

ANALISIS PENGARUH VARIASI PANJANG KOPLING TERHADAP EFISIENSI TRANSFER CAHAYA PADA SENSOR FIBER OPTIK *DIRECTIONAL COUPLER*

¹⁾Febbrya Eka Dewi Waluyo, ²⁾Muhimmatul Khoiro, ³⁾Dzulkiflih

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: febbryaeka.21012@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: dzulkiflih@unesa.ac.id

Abstrak

Industri air minum dalam kemasan yang berkembang pesat memicu peningkatan permintaan akan kualitas air yang lebih baik. Namun, kontaminasi logam berat, terutama kadmium (Cd^{2+}), berisiko membahayakan kesehatan manusia. Kadmium dapat merusak organ dan sistem tubuh, sehingga diperlukan metode deteksi yang efisien dan sensitif. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sensor fiber optik berbasis *Directional Coupler* untuk mendeteksi kadmium dalam air minum. Sistem deteksi menggunakan Laser BF4R (660 nm) sebagai pemancar cahaya dan Sensor BF5R sebagai penerima. Variabel penelitian meliputi suhu larutan ($25 \pm 0,5^\circ\text{C}$), panjang *coupling* (2,8 cm, 2,9 cm, dan 3,0 cm), konsentrasi larutan Cd (0,05 ppm, 0,10 ppm, dan 0,15 ppm), serta variasi konfigurasi nyala laser (ON-OFF, OFF-ON, ON-ON). Kalibrasi dilakukan dengan memeriksa perbandingan antara fiber optik dengan *cladding* dan tanpa *core*, memastikan kedua *core* fiber optik menempel dengan tepat. Teknik pengambilan data dilakukan dengan mengukur intensitas cahaya yang terkopel pada fiber optik. Hasil penelitian menunjukkan panjang *coupling* 3,0 cm memberikan intensitas *output* tertinggi pada konfigurasi laser ON-OFF, dengan sensitivitas yang optimal untuk deteksi kadmium. Pembahasan menunjukkan bahwa panjang *coupling* yang lebih besar meningkatkan perpindahan cahaya antar fiber, dengan mode ganjil memperkuat gelombang *evanescent* yang meningkatkan efisiensi transfer energi. Penelitian ini membuktikan bahwa metode *Directional Coupler* pada fiber optik dapat diterapkan secara efisien untuk deteksi logam berat dalam air secara real-time dan dengan biaya rendah.

Kata Kunci: Sensor fiber optik, *Directional Coupler*, Kadmium, gelombang *evanescent*, intensitas cahaya

Abstract

The rapidly growing bottled drinking water industry has led to increased demand for higher water quality. However, contamination by heavy metals, particularly cadmium (Cd^{2+}), poses significant health risks. Cadmium can damage organs and body systems, necessitating efficient and sensitive detection methods. This study aims to develop an optical fiber sensor based on the *Directional Coupler* method for detecting cadmium in drinking water. The detection system employs a BF4R laser (660 nm) as the light emitter and a BF5R sensor as the receiver. Research variables include solution temperature ($25 \pm 0.5^\circ\text{C}$), coupling lengths (2.8 cm, 2.9 cm, and 3.0 cm), cadmium solution concentrations (0.05 ppm, 0.10 ppm, and 0.15 ppm), and laser activation configurations (ON-OFF, OFF-ON, ON-ON). Calibration was performed by comparing fiber optics with and without *cladding*, ensuring the precise alignment of the cores. Data collection was done by measuring the coupled light intensity on the optical fibers. Results showed that a coupling length of 3.0 cm provided the highest output intensity in the ON-OFF laser configuration, demonstrating optimal sensitivity for cadmium detection. The discussion revealed that longer coupling lengths enhance light transfer between fibers, with the odd mode strengthening the *evanescent* wave, thus increasing energy transfer efficiency. This research demonstrates that the *Directional Coupler* method in optical fibers can effectively detect heavy metals in water in real-time and at a low cost.

Keywords: Optical fiber sensor, *Directional Coupler*, Cadmium, *evanescent* wave, light intensity

I. PENDAHULUAN

Industri air minum dalam kemasan (AMDK) berkembang pesat seiring dengan meningkatnya populasi perkotaan, yang memicu tingginya permintaan akan air minum dan persaingan dalam industri ini (Akbar Dwiputra, 2021). Namun, peningkatan permintaan AMDK juga berpotensi menurunkan kualitas air, terutama akibat kontaminasi logam berat dari limbah industri (Akhtar dkk., 2021). Salah satu logam berat yang berbahaya adalah kadmium, yang dapat merusak sel, organel, sistem saraf, dan paru-paru, serta berisiko menyebabkan gangguan kesehatan jangka panjang (Akhtar dkk., 2021; Kumar dkk., 2021).

Kadmium merupakan salah satu logam berat yang memiliki tingkat toksisitas tinggi. Berdasarkan WHO (*World Health Organization*), Kadmium diklasifikasikan sebagai karsinogen manusia yang memiliki efek beracun terhadap ginjal dan sistem pernafasan. Pengaruh konsumsi air minum yang melebihi nilai ambang batas kandungan kadmium terhadap kesehatan manusia adalah dapat merusak perkembangan otak pada anak, menyebabkan penyumbatan sel-sel darah merah, anemia, keguguran pada ibu hamil, gangguan sistem pencernaan, gangguan pada ginjal, dan penurunan kecerdasan intelektual (Rahayu & Harmadi, 2020). Pada umumnya, 30.000 ton Kadmium tersebar di ekosistem dan 13.000 diantaranya diproduksi oleh aktivitas manusia. *World Health Organization* (WHO) (Solomonea dkk., 2022) dan Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-2354.5-2011 di Indonesia (Anshar dkk., 2021) telah menetapkan batasan nilai kandungan kadmium dalam air minum adalah 0,003 ppm atau 0,003 mg/L.

Kadmium yang berbahaya bagi kesehatan memerlukan deteksi yang tepat, terutama pada sumber air minum (Yulianti dkk., 2018). Metode tradisional seperti ICP, AAS, dan ICP-MS efektif, tetapi memerlukan alat mahal dan persiapan rumit (Solomonea dkk., 2022). Alternatif lainnya, seperti sensor elektrokimia dan deteksi colorimetric atau fluorescent, menawarkan solusi portabel dengan biaya rendah dan sensitivitas tinggi, meskipun kurang stabil terhadap fluktuasi suhu dan pH (Rasheed dkk., 2018; Wang dkk., 2020). Untuk itu, dibutuhkan sistem deteksi real-time yang sensitif dan stabil.

