

KARAKTERISTIK SENSOR FIBER OPTIK KONFIGURASI SPIRAL DALAM MENDETEKSI KADMIUM PADA AIR

¹⁾Nisa'ul Fadhilah, ²⁾Muhimmatul Khoiro, ³⁾Meta Yantidewi, ⁴⁾Rohim Aminullah Firdaus

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nisaul.20045@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhimmatulkhoiro@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: metayantidewi@unesa.ac.id

⁴⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: rohimfirdaus@unesa.ac.id

Abstrak

Kadmium (Cd) adalah logam berat yang sulit terurai dan berpotensi menyebabkan efek toksik pada lingkungan, kesehatan manusia, dan hewan sehingga Menteri Kesehatan Republik Indonesia menetapkan batas maksimum kadar yang diperbolehkan dalam air minum yaitu 0,003 mg/L. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sensor berbasis fiber optik untuk mendeteksi ion kadmium dalam air dengan memanfaatkan gelombang evanescent menggunakan konfigurasi spiral. Sensor ini dirancang untuk memberikan data pengujian secara *real-time* dan meningkatkan karakteristik sensor untuk pengujian kualitas air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi Cd maka intensitas cahaya menjadi semakin berkurang yang ditandai dengan penurunan nilai dB. Sensor fiber optik konfigurasi spiral dengan jumlah lilitan yang lebih banyak menunjukkan karakteristik sensor yang lebih baik. Sensor dengan 3 lilitan menunjukkan hasil pengukuran terbaik dengan jangkauan kerja 4,86 dB, sensitivitas 99,21 dB/ppm, dan resolusi $1,01 \times 10^{-4}$ ppm.

Kata Kunci: Sensor Fiber Optik, Spiral, Kadmium

Abstract

Cadmium (Cd) is a heavy metal that is difficult to decompose and has the potential to cause toxic effects on the environment, human health, and animals. Therefore, the Indonesian Minister of Health has set the maximum permissible concentration in drinking water at 0.003 mg/L. This study aims to develop a optical fiber-based sensor to detect cadmium ions in water using evanescent wave technology with a spiral configuration. The sensor is designed to provide real-time testing data and improve sensor characteristics for water quality testing. The results indicate that higher concentrations of Cd lead to a decrease in light intensity, marked by a reduction in dB values. The spiral optical fiber sensor with a greater number of windings demonstrates superior sensor characteristics. The sensor with 3 windings shows the best measurement results with a working range of 4.86 dB, sensitivity of 99.21 dB/ppm, and resolution of 1.01×10^{-4} ppm.

Keywords: Fiber Optic Sensor, Spiral, Cadmium

I. PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) merupakan logam berat yang memiliki sifat yang tidak mudah terurai dalam tubuh organisme hidup dan berpotensi menyebabkan efek toksik, bahkan pada kadar yang sangat rendah. Pencemaran air oleh ion logam berat terutama Cd dapat menimbulkan masalah serius bagi lingkungan, kesehatan manusia, dan hewan karena toksisitasnya yang bersifat akut dan kronis terhadap organisme biologis (Pulungan & Wahyuni, 2021). Menteri Kesehatan Republik Indonesia menetapkan batas kadar

maksimum yang diperbolehkan dalam air minum yaitu 0,003 mg/L (Kementerian Kesehatan, 2023). Konsumsi ion logam berat Cd dalam jumlah berlebihan dapat meningkatkan risiko penyakit serius bagi kesehatan manusia (Shakya & Singh, 2022). Oleh karena itu, sangat diperlukan sensor untuk mendeteksi logam berat terutama dalam air agar kualitas air menjadi lebih terjaga.

Telah banyak metode konvensional berbasis laboratorium yang telah dilakukan untuk mendeteksi kandungan Cd dalam air, termasuk *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) (Song *et al.*, 2022), *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) (Hidayah *et al.*, 2021), *Spectrophotometry* (Oyekunle *et al.*, 2020), dan lain sebagainya. Metode ICP-MS dapat mendeteksi keberadaan logam berat bahkan dalam sampel cair yang sangat kecil, namun metode ini membutuhkan peralatan yang mahal, proses deteksi yang rumit, dan waktu analisis yang lama (Shakya & Singh, 2022). Metode AAS merupakan metode untuk mendeteksi lebih dari 70 elemen berbeda berdasarkan unsur kimia atau elemen dalam suatu sampel melalui interaksi cahaya dengan atom bebas (El-Dib *et al.*, 2020). Sayangnya, metode ini memerlukan instrumen deteksi yang mahal, persiapan sampel yang kompleks, operasi yang rumit, dan waktu deteksi yang lama. Sedangkan, *Spectrophotometry* adalah teknik dengan proses deteksi yang sederhana namun tidak mampu membedakan logam berat yang memiliki struktur yang sama persis, sehingga menghasilkan selektivitas deteksi rendah (Zhang *et al.*, 2020). Untuk mengatasi kekurangan dari beberapa metode tersebut, penelitian ini menawarkan teknologi terbaru pengujian Cd dalam air dengan memanfaatkan fiber optik sebagai alternatif.

