

9899-edited.pdf

WORD COUNT

3736

TIME SUBMITTED

14-MAY-2026 08:09AM

PAPER ID

121598478

Perancangan Sensor Berbasis Laser dengan Metode Hamburan Cahaya untuk Deteksi Debu Halus

4Aldila Puspitaningrum^{1*)}, Hanifa Shofia Balqis²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Balitar, Jalan Majapahit No. 2-4 Sananwetan, Kota Blitar, Indonesia

*Penulis Korespondensi, e-mail: aldila.puspitaningrum@gmail.com

Received: 26/03/2026

Revised: 03/05/2023

Accepted: 14/05/2026

ABSTRAK

Pencemaran udara akibat debu halus menjadi permasalahan serius karena berdampak pada kesehatan manusia. Metode konvensional seperti filter gravimetri memiliki keterbatasan dalam hal waktu dan tidak mampu memberikan data secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sensor polusi udara berbasis laser menggunakan prinsip hamburan cahaya untuk mendeteksi konsentrasi debu halus. Sistem sensor terdiri dari diode laser, ruang uji, fotodetektor, dan voltmeter. Pengujian dilakukan pada variasi konsentrasi debu 1–10 g/m³. Hasil menunjukkan adanya hubungan linier antara konsentrasi debu dan intensitas cahaya dengan koefisien determinasi sebesar 0,9713. Sensor memiliki sensitivitas yang baik pada konsentrasi rendah hingga menengah, namun mengalami kecenderungan saturasi pada konsentrasi tinggi akibat fenomena multiple scattering. Rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 6,65%, yang menunjukkan tingkat akurasi cukup baik. Penelitian ini membuktikan bahwa sensor berbasis laser scattering efektif untuk pemantauan kualitas udara secara cepat dan real-time, meskipun masih memerlukan kalibrasi lanjutan untuk meningkatkan akurasi pada konsentrasi rendah.

Kata Kunci: Pencemaran Udara, Sensor Optik, Hamburan Cahaya, Debu Halus

ABSTRACT

13
Air pollution caused by fine particulate matter has become a serious environmental issue due to its adverse effects on human health. Conventional measurement methods, such as gravimetric filter techniques, are time-consuming and unable to provide real-time data. This study aims to design and evaluate a laser-based air pollution sensor utilizing the light scattering principle to detect fine dust concentration. The sensor system consists of a laser diode, a test chamber, a photodetector, and a voltmeter. Experiments were conducted with dust concentrations ranging from 1 to 10 g/m³. The results demonstrate a linear relationship between dust concentration and scattered light intensity, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9713. The sensor exhibits good sensitivity at low to medium concentrations but shows saturation behavior at higher concentrations due to multiple scattering effects. The average measurement error was found to be 6.65%, indicating acceptable accuracy. These findings suggest that laser scattering-based sensors are effective for rapid and real-time air quality monitoring, although further calibration is required to improve accuracy at low concentration levels.

Keywords: Air Pollution, Optical Sensor, Light Scattering, Particulate matter

5 1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang semakin meningkat, terutama di wilayah perkotaan dan kawasan industri. Salah satu parameter penting dalam kualitas udara adalah konsentrasi debu halus [1]. Debu halus ini berbahaya karena dapat masuk ke dalam sistem pernapasan manusia [2] dan menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, seperti penyakit paru-paru dan kardiovaskular[3], [4], [5].

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



Metode konvensional dalam pengukuran debu halus umumnya menggunakan filter gravimetri yang membutuhkan waktu lama dan tidak dapat memberikan data secara real-time [6]. Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif yang mampu melakukan pemantauan secara cepat, akurat, dan kontinu. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penggunaan sensor berbasis laser dengan prinsip hamburan cahaya.