Sensor fiber optik menawarkan terobosan baru dalam deteksi kadmium dalam air dengan kelebihan seperti sensitivitas tinggi, ringan, fleksibel, dan tahan terhadap gangguan elektromagnetik serta bahan kimia (Pendão & Silva, 2022). Beberapa metode, seperti reflektansi, floresensi, dan absorpsi, telah dikembangkan untuk mendeteksi logam, namun reflektansi memiliki desain kompleks dan floresensi proses fabrikasi mahal. Metode absorpsi gelombang *evanescent* menarik karena proses fabrikasi mudah dan biaya rendah (Yulianti dkk., 2018), meskipun penggunaan teknik seperti SPR dan FBG memerlukan bahan dan peralatan mahal (Ren dkk., 2023; Solomonea dkk., 2022; Tamayo-Belda dkk., 2021).

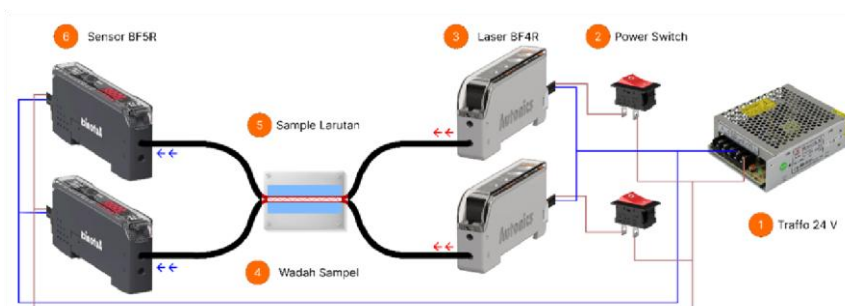
Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sensor fiber optik berbasis *Directional Coupler* umumnya digunakan untuk mendeteksi logam berat plumbum (Pb) (Pujiyanto dkk., 2020a, 2020b), dengan fokus pada aplikasi elektro-optik dan material *Epsilon Near-Zero* (ENZ) pada ITO (Bhowmik & Sikdar, 2022). Selain itu, deteksi kadmium sering memerlukan alat mahal seperti spektrometer untuk mengukur ketebalan sensor (Shen dkk., 2024). Berdasarkan gap tersebut, dibutuhkan sensor dengan metode *Directional Coupler* yang lebih sensitif untuk deteksi kadmium. Inovasi dalam deteksi kadmium menggunakan sensor fiber optik berbasis *Directional Coupler* memanfaatkan perubahan *coupling* cahaya antara fiber yang diakibatkan oleh interaksi dengan larutan Cd, yang mempengaruhi indeks refraksi dan transmisi sinyal cahaya (Li dkk., 2023). Metode ini memungkinkan deteksi *real-time* kadar logam berat dalam air minum secara efisien dan terjangkau, dibandingkan dengan metode konvensional. Penelitian ini juga mengembangkan variasi konfigurasi fiber optik untuk meningkatkan kinerja sensor.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Pada tahap perancangan dan pembuatan alat diawali dengan menghubungkan laser sebagai sumber cahaya dengan sumber daya. Selanjutnya laser dihubungkan ke ujung fiber optik yang telah disusun menggunakan teknik *Directional Coupler*. Fiber optik yang digunakan memiliki dua kondisi yaitu, kondisi

pertama adalah fiber tanpa dikupas untuk pengkalibrasian sensor dengan mengukur intensitas yang dihasilkan dan kondisi kedua adalah fiber yang telah dikupas. Selanjutnya cahaya laser BF4R akan divariasikan nyala-mati menggunakan kedua *switch* yang terhubung di masing-masing laser BF4R. Cahaya yang telah melewati sampel akan terdeteksi oleh kedua laser BF5R yang terhubung di setiap ujung fiber. Hasil dari proses perpindahan cahaya antar fiber pada *Coupling* akan diproses dan diolah secara *real-time* dan ditampilkan melalui *display* BF5R berupa intensitas. Perancangan peralatan yang telah disiapkan akan dirangkai seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



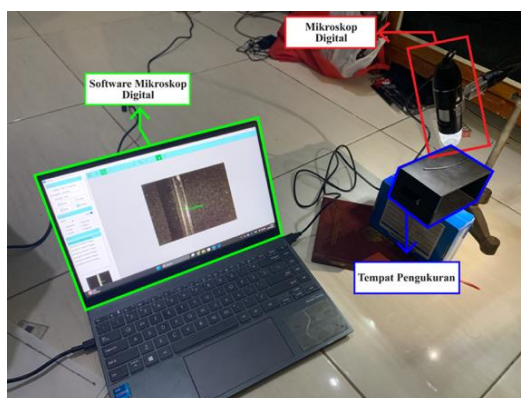
Gambar 1. Rancangan Sistem Alat Deteksi Cadmium.

B. Variabel Operasional Penelitian

1. Variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi jenis sumber cahaya (laser BF4R, 660 nm) untuk menjaga konsistensi panjang gelombang, panjang kupasan jacket (3 cm) untuk mempertahankan area interaksi cahaya dan larutan Cd, serta suhu larutan Cd ($25 \pm 0,5^\circ\text{C}$) yang dijaga konstan untuk meminimalkan pengaruh suhu, konsentrasi larutan Cd (0,05 ppm).
2. Variabel manipulasi dalam penelitian ini meliputi panjang coupling (2,8 cm, 2,9 cm, dan 3,0 cm) untuk mengamati dampaknya terhadap sensitivitas sensor.
3. Variabel respon dalam penelitian ini adalah perubahan intensitas cahaya yang terkopel pada fiber optik, yang mencerminkan perubahan indeks bias akibat interaksi antara sumber cahaya dan larutan Cd. Intensitas output akan ditampilkan pada kedua display BF5R untuk perekaman data real-time.