Fiber optik sebagai sensor memiliki beberapa keunggulan, seperti sensitivitas tinggi, ringan, fleksibel, tahan akan gangguan elektromagnetik serta aman dari resiko kebakaran dan bahan kimia (Pendão & Silva, 2022). Berbagai penelitian sebelumnya telah memanfaatkan fiber optik sebagai sensor untuk mendeteksi berbagai unsur dalam air. Pemanfaatan sensor fiber optik tersebut menggunakan perbedaan indeks bias dan perubahan material *cladding* sehingga mampu menghasilkan *Evanescent Wave* (Khoiro *et al.*, 2023). Dengan keunggulan tersebut, fiber optik telah menjadi fokus pengembangan sebagai sistem deteksi optik dengan menggunakan beberapa konfigurasi. Konfigurasi-konfigurasi tersebut antara lain lurus, *bending* dengan jari-jari, *bending* berbentuk U, *bending* berbentuk gamma, dan *bending* berbentuk spiral (Arifin *et al.*, 2021). Penggunaan konfigurasi tersebut mempengaruhi karakteristik dari sensor fiber optik. Karakteristik sensor pada fiber optik umumnya ditinjau melalui jangkauan kerja, sensitivitas sensor dan resolusi sensor (Hardiantho *et al.*, 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, maka penelitian ini dilakukan sebagai pengembangan dari sistem sensor fiber optik untuk mendeteksi Cd dalam air dengan memanfaatkan gelombang evanescent menggunakan konfigurasi spiral. Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah menghasilkan data pengujian secara *real-time* untuk mengidentifikasi logam berat dalam air, khususnya Cd. Dengan harapan bahwa penelitian ini akan menghasilkan karakteristik sensor yang lebih baik sehingga dapat menjadi sensor dengan performa terbaik dalam pengujian kualitas air.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

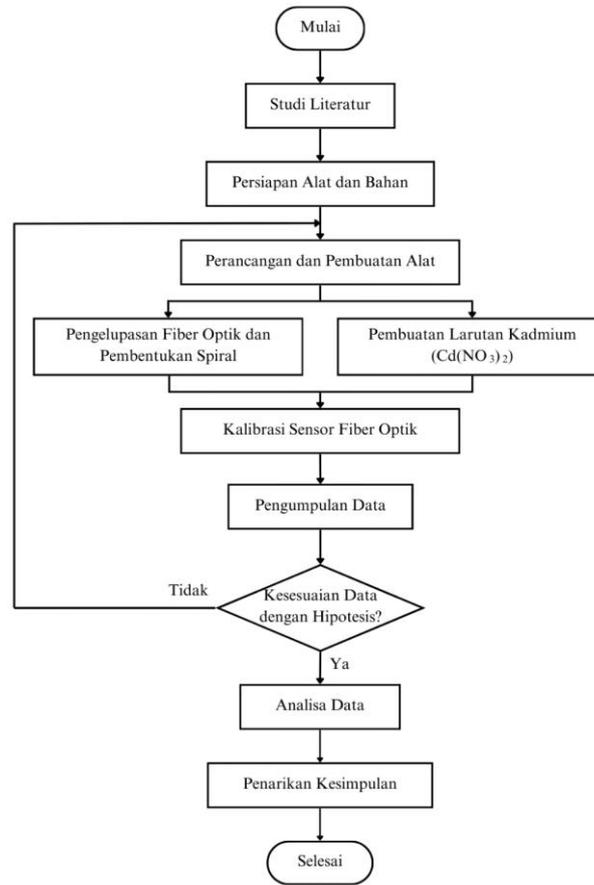
Penelitian ini termasuk kedalam jenis penelitian eksperimental yang dilakukan di Laboratorim Instrumentasi Fisika Universitas Negeri Surabaya. Terdapat beberapa tahap yang dilakukan dalam penelitian ini. Tahapan tersebut dapat digambarkan seperti pada Gambar 1.