Hamburan cahaya (*light scattering*) adalah fenomena fisika ketika gelombang cahaya berinteraksi dengan partikel atau ketidakseragaman dalam suatu medium sehingga arah rambat cahaya berubah dan sebagian energinya tersebar ke berbagai arah. Intensitas dan pola hamburan cahaya sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, panjang gelombang cahaya, serta sifat optik (indeks bias) partikel tersebut [7]. Prinsip ini banyak digunakan dalam pengukuran partikel karena intensitas cahaya yang dihamburkan berbanding dengan jumlah dan ukuran partikel dalam medium [8]. Dengan demikian, hamburan cahaya menjadi dasar penting dalam teknologi sensor optik, termasuk untuk mendeteksi konsentrasi debu halus di udara.

Sensor berbasis laser memiliki keunggulan dalam hal sensitivitas tinggi, respon cepat, serta kemampuan deteksi partikel dalam konsentrasi rendah [9], [10]. Ketika partikel debu melewati berkas laser, cahaya akan dihamburkan dengan intensitas tertentu yang bergantung pada ukuran dan jumlah partikel. Dengan mengukur intensitas hamburan tersebut, konsentrasi debu halus dapat ditentukan.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji kinerja sensor polusi udara berbasis laser dalam mendeteksi debu halus. Parameter yang dianalisis meliputi sensitivitas, linearitas, batas deteksi, serta waktu respons sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem monitoring kualitas udara yang lebih efisien dan real-time.

8

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sensor polusi udara berbasis laser dalam mendeteksi konsentrasi debu halus. Sistem sensor yang dikembangkan bekerja berdasarkan prinsip hamburan cahaya (*light scattering*), yaitu ketika partikel debu melewati lintasan berkas laser, sebagian cahaya akan dihamburkan ke arah tertentu dan ditangkap oleh fotodetektor. Besarnya intensitas cahaya hamburan yang diterima fotodetektor kemudian dikonversi menjadi sinyal tegangan yang dapat dibaca menggunakan voltmeter.

Sistem sensor terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu diode laser sebagai sumber cahaya, ruang uji sebagai tempat pengendalian konsentrasi debu, fotodetektor sebagai penerima cahaya hamburan, dan voltmeter sebagai alat ukur tegangan keluaran sensor. Diode laser diarahkan melewati ruang uji secara horizontal, sedangkan fotodetektor ditempatkan tegak lurus terhadap arah berkas laser untuk menangkap cahaya hasil hamburan dari partikel debu. Posisi ini dipilih agar fotodetektor tidak menerima cahaya langsung dari laser, melainkan hanya cahaya yang dihamburkan oleh partikel di dalam ruang uji.

Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi konsentrasi debu halus sebesar 1–10 g/m³ di dalam ruang uji. Variasi konsentrasi tersebut digunakan untuk mengetahui respons sensor terhadap perubahan jumlah partikel debu. Setiap konsentrasi diuji dengan cara memasukkan debu halus ke dalam ruang uji secara bertahap, kemudian berkas laser ditembakkan melewati ruang tersebut. Intensitas cahaya hamburan yang diterima oleh fotodetektor diamati dalam bentuk tegangan keluaran dengan satuan milivolt (mV). Data hasil pengukuran kemudian dicatat untuk dianalisis lebih lanjut.

Untuk menjaga konsistensi pengujian, ruang uji dibuat tertutup agar pengaruh cahaya luar dapat diminimalkan. Selain itu, posisi diode laser dan fotodetektor dijaga tetap selama pengujian agar sudut hamburan tidak berubah. Hal ini penting karena perubahan posisi optik dapat memengaruhi besarnya intensitas cahaya yang diterima oleh fotodetektor. Dengan demikian, perubahan tegangan keluaran diharapkan lebih dominan disebabkan oleh perubahan konsentrasi debu, bukan oleh perubahan konfigurasi alat.

Data intensitas hamburan yang diperoleh dianalisis menggunakan metode regresi linier untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi debu dan sinyal keluaran sensor. Persamaan regresi linier digunakan sebagai model kalibrasi awal sensor. Hubungan antara konsentrasi debu dan intensitas cahaya hamburan dinyatakan dalam bentuk:



$$y = ax + b$$

dengan y merupakan tegangan keluaran fotodetektor dalam mV, xxx merupakan konsentrasi debu dalam g/m^3 , aaa merupakan sensitivitas sensor, dan bbb merupakan nilai tegangan awal atau offset sensor. Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi tingkat linearitas hubungan antara konsentrasi debu dan tegangan keluaran.