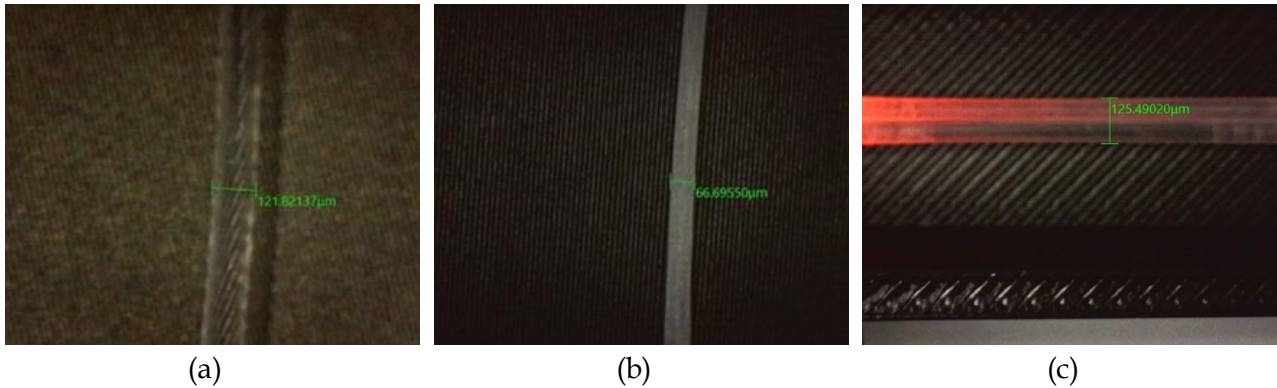
C. Kalibrasi Alat

Proses mengatur fiber optik diawali dengan pengupasan *jacket* fiber optik sepanjang 3 cm dengan menggunakan *cutter*. Pengupasan dilakukan secara perlahan agar tidak merusak bagian dalam fiber. Fiber yang telah dikupas kemudian direndam di cairan aseton selama 10 detik untuk melarutkan *cladding* yang menyelubungi *core* fiber. Setelah itu, fiber direndam di *aquadest* selama 10 menit untuk menghantikan proses pelunakan *cladding*. Perlu diperhatikan pada proses ini diperlukan kecakapan dan ketepatan waktu saat perendaman fiber pada aseton karena apabila lebih dari 10 detik maka aseton dapat melunakkan *core* hingga patah.



Gambar 2. Penggunaan Mikroskop Digital untuk Mengatur Diameter Fiber Optik

Setelah melakukan proses pengupasan dilanjutkan dengan proses penipisan secara manual menggunakan amplas 100 *grid* dan 1000 *grid* untuk pengkikisan hingga *core* terlihat dan disesuaikan panjangnya dengan ukuran *core* yang akan di-*coupling*. Untuk memastikan bahwa *cladding* telah terkupas sepenuhnya, maka dapat dipastikan melalui mikroskop digital yang telah diatur skalanya menjadi mikrometer seperti pada. Untuk penggunaan mikroskop digital diperlukan kalibrasi agar pengukuran menjadi akurat. Kalibrasi mikroskop dilakukan dengan menggunakan lembar kalibrasi yang telah tersedia dalam paket mikroskop.



Gambar 3. Kalibrasi Fiber Optik: (a) Ukuran Fiber Sebelum *Cladding* Dikupas, (b) Ukuran Fiber Setelah *Cladding* Dikupas, (c) *Directional Coupler* Fiber Optik *Core* Menempel dan Sejajar

Observasi dilakukan dengan menggunakan fiber optik yang terdapat *cladding* dan tanpa *cladding* atau dapat disebut dengan bagian *core* fiber optik. Perbandingan ukuran ini dilakukan untuk memastikan bahwa fiber optik yang telah melalui proses pengupasan sudah terkupas hingga bagian *core* sekitar 50-62,5 μm (Simatupang dkk., 2022). Berdasarkan ukuran yang tertera pada Gambar 3(a) dan Gambar 3(b) menunjukkan bahwa proses penipisan *cladding* hingga *core* fiber telah berhasil dan sebagai pembuktian bahwa *cladding* telah sepenuhnya dikupas dibahas pada sub bab kalibrasi fiber optik. Kemudian memastikan bahwa dua *core* fiber optik telah saling menempel memerlukan bantuan kamera mikroskop. Sehingga akan terlihat apakah kedua *core* telah menempel sempurna atau masih terdapat celah. Dengan pendekatan ini, dapat diamati apakah kedua *core* fiber tersebut telah terpasang dengan sempurna tanpa adanya celah di antara keduanya. Pada Gambar 3(c) dapat dilihat bahwa didapatkan total diameter gabungan kedua fiber optik tertera sebesar 125.49020 μm , yang sesuai dengan dua kali diameter dari satu fiber optik. Proses kalibrasi ini sangat penting, mengingat keberadaan jarak antara kedua *core* fiber dapat memengaruhi kualitas sambungan optik, yang berpotensi menyebabkan penurunan efisiensi transmisi sinyal optik. Langkah ini diperlukan karena apabila terdapat jarak diantara kedua *core* fiber, maka gelombang cahaya dari fiber satu tidak bisa beresilasi dengan fiber kedua. Sehingga fenomena *Directional Coupler* tidak akan terjadi.



Gambar 4. Kalibrasi *Set Value* pada Sensor BF5R

Untuk melakukan kalibrasi sensor BF5R diawali mengatur set value dengan menekan tombol UP hingga angka yang ada pada display berwarna hijau sebelah kanan berkedip, kemudian tekan kembali tombol UP hingga angka pada display menjadi 500 dan diamkan selama 3 detik hingga display kanan sudah tidak berkedip.

Mengatur set value ini adalah langkah penting dalam kalibrasi sensor untuk memastikan bahwa sensor dapat mendeteksi perubahan intensitas cahaya yang terjadi dengan akurasi tinggi dan memberikan nilai yang konsisten ketika dilakukan pengambilan data. Dalam penelitian ini, set value pada sensor BF5R memungkinkan penyesuaian tingkat sensitivitas sensor terhadap intensitas cahaya yang diterima dalam optimalisasi pendeteksian logam berat seperti Cd. Selain itu, kalibrasi ini mencegah kesalahan dalam pembacaan yang bisa disebabkan oleh gangguan eksternal atau fluktuasi kecil dalam cahaya sekitar.