B. Variabel Operasional Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa variabel, yaitu variabel kontrol, variabel bebas, dan variabel respon. Variabel kontrol yang digunakan antara lain sumber cahaya laser dioda merah 650 nm, suhu larutan $28 \pm 0,5^\circ\text{C}$, panjang kupasan *cladding* 5 cm, radius lilitan 0,14 cm, dan tegangan masukan 5000 mV. Variabel bebas yang digunakan antara lain konsentrasi larutan 0,001 ppm; 0,005 ppm; 0,01 ppm; 0,05 ppm, dan konfigurasi spiral 1 lilitan, 2 lilitan, 3 lilitan. Serta variabel respon berupa tegangan keluaran dan waktu respon.

C. Teknik Pengumpulan Data

Sensor fiber optik yang sudah terbentuk spiral kemudian dilakukan observasi menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 1600x. Observasi tersebut dilakukan untuk mengetahui bahwa sensor sudah mencapai bagian *core*. Selanjutnya dapat dilakukan pengujian sensor tersebut dengan merendam sensor kedalam sampel yang hanya terkontaminasi Cd dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Pengujian tersebut menggunakan alat yang sudah dirancang sebelumnya. Hasil dari pengujian akan ditampilkan pada LCD berupa tegangan dalam satuan mV.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

D. Teknik Pengolahan Data

Data tegangan yang sudah didapatkan akan dikonversi ke dB (desibel), dimana dB merupakan rasio perbandingan berupa logaritmik yang digunakan sebagai standar dalam bidang optik (Robin & Plante, 2022). Hal ini dilakukan karena tegangan sebelum pengujian bernilai berbeda-beda sehingga digunakan dB untuk mengetahui perubahan nilai tegangan antara sebelum dan sesudah pengujian. Kemudian, data dB tersebut diolah berdasarkan karakteristik dari sensor fiber optik, yaitu jangkauan kerja, sensitivitas, dan resolusi. Selain itu, juga akan diolah berdasarkan grafik untuk mengetahui hubungan antara konsentrasi dengan dB. Untuk menentukan nilai jangkauan kerja digunakan persamaan (1):

$$\Delta = dB_{max} - dB_{min} \quad (1)$$

Dengan dB_{max} adalah dB maksimal dan dB_{min} adalah dB minimal.

Sensitivitas dihitung berdasarkan konsentrasi maksimum dan minimum larutan (Khoiro et al., 2023). Nilai sensitivitas sensor dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2).

$$S = \frac{dB_{max} - dB_{min}}{K_{max} - K_{min}} \quad (2)$$

Dengan K_{max} adalah konsentrasi larutan maksimal dan K_{min} adalah konsentrasi larutan minimal.

Resolusi adalah perubahan nilai terkecil yang diukur oleh sensor (Angrasari et al., 2019). Nilai resolusi ditentukan menggunakan Persamaan (3).

$$R = \frac{N}{S} \quad (3)$$

Dengan N adalah skala terkecil dari sensor yaitu 0,001 mV dan S adalah sensitivitas sensor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

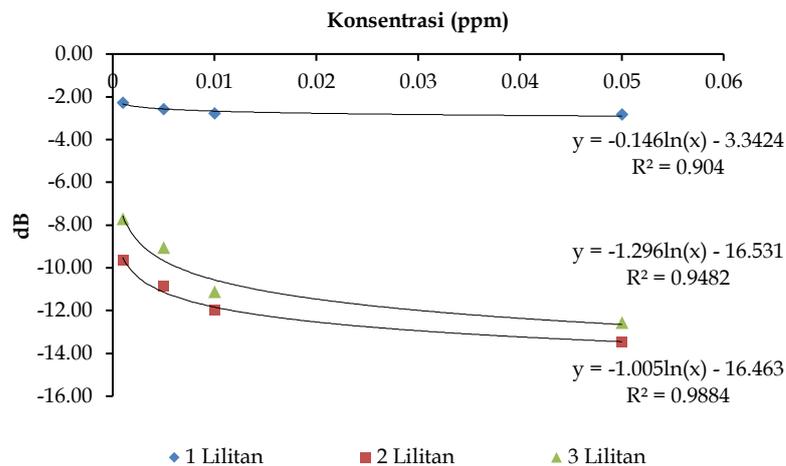
Dalam penelitian ini, rangkaian alat yang akan digunakan terdiri dari modul laser dioda merah KY-008, fiber optik multimode plastik Autonics FD 620-10, arduino nano V3.0 ATMEGA328P, modul sensor fotodioda LM393, LCD I2C, power supply 5-12V, modul power supply MB102, switch, dan kabel jumper. Alat

tersebut disusun ke dalam box, dimana box tersebut didesain menggunakan *tinkercad* dan dicetak menggunakan *3D Print* dengan filamen berwarna hitam. Hasil yang terbaca oleh fotodiode akan ditampilkan dalam LCD berupa tegangan dengan satuan mV seperti yang terlihat pada Gambar 2. Satuan tersebut dipilih agar dapat mendeteksi tegangan keluaran yang dihasilkan oleh sensor fiber optik dengan konfigurasi lilitan.