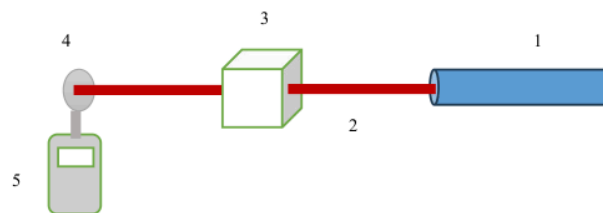
Parameter kinerja sensor yang dievaluasi meliputi sensitivitas, linearitas, dan tingkat kesalahan pengukuran. Sensitivitas sensor diperoleh dari nilai gradien persamaan regresi linier, yang menunjukkan besarnya perubahan tegangan keluaran terhadap setiap kenaikan konsentrasi debu. Linearitas dievaluasi menggunakan nilai koefisien determinasi (R^2). Semakin mendekati nilai 1, maka hubungan antara konsentrasi debu dan tegangan keluaran sensor semakin linier.

Tingkat kesalahan pengukuran dihitung dengan membandingkan nilai hasil eksperimen terhadap nilai hasil prediksi model regresi linier. Perhitungan error dilakukan untuk mengetahui besarnya deviasi data pengukuran terhadap model kalibrasi. Persamaan error yang digunakan adalah:

$$Error(\%) = \left| \frac{Y_{eksperimen} - Y_{model}}{Y_{model}} \right| \times 100\%$$

Selain itu, pengamatan terhadap pola respons sensor juga dilakukan untuk mengetahui adanya kecenderungan saturasi pada konsentrasi tinggi. Saturasi dapat terjadi ketika jumlah partikel debu terlalu banyak sehingga cahaya mengalami hamburan berulang (multiple scattering) sebelum mencapai fotodetektor. Kondisi ini dapat menyebabkan kenaikan sinyal tidak lagi sebanding dengan peningkatan konsentrasi debu. Oleh karena itu, analisis respons sensor pada seluruh rentang konsentrasi diperlukan untuk menentukan rentang kerja efektif sensor.

Melalui tahapan penelitian ini, diperoleh karakteristik dasar sensor polusi udara berbasis laser scattering, meliputi hubungan antara konsentrasi debu dan tegangan keluaran, sensitivitas sensor, linearitas, serta tingkat kesalahan pengukuran. Hasil analisis tersebut digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sistem sebagai sensor pendeteksi debu halus secara cepat dan real-time.



Gambar 1: Set up sensor polusi udara berbasis laser untuk deteksi debu halus

Gambar 1 menunjukkan *set up* percobaan sensor polusi udara berbasis laser untuk deteksi debu halus. Nomor 1 menunjukkan laser diode yang digunakan dalam percobaan dengan spesifikasi laser diode merah dengan Panjang gelombang 630 – 650 nm dengan tegangan 2-3 volt dan arus 20-40 mA. Nomor 2 menunjukkan berkas Cahaya laser yang keluar dari laser diode, memiliki diameter berkas Cahaya laser sekitar 1-5 mm. Nomor 3 menunjukkan ruang uji tertutup yang digunakan untuk penelitian. Dalam ruang tersebut akan dimasukkan variasi debu halus untuk diuji variasi hamburan berkas cahaya laser yang dihasilkan. Nomor 4 menunjukkan *opto detector* yang digunakan untuk menangkap berkas cahaya laser yang diintegrasikan ke voltmeter untuk menunjukkan nilai berkas cahaya laser dalam bentuk tegangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sensor dilakukan dengan menembakkan berkas cahaya laser melewati ruang uji yang telah diberi partikel debu halus dengan variasi konsentrasi 1–10 g/m^3 . Fotodetektor diposisikan tegak lurus terhadap arah berkas laser untuk menangkap cahaya yang dihamburkan oleh partikel debu. Prinsip