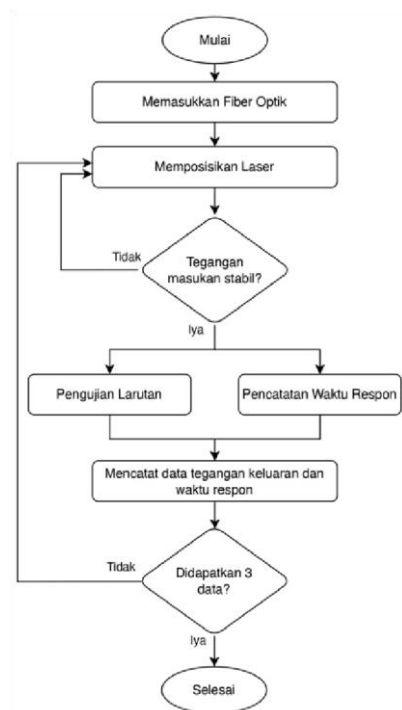


Gambar 5. Kalibrasi Suhu

Pada **Gambar 5** menunjukkan kalibrasi suhu sebelum melakukan pengujian sampel. Kalibrasi suhu pada sampel larutan Cd diperlukan agar dapat memperoleh data yang lebih akurat dan terhindar dari fluktuasi dalam pengujian. Walaupun pada dasarnya fiber optik cukup tahan dengan perubahan suhu dan pH larutan, namun tetap disarankan untuk menggunakan suhu sampel yang terkontrol dan pelarut dengan pH 0 (aquadest). Aquadest merupakan air murni yang terbebas dari ion-ion dan mineral sehingga dapat memberikan hasil pembacaan sensor yang akurat tanpa adanya kontaminasi dari zat yang tidak diinginkan. Apabila terdapat fluktuasi suhu, maka akan menyebabkan terjadinya perubahan indeks bias dari larutan ke fiber optik sehingga nantinya akan mempengaruhi intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh fiber optik. Apabila terdapat perubahan panjang gelombang dan frekuensi cahaya maka akan mempengaruhi nilai loss yang dihasilkan. Oleh karena itu, suhu perlu dikontrol untuk meminimalisir tingkat loss dari data yang dihasilkan. Suhu yang dikontrol pada penelitian ini yaitu $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

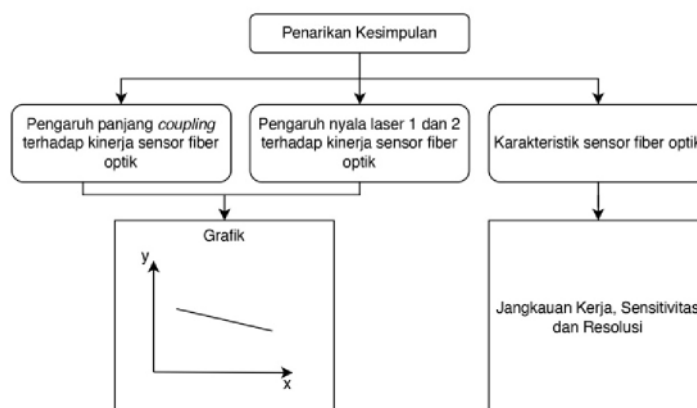
D. Teknik Pengambilan Data

Gambar 6 memperlihatkan rangkaian tahapan dalam proses pengambilan data, yang dimulai dengan merangkai core fiber optik hingga membentuk sebuah *Directional Coupler* di dalam wadah akrilik. Setelah rangkaian tersusun rapi, salah satu ujung fiber bagian terluar dimasukkan ke lubang atas pada laser BF4R, sementara ujung fiber lainnya disambungkan ke lubang bawah pada sensor laser BF5R untuk mengukur intensitas cahaya yang terdeteksi hingga nilai keluarannya benar-benar stabil. Ketika intensitas telah mencapai kondisi mantap, pengujian larutan sampel dilakukan sesuai variasi konsentrasi yang telah ditentukan sebelumnya dengan meneteskan larutan tepat di tengah area coupling. Selama proses tersebut, perubahan respon intensitas keluaran secara real-time dapat diamati pada layar display BF5R. Pengamatan ini bertujuan untuk mengetahui seberapa lama alat membutuhkan waktu hingga intensitas mencapai kondisi stabil pada setiap variasi sampel yang diuji.



Gambar 6. Tahapan Pengambilan Data Setiap Konsentrasi Kadmium

E. Penarikan Kesimpulan



Gambar 7. Pengolahan Data dan Analisis Data

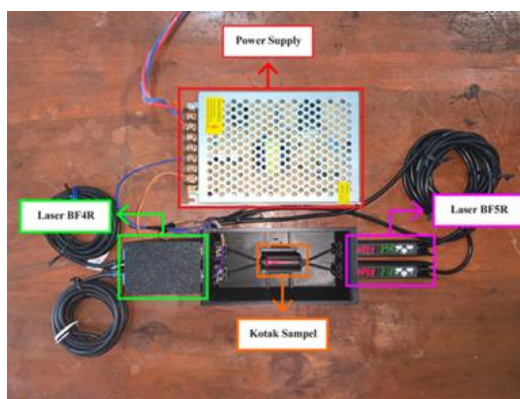
Pada tahap ini, akan ditemukan hasil akhir dari analisis data guna merumuskan jawaban final yang tepat terhadap permasalahan yang telah dirumuskan. Tahap ini dilakukan dengan mengkorelasikan antara pernyataan dari penelitian sebelumnya dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan dalam penelitian ini. Secara garis besar, tahap penarikan kesimpulan digambarkan pada **Gambar 7**.

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Rancangan alat yang digunakan dalam menunjang penelitian ini yaitu, dua unit laser BF4R, dua unit sensor BF5R, dua unit *power switch*, dan *power supply* 24 V. Laser BF4R menembakkan cahaya berwarna merah dengan panjang gelombang 660 nm. Panjang gelombang tersebut sangat optimal dalam mendukung penelitian ini karena laser merah memiliki keunggulan berupa minimnya gangguan transmisi dibandingkan laser hijau dan biru. Laser hijau dan biru memiliki panjang gelombang yang lebih rendah sehingga dibutuhkan frekuensi dan energi yang lebih besar (Khaire dkk., 2024). Penggunaan energi yang besar dapat menyebabkan fiber menjadi meleleh karena fiber yang digunakan dalam penelitian ini berbahan plastik.