Gambar 2. Tampilan Alat Deteksi Cd pada Air

Pengujian sensor fiber optik dilakukan menggunakan 3 macam lilitan yaitu 1, 2 dan 3. Masing-masing sensor diuji pada sampel yang telah disiapkan dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Pada setiap percobaan juga didapatkan nilai dB pengujian yang ditunjukkan pada pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengujian Sensor Fiber Optik Menggunakan Konfigurasi Spiral

Berdasarkan data pengujian tersebut, didapatkan nilai karakteristik sensor fiber optik seperti yang ditunjukkan pada tabel 1. Nilai tersebut didapatkan melalui perhitungan menggunakan persamaan (1), (2), dan (3).

Tabel 1. Karakteristik Sensor Fiber Optik Konfigurasi Spiral

Jumlah Lilitan	Δ (dB)	S (dB/ppm)	R (ppm)
1	0,55	11,28	$8,87 \times 10^{-4}$
2	3,86	78,83	$1,27 \times 10^{-4}$
3	4,86	99,21	$1,01 \times 10^{-4}$

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang didapatkan, terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi Cd maka dB akan bernilai semakin menurun. Nilai negatif pada dB menunjukkan adanya *loss* dalam pengujian. Penurunan nilai dB menandakan *loss* yang terjadi selama pengujian bernilai semakin besar seiring dengan tingginya konsentrasi Cd. Hal ini disebabkan oleh Cd yang mengabsorpsi cahaya yang merambat melalui *core* fiber optik. Selain itu, dapat diakibatkan oleh faktor pembengkokan yang mempengaruhi sudut datang dan sudut pantul pada fiber optik sehingga menyebabkan intensitas cahaya menjadi semakin berkurang (Hardiantho *et al.*, 2021). Pengurangan intensitas cahaya dalam sensor fiber optik sebanding dengan *loss* dan tegangan keluaran yang didapatkan (Angrasari *et al.*, 2019).

Nilai karakteristik sensor ditentukan menggunakan persamaan jangkauan kerja, sensitivitas, dan resolusi (Khoiro *et al.*, 2023). Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan jangkauan kerja, sensitivitas, dan resolusi sensor pada fiber optik konfigurasi spiral. Berdasarkan data tersebut, dapat diketahui bahwa semakin banyak lilitan yang digunakan maka karakteristik sensor akan semakin baik. Karakteristik sensor terbaik terdapat pada sensor fiber optik menggunakan 3 lilitan dengan nilai jangkauan kerja 4,86 dB, sensitivitas 99,21 dB/ppm, dan resolusi $1,01 \times 10^{-4}$ ppm.

Pembengkokan yang lebih banyak akan mempengaruhi interaksi gelombang evanescent dengan sampel (Afsharipour *et al.*, 2023). Meskipun jumlah lilitan yang semakin banyak akan mempengaruhi intensitas cahaya yang terdeteksi oleh fotodiode, namun sensor fiber optik dengan jumlah lilitan yang semakin banyak yaitu 3 lilitan menjadi lebih sensitif dibandingkan fiber optik dengan 1 dan 2 lilitan. Hasil pengukuran penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hardiantho *et al.* (2021) menunjukkan bahwa sensor fiber optik dengan 6 lilitan memiliki sensitivitas 57,63 mV/ppm. Namun, penelitian tersebut menggunakan satuan mV dengan jumlah lilitan 4, 5, dan 6, serta logam yang dideteksi adalah merkuri (Hardiantho *et al.*, 2021). Sementara itu, penelitian ini menggunakan satuan dB dengan jumlah lilitan 1, 2, dan 3, serta logam yang dideteksi adalah kadmium.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi yang digunakan maka intensitas cahaya akan semakin berkurang, yang ditunjukkan dengan menurunnya nilai dB. Sensor deteksi Cd dengan jumlah lilitan yang semakin banyak akan menghasilkan sensor dengan performa yang baik. Hasil pengukuran terbaik diperoleh pada sensor fiber optik konfigurasi 3 lilitan dengan nilai jangkauan kerja 4,86 dB, sensitivitas 99,21 dB/ppm, dan resolusi $1,01 \times 10^{-4}$ ppm.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, peneliti menyarankan untuk menggunakan reagen sebagai pengganti *cladding* agar dapat mengikat logam Cd sehingga meningkatkan karakteristik dari sensor fiber optik.