pengujian ini didasarkan pada fenomena hamburan cahaya, yaitu semakin banyak partikel debu yang berada pada lintasan laser, maka semakin besar intensitas cahaya hamburan yang dapat diterima oleh fotodetektor. Keluaran fotodetektor kemudian diamati dalam bentuk tegangan menggunakan voltmeter dengan satuan milivolt (mV). Hasil pengukuran konsentrasi debu terhadap intensitas cahaya laser yang terdeteksi ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I: Hasil Pengukuran konsentrasi debu vs intensitas cahaya laser yang terdeteksi pada voltmeter

Konsentrasi Debu (g/m^3)	Intensitas (mV)
1	120
2	185
3	250
4	310
5	370
6	420
7	460
8	495
9	520
10	540

Berdasarkan Tabel I, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi debu di dalam ruang uji menyebabkan kenaikan intensitas cahaya yang terdeteksi oleh fotodetektor. Pada konsentrasi 1 g/m^3 , intensitas yang terukur sebesar 120 mV, sedangkan pada konsentrasi 10 g/m^3 meningkat menjadi 540 mV. Hal ini menunjukkan bahwa sensor mampu merespons perubahan jumlah partikel debu dengan menghasilkan perubahan tegangan keluaran yang cukup jelas.

Kenaikan intensitas cahaya relatif besar pada rentang konsentrasi rendah hingga menengah, khususnya dari 1 hingga 6 g/m^3 . Pada rentang ini, peningkatan konsentrasi debu masih menghasilkan kenaikan tegangan yang hampir proporsional. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang baik terhadap perubahan konsentrasi debu pada rentang tersebut. Dengan demikian, sistem sensor berbasis laser scattering dapat digunakan untuk membedakan variasi konsentrasi debu secara cukup jelas.

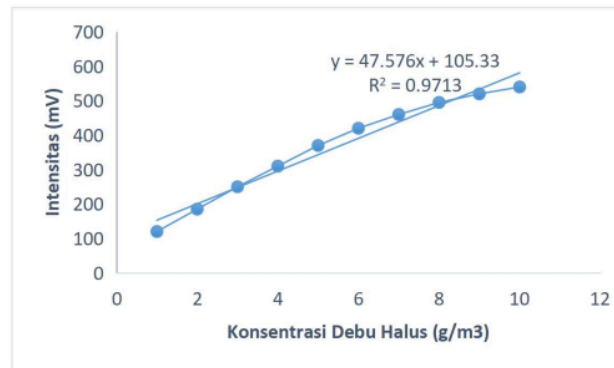
Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, yaitu mulai dari 7 hingga 10 g/m^3 , kenaikan intensitas cenderung lebih kecil dibandingkan rentang sebelumnya. Sebagai contoh, peningkatan konsentrasi dari 9 menjadi 10 g/m^3 hanya menghasilkan kenaikan intensitas dari 520 mV menjadi 540 mV. Kondisi ini menunjukkan adanya kecenderungan penurunan linearitas sensor pada konsentrasi tinggi. Fenomena tersebut dapat disebabkan oleh efek multiple scattering, yaitu hamburan cahaya berulang antarpartikel debu, serta kemungkinan sebagian cahaya laser mengalami penyerapan sebelum mencapai fotodetektor.

Secara umum, data pada Tabel I menunjukkan bahwa sistem sensor mampu mendeteksi perubahan konsentrasi debu berdasarkan perubahan intensitas cahaya hamburan. Pola kenaikan intensitas terhadap konsentrasi debu juga menunjukkan bahwa prinsip laser scattering dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sensor polusi udara sederhana. Meskipun demikian, karakteristik respon yang mulai melandai pada konsentrasi tinggi menunjukkan bahwa sistem masih memerlukan proses kalibrasi lanjutan agar akurasi pengukuran dapat dipertahankan pada rentang konsentrasi yang lebih luas.