Untuk menunjang perolehan data yang akurat, maka digunakan sensor BF5R. Sensor BF5R memiliki sensitifitas tinggi terhadap menangkap perubahan spektrum warna dan panjang gelombang yang dipancarkan ketika mendeteksi sebuah objek. Semua alat-alat tersebut disusun rapih dalam *box* yang didesain menggunakan *Thinkercad* dan dicetak menggunakan *3D Print* dengan bahan filamen PLA berwarna hitam. Pemilihan filamen ini bertujuan agar cahaya yang ditangkap sensor pada sampel dapat dideteksi secara maksimal dan meminimalisir kebocoran cahaya lain dari luar *box*. Hasil yang terbaca oleh sensor BF5R dapat dilihat pada *display* berupa intensitas cahaya. Hasil intensitas yang ditampilkan pada sensor BF5R dapat mendeteksi secara akurat apabila terdapat perpindahan cahaya pada interaksi dari gelombang *evanescent* yang terjadi pada *coupling* kedua fiber optik.



Gambar 8. Rangkaian Sistem Alat Deteksi Cadmium

Berdasarkan penelitian dengan rancangan sistem deteksi kadmium seperti pada Gambar 8, dan dengan penggunaan sampel larutan Cd dengan konsentrasi 0,05 ppm, didapatkan hasil seperti **tabel 1**.

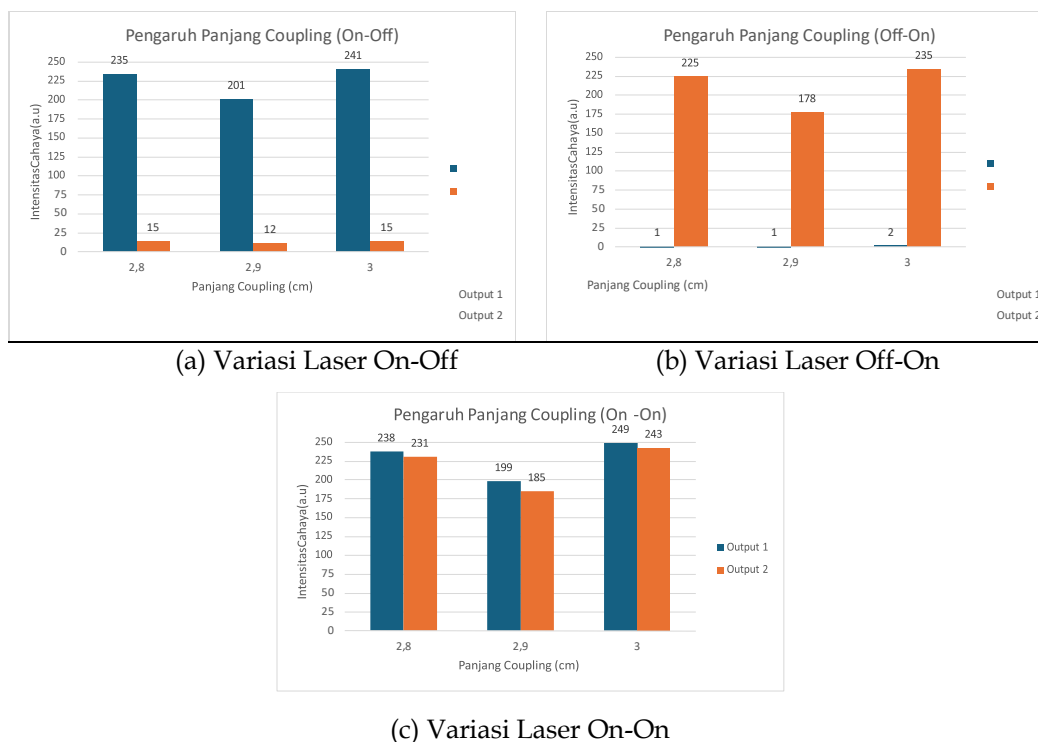
Tabel 1. Pengujian Pengaruh Panjang *Coupling* terhadap Intensitas Sensor Fiber Optik dengan Variasi Konfigurasi

Panjang <i>Coupling</i> (cm)	Variasi Laser		Intensitas Sensor (a.u)		Intensitas Awal (a.u)		LoD (ppm)	
	A	B	I_1	I_2	I_{01}	I_{02}	LoD_1	LoD_{11}
2,8	ON	OFF	0,05	235	15	245	0,012	0
	OFF	ON	1	231	3	245	0	0,016
	ON	ON	240	232	246	248	0,045	0,047
2,9	ON	OFF	201	12	210	9	0,008	0
	OFF	ON	1	178	4	204	0	0,010
	ON	ON	199	185	212	208	0,031	0,026
3,0	ON	OFF	241	15	247	3	-0,004	0
	OFF	ON	2	235	1	248	0	0,027
	ON	ON	249	243	240	231	0,246	0,066

Tabel 1 menunjukkan data intensitas sensor yang diperoleh dari penelitian yang menguji sensitivitas terhadap fiber optik yang dimodifikasi *Directional Coupler* dan pengaruh panjang *coupling* pada pengujian deteksi larutan Cd dengan konsentrasi (0,05 ppm) terhadap intensitas sensor fiber optik (BF5R) serta variasi konfigurasi laser yang berbeda-beda di tiap panjang *coupling*-nya. Data diatas menunjukkan perbedaan intensitas di tiap panjang *coupling*, dimana panjang *coupling* 3,0 cm merupakan yang paling optimal, terutama di konfigurasi variasi laser (ON-OFF) dengan intensitas Sensor 1 (I_1) dan Intensitas Sensor 2 (I_2) berturut-turut sebesar 241 dan 15. Intensitas tersebut merupakan yang paling besar apabila dibandingkan dengan panjang *coupling* 2,8 cm dan 2,9 cm. Dari keseluruhan tabel data tersebut menunjukkan bahwa di tiap panjang *coupling*nya, variasi laser yang paling menunjukkan intensitas yang besar, yang menjadi indikator sensitivitas

tinggi terhadap logam kadmium merupakan variasi laser dengan konfigurasi (ON-OFF). Kemudian untuk variasi laser dengan konfigurasi (ON-ON) mengalami peningkatan dari Intensitas awal dikarenakan dari kedua fiber optik (ON-ON) saling mentransfer daya dan memiliki daya intensitasnya sendiri sehingga hal tersebut mengakibatkan peningkatan nilai intensitas jika dibandingkan intensitas awalnya (I_0).

