterizing Volcanic Ash Elements from the 2015 Eruptions of Bromo and Raung Volcanoes, Indonesia. *Polish Journal of Environmental Studies 29(2)*, 1899–1907.

Yang, D., H. Zhang, and J. Li (2019). Changes in Concentrations of Fine and Coarse Particles under the CO_2-Induced Global Warming. *Atmospheric Research 230(August)*, 104637.

Zhao, C.N., Z. Xu, G.C. Wu, Y.M. Mao, L.N. Liu, Q. Wu, Y.L. Dan, S.S. Tao, Q. Zhang, N.B. Sam, Y.G. Fan, Y.F. Zou, D.Q. Ye, and H.F. Pan (2019). Emerging Role of Air Pollution in Autoimmune Diseases. *Autoimmunity Reviews 18(6)*, 607–14.