Data hasil percobaan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi debu dalam ruang uji dari 1 hingga 10 g/m^3 berbanding lurus dengan kenaikan intensitas cahaya yang terdeteksi oleh fotodetektor. Hubungan ini menunjukkan bahwa sistem sensor berbasis laser scattering mampu merespons perubahan jumlah partikel debu di dalam ruang uji. Semakin tinggi konsentrasi debu, semakin besar jumlah



partikel yang berada pada lintasan berkas laser, sehingga intensitas cahaya hamburan yang diterima oleh fotodetektor juga meningkat.



11
Gambar 2.: Hasil Analisis Regresi Linier

Dari hasil analisis regresi linier diperoleh persamaan hubungan antara konsentrasi debu halus dan intensitas cahaya laser sebagai berikut:

$$y = 47,576x + 105,33$$

dengan koefisien determinasi sebesar:

$$R^2 = 0,9713$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa setiap kenaikan konsentrasi debu sebesar 1 g/m³ menghasilkan peningkatan intensitas cahaya terdeteksi sebesar sekitar 47,576 mV. Nilai gradien pada persamaan regresi ini dapat diinterpretasikan sebagai sensitivitas sensor terhadap perubahan konsentrasi debu. Dengan demikian, sensor memiliki sensitivitas sebesar 47,576 mV/(g/m³). Nilai ini menunjukkan bahwa fotodetektor mampu memberikan perubahan sinyal keluaran yang cukup jelas terhadap perubahan konsentrasi partikel di dalam ruang uji.

10
Nilai koefisien determinasi sebesar 0,9713 menunjukkan bahwa 97,13% variasi intensitas cahaya yang terdeteksi dapat dijelaskan oleh perubahan konsentrasi debu. Hal ini mengindikasikan adanya hubungan linier yang kuat antara konsentrasi debu dan sinyal keluaran sensor. Dengan nilai R² yang mendekati 1, model regresi linier dapat digunakan sebagai pendekatan awal untuk proses kalibrasi sensor. Namun demikian, masih terdapat sekitar 2,87% variasi data yang tidak dijelaskan oleh model linier, yang kemungkinan disebabkan oleh noise sensor, ketidakteraturan distribusi debu, fluktuasi intensitas laser, serta pengaruh cahaya lingkungan.

Pada rentang konsentrasi rendah hingga menengah, yaitu sekitar 1–5 g/m³, hubungan antara konsentrasi debu dan intensitas cahaya cenderung linier. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki respons yang proporsional terhadap perubahan jumlah partikel. Pada rentang tersebut, partikel debu masih relatif tersebar sehingga cahaya laser yang mengenai partikel dapat dihamburkan menuju fotodetektor tanpa mengalami hamburan berulang yang signifikan. Oleh karena itu, sensor menunjukkan sensitivitas yang baik dan dapat membedakan perubahan konsentrasi debu secara lebih jelas.

Fenomena tersebut sesuai dengan prinsip dasar hamburan cahaya, yaitu ketika partikel berada dalam lintasan cahaya laser, sebagian cahaya akan dihamburkan ke berbagai arah. Fotodetektor yang ditempatkan pada posisi tertentu akan menangkap sebagian dari cahaya hamburan tersebut. Semakin banyak partikel debu yang berada dalam lintasan laser, semakin besar pula intensitas cahaya hamburan yang diterima oleh



fotodetektor. Dengan demikian, keluaran fotodetektor dapat digunakan sebagai indikator tidak langsung terhadap konsentrasi debu dalam ruang uji.

Namun, pada konsentrasi yang lebih tinggi, khususnya di atas 6 g/m^3 , peningkatan intensitas cahaya tidak lagi menunjukkan kenaikan yang sebanding dengan peningkatan konsentrasi debu. Kurva respon mulai mengalami kecenderungan melandai. Kondisi ini menunjukkan adanya penurunan linearitas sensor pada konsentrasi tinggi. Salah satu penyebab utama fenomena ini adalah terjadinya multiple scattering, yaitu proses hamburan berulang ketika cahaya laser mengalami interaksi dengan lebih dari satu partikel sebelum mencapai detektor.