B. Pembahasan



Gambar 9. Pengaruh Panjang *Coupling* terhadap Intensitas Cahaya di Tiap Variasi Laser

Pada Gambar 9 menunjukkan pengaruh panjang *Coupling* pada fiber optik yang diaplikasikan dengan metode *Directional Coupler* dalam mendeteksi logam Cd pada suatu larutan. Pada Gambar 9(a) menunjukkan bahwa intensitas panjang *Coupling* 3,0 cm lebih tinggi dibandingkan panjang *Coupling* lainnya, yaitu sebesar 241, yang menandakan panjang *Coupling* tersebut merupakan panjang *Coupling* yang paling optimal dibandingkan yang lainnya. Banyaknya cahaya yang berpindah dari fiber satu ke fiber yang lainnya dapat dilihat pada *Output 2*, dimana panjang *Coupling* 3,0 cm mendeteksi intensitas yang berpindah sebesar 15 sehingga lebih tinggi dibandingkan dengan panjang *Coupling* lainnya. Hal tersebut juga memperkuat bahwa panjang *Coupling* yang optimal dan memiliki nilai perpindahan intensitas dari fiber satu ke lainnya yang lebih tinggi. Hal tersebut juga dapat didukung dengan perhitungan panjang moda gelombang *evanescent* secara *Directional Coupler* dengan persamaan:

$$l_c^{PM} = \frac{\pi}{2|k|} \quad (1)$$

$$n = \frac{l}{(2 \times l_c^{PM})} - \frac{1}{2} \quad (2)$$

dimana pada fiber optik *Directional Coupler* simetris terdapat mode ganjil dan juga genap. Pada mode genap, kedua gelombang di dalam dua fiber beresilasi secara sinkron (*in-phase*). Dalam kondisi ini, energi cenderung tetap tersebar di kedua fiber secara merata. Tidak ada transfer penuh ke fiber lainnya, namun terdapat pembagian energi di kedua *waveguide* yang berdampak pada perpindahan cahaya di mode genap cenderung tetap dalam fiber asal, dikarenakan interaksi medannya tetap dalam fase sinkron yang menjaga energi kembali ke fiber asal.

Sedangkan pada mode ganjil, kedua gelombang di dalam dua fiber beresilasi secara anti-sinkron (*out-of-phase*). Dalam kondisi ini total pembentukan medan *evanescent* yang kuat dapat menyebabkan transfer daya penuh dari satu fiber ke fiber lainnya yang berdampak pada perpindahan cahaya di mode ganjil cenderung berpindah antar fiber karena perbedaan fase menciptakan interaksi yang memungkinkan energi ditransfer secara efektif melalui gelombang *evanescent*. Pada Gambar 9(a), panjang *Coupling* 2,8 cm dan 3 cm merupakan *Directional Coupler* mode ganjil sesuai dengan perhitungan pada lampiran 1, yang mengartikan bahwa pada panjang *coupling* tersebut banyak memungkinkan terjadinya perpindahan cahaya dari fiber satu ke yang lainnya, sehingga pada *Output 2 (OFF)* menghasilkan nilai intensitas yang lebih tinggi yaitu sebesar 15 masing-masing dibandingkan intensitas *Output 2* pada panjang *coupling* 2,9 (mode genap) sebesar 12.

Kemudian pada Gambar 9(b), Panjang *Coupling* yang paling optimal merupakan 3,0 cm dikarenakan memiliki intensitas *Output 1 (OFF)* yang lebih tinggi dibandingkan panjang *Coupling* yang lain yaitu sebesar 2, dan untuk intensitas *Output 2 (ON)* juga tertinggi yaitu sebesar 235. Nilai intensitas pada *Output 1 (OFF)* cenderung minim atau mendekati nol dikarenakan terdapat perbedaan karakteristik tekstur pada fiber optik sehingga, pada fiber optik tersebut cenderung kurang sensitif dalam menerima gelombang cahaya yang mengalami pembentukan medan *evanescent* yang kuat dan perbedaan fase gelombang. Nilai intensitas yang cenderung minim juga dapat terjadi apabila kedua fiber optik dari *Output 1* dan *Output 2* tidak memiliki bentuk geometri yang sama apabila diberlakukan *Directional Coupler* maka perpindahan cahaya tidak secara sempurna berpindah yang mengakibatkan sensor BF5R kurang menerima intensitas cahaya yang dibaca dan berakhir nilai intensitas yang minim.

Selanjutnya pada Gambar 9(c), ketika laser BF4R dinyalakan secara bersamaan, fiber optik 1 lebih memiliki intensitas yang tinggi dibandingkan fiber optik 2, terlihat dari beberapa panjang *coupling*, fiber optik 1 secara keseluruhan memiliki nilai intensitas cahaya yang lebih tinggi dibandingkan fiber optik 2. Namun perbedaan diantara keduanya tidak terlalu signifikan dan relatif berada pada rentang nilai yang berdekatan dan presisi. Terlihat bahwa panjang *Coupling* 3,0 cm merupakan panjang *coupling* yang paling optimal dibandingkan yang lainnya, dikarenakan memiliki intensitas yang tinggi dan secara perhitungan berada pada *Directional Coupler* mode ganjil, yang memungkinkan fiber optik memiliki medan *evanescent* yang dinamis dan kuat untuk mengalami interferensi gelombang *evanescent* pada fiber optik.

Selain perbandingan panjang *coupling*, penting untuk membahas karakteristik sensor yang digunakan, khususnya laser BF5R, apabila dibandingkan dengan sensor yang digunakan pada penelitian Hidayat sudarsono dan yudoyono (Hidayat dkk., 2019). Pada penelitian ITS, BF5R digunakan dalam sistem *Directional Coupler* untuk mendeteksi konsentrasi NaCl dengan rentang indeks bias yang relatif lebih besar (0–12%), dan perangkat tersebut menunjukkan performa yang sangat stabil dengan kemampuan membedakan perubahan konsentrasi hanya berdasarkan perubahan intensitas yang ditangkap detektor. Hal ini menunjukkan bahwa BF5R memiliki repeatabilitas tinggi, *drift* intensitas rendah, serta respon analog yang linier, sehingga mampu mendukung pengukuran optik pada media yang perubahan sifat optiknya cukup ekstrem. Dalam penelitian ini, perangkat BF5R menunjukkan performa yang bahkan lebih kritis, karena sensor *Directional Coupler* digunakan untuk mendeteksi perubahan indeks bias yang jauh lebih kecil, yakni perubahan akibat variasi konsentrasi Cd^{2+} pada rentang 0,05–0,15 ppm. Perubahan indeks bias pada larutan kadmium berada pada skala mikro ($\approx 10^{-4}$), sehingga perangkat deteksi harus mampu merekam fluktuasi intensitas optik yang sangat halus. Penggunaan BF5R dalam penelitian ini terbukti mampu menangkap perubahan-perubahan kecil tersebut, sebagaimana terlihat dari perbedaan nilai desibel *coupling* yang konsisten pada setiap variasi panjang *coupling* dan konfigurasi laser. Hal ini membuktikan bahwa BF5R tidak hanya memiliki sensitivitas yang memadai untuk perubahan optik yang besar, seperti pada larutan NaCl, tetapi juga memadai secara sensitivitas untuk mendeteksi perubahan optik yang jauh lebih kecil seperti pengaruh variasi konsentrasi Cd^{2+} dalam larutan air minum.