DAFTAR PUSTAKA

- Afsharipour, E., Malviya, K. D., Montazeri, M., Mortazy, E., Soltanzadeh, R., Hassani, A., Rosei, F., and Chaker, M. 2023. Evanescent-field excited surface plasmon-enhanced U-bent fiber probes coated with Au and ZnO nanoparticles for humidity detection. *Processes*, 11(2), 642. <https://doi.org/10.3390/pr11020642>
- Angrasari, F., Arifin, A., & Abdullah, B. 2019. Fabrication of Milk Fat Sensor based on Plastic Optical Fiber. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1341, No. 8, p. 082038). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/8/082038>
- Arifin, A., Amaliyah, K. R., Lebang, A. K., Hamrun, N., Dewang, S., & Tahir, D. 2021. Enhance Sensitivity Of Plastic Optical Fiber Sensor By Spiral Configuration For Body Temperature Applications. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1811, No. 1, p. 012026). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1811/1/012026>
- El-Dib, F. I., Mohamed, D. E., El-Shamy, O. A., & Mishrif, M. R. 2020. Study the adsorption properties of magnetite nanoparticles in the presence of different synthesized surfactants for heavy metal ions removal. *Egyptian Journal of Petroleum*, 29(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.08.004>
- Hardiantho, W., Arminah, B., & Arifin, A. 2021. Detection of Mercury Ions in Water using a Plastic Optical Fiber Sensor. *Indonesian Physical Review*, 4(2), 95-103. <https://doi.org/10.29303/ipr.v4i2.82>
- Hidayah, Q. N., Mahardika, M. P., & Permatasari, D. A. I. (2021). Analisis Kandungan Logam Berat Pb, Cd, dan Hg pada Air Minum Isi Ulang Depot Air Minum (DAM) di Kecamatan Tangen Menggunakan Spektroskopi Serapan Atom. *Duta Pharma Journal*, 1(1), 57-67. <https://doi.org/10.47701/djp.v1i1.1193>

- Kementerian Kesehatan. 2023. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No.2 Tahun 2023. <https://www.peraturan.go.id/id/permenkes-no-2-tahun-2023>
- Khoiro, M., Yantidewi, M., Firdaus, R. A., Haryadi, D., Tyas, S. H. Y., Laila, N. N., Rozikin, M. K., & Muadhif, F. I. 2023. Lead (Pb) Detection Analysis Based on Multimode Plastic Optical Fiber Sensor. In 2023 *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)* (pp. 337-340). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET60171.2023.10366760>
- Oyekunle, J. A., Ore, O. T., Durodola, S. S., Oyinloye, J. A., Oyebo, B. A., & Ajanaku, O. L. 2020. Heavy Metal Levels And Changes In Trimethylamine Content Of Smoked Fish And Meat Under Different Storage Conditions. *SN Applied Sciences*, 2, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2844-7>
- Pendão, C., & Silva, I. 2022. Optical Fiber Sensors And Sensing Networks: Overview Of The Main Principles And Applications. *Sensors*, 22(19), 7554. <https://doi.org/10.3390/s22197554>
- Pulungan, A. F., & Wahyuni, S. 2021. Analisis Kandungan Logam Kadmium (Cd) Dalam Air Minum Isi Ulang (AMIU) Di Kota Lhokseumawe, Aceh. *Averrous: Jurnal Kedokteran Dan Kesehatan Malikussaleh*, 7(1), 75-83. <https://doi.org/10.29103/averrous.v7i1.3666>
- Robin, O., & Plante, C. 2022. An illustrated tutorial for logarithmic scales and decibels in acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(5), 2880-2892. <https://doi.org/10.1121/10.0015144>
- Shakya, A. K., & Singh, S. 2022. State Of The Art In Fiber Optics Sensors For Heavy Metals Detection. *Optics & laser technology*, 153, 108246. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108246>
- Song, Y., Guo, F., Zeng, P., Liu, J., Wang, Y., & Cheng, H. 2022. Simultaneous Measurements Of Cr, Cd, Hg And Pb Species In Ng L- 1 Levels By Interfacing High Performance Liquid Chromatography And Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analytica chimica acta*, 1212, 339935. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.339935>
- Zhang, Y. N., Sun, Y., Cai, L., Gao, Y., & Cai, Y. 2020. Optical Fiber Sensors For Measurement Of Heavy Metal Ion Concentration: A Review. *Measurement*, 158, 107742. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107742>