Pada kondisi konsentrasi debu yang tinggi, jarak antarpartikel menjadi lebih rapat sehingga cahaya yang telah dihamburkan oleh satu partikel dapat kembali dihamburkan oleh partikel lain. Akibatnya, arah rambat cahaya menjadi lebih acak dan tidak seluruh cahaya hamburan dapat diterima secara efektif oleh fotodetektor. Selain itu, sebagian energi cahaya juga dapat mengalami absorpsi oleh partikel debu, sehingga intensitas cahaya yang sampai ke detektor menjadi berkurang. Kondisi tersebut menyebabkan penambahan konsentrasi debu tidak selalu menghasilkan peningkatan sinyal keluaran yang proporsional.

Gejala melandainya respon sensor pada konsentrasi tinggi menunjukkan bahwa sistem mulai mengalami kecenderungan saturasi. Saturasi ini menjadi batas penting dalam karakterisasi sensor karena menunjukkan bahwa sensor memiliki rentang kerja efektif tertentu. Berdasarkan hasil pengujian, sensor menunjukkan performa terbaik pada rentang konsentrasi rendah hingga menengah. Pada rentang konsentrasi tinggi, hasil pembacaan masih dapat digunakan sebagai indikasi peningkatan konsentrasi debu, tetapi tingkat akurasi cenderung menurun sehingga diperlukan proses kalibrasi lanjutan.

Berdasarkan Tabel II, rata-rata error pengukuran sensor diperoleh sebesar 6,65%. Nilai error terbesar terjadi pada konsentrasi 1 g/m^3 , yaitu sebesar 21,52%. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah, sinyal hamburan cahaya yang diterima fotodetektor masih relatif kecil sehingga lebih mudah dipengaruhi oleh noise, fluktuasi cahaya laser, serta ketidakseragaman distribusi partikel debu di dalam ruang uji.

TABEL II : HASIL PERHITUNGAN ERROR PENGUKURAN SENSOR

Konsentrasi Debu (g/m^3)	Intensitas Eksperimen (mV)	Intensitas Model (mV)	Error (%)
1	120	152,91	21,52
2	185	200,48	7,72
3	250	248,06	0,78
4	310	295,63	4,86
5	370	343,21	7,81
6	420	390,79	7,48
7	460	438,36	4,94
8	495	485,94	1,86
9	520	533,51	2,53
10	540	581,09	7,07



Pada konsentrasi menengah, yaitu sekitar 3–9 g/m³, nilai error relatif lebih kecil dan stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor memiliki performa yang lebih baik pada rentang konsentrasi tersebut. Nilai error terkecil terjadi pada konsentrasi 3 g/m³, yaitu sebesar 0,78%, yang menunjukkan bahwa hasil pengukuran sangat dekat dengan nilai prediksi model regresi.

Sementara itu, pada konsentrasi tinggi, khususnya 10 g/m³, error kembali meningkat menjadi 7,07%. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan kecenderungan saturasi sensor akibat multiple scattering. Pada kondisi ini, penambahan jumlah partikel debu tidak lagi menghasilkan peningkatan intensitas cahaya secara proporsional karena cahaya mengalami hamburan berulang dan sebagian energi cahaya terserap oleh partikel.

Secara umum, rata-rata error sebesar 6,65% menunjukkan bahwa sensor berbasis laser scattering memiliki tingkat akurasi yang cukup baik untuk tahap prototipe. Namun, error yang cukup besar pada konsentrasi rendah menunjukkan bahwa sistem masih memerlukan peningkatan, terutama melalui kalibrasi ulang, pengondisian sinyal fotodetektor, pengendalian cahaya lingkungan, serta pengujian berulang untuk mengetahui repeatability sensor.