Perbandingan kedua penelitian menunjukkan bahwa BF5R memiliki fleksibilitas spektral dan stabilitas intensitas yang sangat baik pada panjang gelombang 660 nm, yang merupakan salah satu faktor utama efektivitas sensor *Directional Coupler*. Pada kedua penelitian, *stability factor* BF5R yang tinggi (*noise* rendah dan tidak memerlukan *temperature compensation* kompleks) memungkinkan efisiensi *coupling* dapat dianalisis

tanpa gangguan sinyal eksternal yang berlebihan. Keunggulan ini semakin menonjol bila dibandingkan dengan penelitian lain yang menggunakan OPM (*Optical Power Meter*) atau sumber laser inframerah pada panjang gelombang 1310–1550 nm, di mana instrumen tersebut memang memiliki akurasi tinggi namun membutuhkan kalibrasi lebih ketat dan cenderung lebih sensitif terhadap fluktuasi termal pada fiber (Sun, 2023). BF5R hanya memerlukan catu daya sederhana dan tidak membutuhkan *stabilizer* optik tambahan, sehingga lebih mudah digunakan untuk *real-time sensing* pada sistem Directional Coupler seperti pada penelitian ini.

Validasi mengenai hasil sensor berdasarkan analisa kadmium pada penelitian ini dapat diamati melalui perubahan intensitas keluaran sensor laser BF5R. Dimana semakin tinggi konsentrasi larutan kadmium, semakin kecil intensitas sensor yang diperoleh. Penurunan intensitas ini menunjukkan bahwa medan evanescent pada daerah kopling semakin banyak berinteraksi dengan medium larutan, sehingga kehilangan optik (*optical loss*) meningkat seiring bertambahnya jumlah ion Cd^{2+} . Hal ini sejalan dengan teori propagasi gelombang pada *directional coupler*, di mana perubahan indeks bias eksternal akibat kehadiran ion logam berat akan memodifikasi kondisi kopling antar inti, menurunkan efisiensi perpindahan energi cahaya, dan menghasilkan nilai desibel *coupling* yang semakin negatif. Konsistensi pola penurunan intensitas BF5R terhadap kenaikan konsentrasi Cd^{2+} menjadi indikator bahwa sensor telah berfungsi sebagai *intensitybased chemical sensor* dengan karakteristik respons yang stabil. Pada penelitian ini, nilai desibel *coupling* menunjukkan hubungan linier terhadap konsentrasi kadmium, yang ditunjukkan oleh kemiringan sensitivitas yang jelas serta koefisien determinasi (R^2) yang tinggi. Tren linier tersebut merupakan bentuk validasi internal yang penting karena memperlihatkan bahwa sensor mampu membedakan tiap kenaikan konsentrasi kadmium secara terukur. Respons BF5R yang menurun secara konsisten juga memperkuat bahwa sinyal optik yang terekam berasal dari interaksi optik antara gelombang evanescent dan sifat optik larutan, bukan dari *noise* atau fluktuasi acak. Temuan ini sekaligus mengonfirmasi bahwa sensor directional coupler dengan sumber laser BF5R memiliki kemampuan memadai untuk mendeteksi perubahan indeks bias akibat penambahan ion Cd^{2+} dalam rentang konsentrasi rendah. Respons optik yang stabil, linier, dan dapat direproduksi menunjukkan bahwa sensor dapat dipercaya untuk analisa awal kadar kadmium pada media cair, dan menjadi dasar validasi teknis yang relevan dalam konteks sensor berbasis perambatan cahaya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menggarisbawahi pentingnya pemilihan panjang *coupling* yang tepat dalam aplikasi Directional Coupler fiber optik. Panjang *coupling* 3,0 cm cenderung memberikan performa terbaik dalam semua variasi laser, yang disebabkan oleh kemampuan sistem untuk bekerja pada mode ganjil, di mana interaksi gelombang *evanescent* lebih dinamis dan efisien. Efek ini memperlihatkan bagaimana mode ganjil pada panjang *coupling* yang lebih besar meningkatkan sensitivitas sensor dalam mendeteksi larutan Cd melalui peningkatan perpindahan cahaya antara kedua fiber, sementara mode genap lebih membatasi transfer energi antar fiber optik, yang berdampak pada intensitas yang lebih rendah.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang dijabarkan, dapat ditarik kesimpulan bahwa panjang *coupling* berpengaruh terhadap intensitas sensor fiber optik dalam efisiensi *coupling* yang nantinya akan mempengaruhi intensitas cahaya yang tertangkap oleh sensor fiber optik. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa panjang *coupling* 3,0 cm merupakan yang paling optimal, karena memiliki mode ganjil yang dimana pada Directional Coupler fiber optik merupakan mode yang memiliki efisiensi yang tinggi dibandingkan mode genap. Dimana panjang ini mendukung terjadinya perbedaan fase yang maksimal, sehingga meningkatkan interaksi optik dan menghasilkan intensitas sinyal yang lebih besar dibandingkan panjang *coupling* lainnya. Kemudian pada penelitian ini, menunjukkan bahwa konfigurasi variasi laser yang paling optimal merupakan konfigurasi fiber optik (ON-OFF), hal tersebut menunjukkan bahwa jumlah dan arah penyinaran cahaya menentukan kekuatan gelombang *evanescent* dan tingkatan transfer energi antar fiber.

B. Saran

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, beberapa langkah pengembangan dan optimalisasi yang dapat dilakukan adalah dengan penetapan mode panjang *coupling* sebelum eksperimen agar dapat memastikan efisiensi transfer daya antar fiber, kemudian dengan menggunakan reagen pendukung untuk meningkatkan respon sensor terhadap kadmium karena dapat memperkuat interaksi antara medan *evanescent* dan larutan uji, penggunaan fiber optik berbahan kaca sebagai alternatif rekomendasi yang lebih presisi dan tahan terhadap kesalahan pengupasan cladding, sehingga dapat mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan efisiensi propagasi cahaya antar *core* fiber.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar Dwiputra, M. (2021). *Analisis Structure-Conduct-Performance (SCP) dan Efisiensi Internal Pada Industri Air Minum dan Mineral Dalam Kemasan di Indonesia*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13538.86723>
- Akhtar, N., Syakir Ishak, M. I., Bhawani, S. A., & Umar, K. (2021). Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. In *Water* (Vol. 13, Nomor 19). <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Anshar, A. R., Maheshwari, H., & Darusman, H. (2021). Assessment of heavy metal pollution in lung and kidney of broiler and it's correlation of water and animals feed. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 870, 12012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/870/1/012012>
- Bhowmik, T., & Sikdar, D. (2022). Parallel directional coupler based dual-polarization electro-absorption modulator using epsilon near-zero material. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(13), 135107. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4455>
- Hidayat, T., Sudarsono, S., & Yudoyono, G. (2019). Sensor Fiber Optik Plastik Berstruktur Directional Coupler untuk
- Mengukur Konsentrasi Larutan NaCl. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 8(1), 7–10. <https://doi.org/10.12962/j23373520.v8i1.42186>
- Khaire, P. B., Barai, V. N., Patwardhan, M. S., Nandgude, S. B., & Atre, A. A. (2024). Performance Evaluation of Green and Red Lasers in Long-Distance Optical Sensing Using Light Dependent Resistors. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(12 SE-Original Research Article), 383–390. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i122682>
- Kumar, A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Cabral-Pinto, M. M. S., Shabnam, A. A., Jigyasu, D. K., Malyan, S. K., Fagodiya, R. K., Khan, S. A., Kumar, A., & Yu, Z.-G. (2021). Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources. *Chemosphere*, 268, 128855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128855>
- Li, Y., Yu, X., Qu, T., Ng, J., Lin, Z., Zhang, L., & Chen, J. (2023). Optomechanical effects caused by non-zero field quantities in multiple evanescent waves. *Optics Express*, 31(26), 44004–44018. <https://doi.org/10.1364/OE.506758>
- Pujiyanto, Samian, Yasin, M., Na'imah, S., Trilaksana, H., & Supadi. (2020a). The detection of cadmium ion level in distilled water using 532 nm laser light based on the optical fiber spectrometry. *AIP Conference Proceedings*, 2314(1), 30007. <https://doi.org/10.1063/5.0034080>
- Pujiyanto, Samian, Yasin, M., Na'imah, S., Trilaksana, H., & Supadi. (2020b). The detection of lead ion level in distilled water using 405 nm laser light and optical probe based on the Directional coupler. *Moroccan Journal of Chemistry*, 2351, 99–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v8i1.19130>
- Rahayu, A., & Harmadi, H. (2020). Rancang Bangun Alat Ukur Konsentrasi Logam Berat Timbal Berbasis Sensor Serat Optik Evanescent dengan Cladding Kitosan. *Jurnal Fisika Unand*, 9(1), 17–23. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.1.17-23.2020>
- Rasheed, T., Bilal, M., Nabeel, F., Iqbal, H. M. N., Li, C., & Zhou, Y. (2018). Fluorescent sensor based models for the detection of environmentally-related toxic heavy metals. *Science of The Total Environment*, 615, 476–485. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.126>
- Ren, Z., Huang, Z., Wang, F., Wu, J., Zhou, J., Wang, Z., Zhang, Y., Wang, Z., Dong, J., Liu, D., Li, C., Zhao, T., Zhou, W., Peng, W., & Shen, C. (2023). Tilted fiber Bragg grating surface plasmon resonance based optical fiber cadmium ion trace detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 393, 134247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134247>
- Shen, T., Yang, T., Feng, Y., Liu, X., Liu, C., Yuan, W., Wu, H., & Wang, C. (2024). Fiber optic cadmium ion

- sensors based on functionalization of a magnetic ion-imprinted polymer. *Analyst*, 149(8), 2236–2243. <https://doi.org/10.1039/D3AN02067C>
- Simatupang, J. W., Syamsuri, F., Bramasto, R., Anam, F. C., & Ardanta, R. H. Y. (2022). Analisis Perhitungan Kerugian Daya pada Lendutan Serat Optik dengan Simulasi Matlab. *Tesla*, 24(1), 13–24. <https://doi.org/10.24912/tesla.v24i1.15371>
- Solomonea, B.-G., Jinga, L.-I., Antohe, V.-A., Socol, G., & Antohe, I. (2022). Cadmium Ions' Trace-Level Detection Using a Portable Fiber Optic–Surface Plasmon Resonance Sensor. In *Biosensors* (Vol. 12, Nomor 8). <https://doi.org/10.3390/bios12080573>
- Sun, J. (2023). Design and research of wireless optical power meter based on IoT big data and physical quantity. *Results in Physics*, 54, 107045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107045>
- Tamayo-Belda, M., Vargas-Guerrero, J. J., Martín-Betancor, K., Pulido-Reyes, G., González-Pleiter, M., Leganés, F., Rosal, R., & Fernández-Piñas, F. (2021). Understanding nanoplastic toxicity and their interaction with engineered cationic nanopolymers in microalgae by physiological and proteomic approaches. *Environmental Science: Nano*, 8(8), 2277–2296. <https://doi.org/10.1039/D1EN00284H>
- Wang, H., Da, L., Yang, L., Chu, S., Yang, F., Yu, S., & Jiang, C. (2020). Colorimetric fluorescent paper strip with smartphone platform for quantitative detection of cadmium ions in real samples. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122506>
- Yulianti, I., Putra, N. M. D., Masturi, Albadiah, I. V., Pratiwi, D. A., & Akmalia, N. (2018). Characterization of sensitivity and response time of plastic optical fibre sensor to cadmium ion. *Journal of Physics: Conference Series*, 983(1), 12013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/983/1/012013>