Untuk meningkatkan akurasi sistem, proses kalibrasi dapat dikembangkan menggunakan beberapa pendekatan. Pertama, kalibrasi multi-titik dapat dilakukan dengan jumlah variasi konsentrasi yang lebih banyak dan pengulangan pengukuran pada setiap titik. Kedua, nilai rata-rata dan standar deviasi dari beberapa kali pengukuran dapat digunakan untuk mengetahui tingkat repeatability sensor. Ketiga, model nonlinier atau regresi polinomial dapat dipertimbangkan untuk menggambarkan karakteristik sensor pada konsentrasi tinggi, terutama ketika efek saturasi mulai muncul.

Selain itu, faktor lingkungan perlu dikendalikan agar hasil pengukuran lebih stabil. Sensor berbasis optik sangat sensitif terhadap cahaya luar, posisi laser, jarak antara laser dan fotodetektor, kebersihan ruang uji, kelembapan, serta distribusi partikel debu. Variasi kecil pada faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan perubahan signifikan pada hasil pembacaan sensor. Oleh karena itu, ruang uji sebaiknya dibuat tertutup untuk meminimalkan gangguan cahaya eksternal. Posisi laser dan fotodetektor juga perlu dijaga tetap agar sudut deteksi hamburan tidak berubah selama pengujian. Penggunaan catu daya yang stabil juga penting untuk menjaga intensitas laser dan keluaran fotodetektor tetap konsisten.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat dinyatakan bahwa metode laser scattering efektif untuk mendeteksi perubahan konsentrasi debu secara cepat. Sistem mampu menunjukkan hubungan yang kuat antara konsentrasi debu dan intensitas cahaya hamburan, terutama pada rentang konsentrasi rendah hingga menengah. Hal ini menunjukkan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang cukup baik dalam mendeteksi perubahan kecil jumlah partikel di udara. Namun, untuk penggunaan sebagai alat monitoring kualitas udara yang lebih akurat, sistem masih memerlukan pengembangan lebih lanjut, terutama pada aspek kalibrasi, pengujian repeatability, pengendalian noise, serta penentuan rentang kerja efektif sensor.

Dengan demikian, sensor berbasis laser scattering yang dikembangkan memiliki potensi untuk digunakan sebagai sistem pemantauan kualitas udara secara real-time. Meskipun demikian, akurasi pada konsentrasi ekstrem, baik rendah maupun tinggi, masih perlu ditingkatkan. Penambahan rangkaian pengkondisi sinyal, filter data, serta pembanding dengan alat ukur referensi dapat menjadi langkah pengembangan selanjutnya agar sensor memiliki performa yang lebih andal dalam aplikasi monitoring debu halus.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sensor polusi udara berbasis laser dengan prinsip hamburan cahaya mampu mendeteksi konsentrasi debu halus secara cepat dan cukup akurat. Hasil pengujian memperlihatkan hubungan linier yang kuat antara konsentrasi debu dan intensitas cahaya ($R^2 = 0,9713$), dengan sensitivitas yang baik pada konsentrasi rendah hingga menengah. Namun, pada konsentrasi tinggi terjadi kecenderungan saturasi akibat *multiple scattering* sehingga respons sensor menurun. Nilai rata-rata

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



kesalahan sebesar 6,65% menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi yang memadai. Secara keseluruhan, metode ini efektif untuk pemantauan kualitas udara secara real-time. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian dapat difokuskan pada peningkatan akurasi melalui kalibrasi yang lebih komprehensif, penggunaan metode kompensasi untuk mengurangi efek *multiple scattering*, pengujian pada kondisi lingkungan nyata, serta integrasi sistem dengan teknologi IoT untuk pemantauan kualitas udara secara kontinu dan berbasis jaringan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. T. Zateroglu, "Forecasting particulate matter concentrations by combining statistical models," *J. King Saud Univ. Sci.*, vol. 36, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2024.103090.
- [2] Y. A. Cipoli, L. Furst, M. Feliciano, and C. Alves, "Respiratory deposition dose of PM2.5 and PM10 during night and day periods at an urban environment," *Air Qual. Atmos. Health*, vol. 16, no. 11, pp. 2269–2283, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11869-023-01405-1.
- [3] Y. E. Pratiwi, F. F. Taufik, J. Habibi, and A. Wibowo, "The Impact of Particulate Matter on the Respiratory System," *Jurnal Respirasi*, vol. 9, no. 3, pp. 237–245, Sep. 2023, doi: 10.20473/jr.v9-i3.2023.237-245.
- [4] W. Yu *et al.*, "Estimates of global mortality burden associated with short-term exposure to fine particulate matter (PM2.5)," *Lancet Planet. Health*, vol. 8, no. 3, pp. e146–e155, Mar. 2024, doi: 10.1016/S2542-5196(24)00003-2.
- [5] W. R. Wan Mahiyuddin, R. Ismail, N. Mohammad Sham, N. I. Ahmad, and N. M. N. Nik Hassan, "Cardiovascular and Respiratory Health Effects of Fine Particulate Matters (PM2.5): A Review on Time Series Studies," May 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/atmos14050856.
- [6] I. P. S. Araújo and D. B. Costa, "Measurement and Monitoring of Particulate Matter in Construction Sites: Guidelines for Gravimetric Approach," Jan. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su14010558.
- [7] A. Al-Zubeidi, L. A. McCarthy, A. Rafiei-Miandashti, T. S. Heiderscheit, and S. Link, "Single-particle scattering spectroscopy: Fundamentals and applications," Apr. 01, 2021, *De Gruyter Open Ltd*. doi: 10.1515/nanoph-2020-0639.
- [8] Z. Jia, J. Li, L. Gao, D. Yang, and A. Kanaev, "Dynamic Light Scattering: A Powerful Tool for In Situ Nanoparticle Sizing," Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/colloids7010015.
- [9] W. Shao, H. Zhang, and H. Zhou, "Fine particle sensor based on multi-angle light scattering and data fusion," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 5, May 2017, doi: 10.3390/s17051033.
- [10] L. R. Crilley *et al.*, "Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 2, pp. 709–720, Feb. 2018, doi: 10.5194/amt-11-709-2018.



9%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

- 1** jurnal.polinema.ac.id
Internet 180 words — 5%
- 2** Anak Agung Winda Suryananda Widarsa, Ni Wayan Widhiasthini, Ni Luh Yulyana Dewi, Anak Agung Istri Agung Maheswari. "Smart City : Tantangan Mengatasi Pencemaran Udara di Kota Denpasar", RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business, 2025
Crossref 16 words — < 1%
- 3** Aji Nur, Sutiswa Shandra Isasi. "FORMULASI DAN UJI KARAKTERISTIK GRANUL INSTAN POLIHERBAL BANGJALE (BANGLE, JAHE, DAN LEMON) SEBAGAI ANTIOKSIDAN", Pharmacoscript, 2025
Crossref 15 words — < 1%
- 4** www.coursehero.com
Internet 12 words — < 1%
- 5** ejurnal.bppt.go.id
Internet 10 words — < 1%
- 6** ejournal.nusamandiri.ac.id
Internet 9 words — < 1%
- 7** jehe.abzums.ac.ir
Internet 9 words — < 1%

8	repository.unj.ac.id Internet	9 words — < 1%
9	repository.unpkediri.ac.id Internet	9 words — < 1%
10	Alhidayah, Evaliya Isni. "Pengaruh Kepemimpinan Kepala Madrasah dan Iklim Madrasah Terhadap Prestasi Belajar Siswa Program Full Day School di MTs Negeri 1 Banyumas.", Universitas Islam Negeri Saifuddin Zuhri (Indonesia) ProQuest	8 words — < 1%
11	core.ac.uk Internet	8 words — < 1%
12	id.123dok.com Internet	8 words — < 1%
13	www.mdpi.com Internet	8 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE SOURCES OFF

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE MATCHES OFF