

SENSOR SERAT OPTIK BERBASIS GELOMBANG EVANSECENT: PENDEKATAN BARU UNTUK DETEKSI KONSENTRASI BPA DALAM AIR

¹⁾Safira Adara Khairunnisa, ²⁾Meta Yantidewi, ³⁾Muhimmatul Khoiro

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: safira.20052@mhs.unesa.ac.id

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

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

Abstrak

Kontaminasi air minum dalam kemasan dengan Bisphenol-A (BPA) merupakan isu ekologis yang krusial, karena BPA dapat meresap dari tutup botol plastik atau dari kontaminasi air sebelum pengemasan. BPA digunakan sebagai monomer dalam polikarbonat dan resin epoksi, yang memiliki potensi dampak kesehatan serius seperti gangguan sistem endokrin, saraf, kardiovaskular, dan reproduksi. Penelitian ini memperkenalkan metode deteksi baru menggunakan sensor serat optik berbasis gelombang *evanescent* untuk mengukur BPA dalam air. Sensor serat optik tanpa *cladding*, tanpa reagen, memungkinkan deteksi BPA secara langsung, meningkatkan sensitivitas dan kecepatan deteksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor serat optik *multimode* menghasilkan data yang konsisten dan pola linear, dengan nilai R^2 yaitu 0,8613, menunjukkan kemampuan model regresi menjelaskan sebagian besar variasi data. Sebaliknya, serat optik *singlemode* menunjukkan fluktuasi signifikan dengan nilai R^2 sebesar 0,00175, menunjukkan ketidakmampuan model menjelaskan variasi data. Penerapan sensor serat optik ini menawarkan solusi efisien untuk pemantauan kualitas air dan kesehatan masyarakat.

Kata Kunci: Bisphenol-A (BPA), Sensor Serat Optik, Gelombang Evanescent

Abstract

The contamination of drinking water with Bisphenol-A (BPA) is a critical ecological issue, as BPA can leach from plastic bottle caps or be present in water prior to packaging. BPA, used as a monomer in polycarbonate and epoxy resins, poses significant health risks, including disruptions to the endocrine, neurological, cardiovascular, and reproductive systems. This study introduces a novel detection method employing evanescent wave-based optical fiber sensors to measure BPA in water. Unclad, reagent-less optical fibers enable direct BPA detection, enhancing both sensitivity and speed. Results indicate that multimode optical fiber sensors provide consistent, linear data with an R^2 value of 0.8613, demonstrating the regression model's ability to explain most data variations. In contrast, single-mode optical fibers exhibit significant fluctuations with an R^2 value of 0.00175, indicating the model's inability to explain data variations. The implementation of these optical fiber sensors offers an efficient solution for water quality monitoring and public health assurance.

Keywords: Bisphenol-A (BPA), Optical Fiber Sensors, Evanescent Wave

I. PENDAHULUAN

Isu ekologis global yang krusial adalah kontaminasi air minum dalam kemasan dengan Bisphenol-A (BPA) (Abu Hasan et al., 2023; Mishra et al., 2023). Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi kontaminasi BPA dalam botol plastik PET, yang menunjukkan potensi BPA berasal dari peresapan melalui tutup botol atau dari kontaminasi air sebelum dikemas (Abu Hasan et al., 2023; da Silva Costa et al., 2021). BPA atau 4,4'-dihidroksi-2,2-difenilpropana adalah senyawa yang terdiri dari dua cincin fenolik yang dihubungkan oleh atom karbon dengan dua gugus $-CH_3$ (Nandi & Roy, 2023). BPA digunakan terutama sebagai monomer dalam polikarbonat atau resin epoksi (Rogers, 2024).

Dalam upaya menangani kontaminasi botol plastik, BPA dianggap sebagai perhatian utama karena keberadaannya yang luas dan potensi implikasi kesehatannya. Sangat penting untuk menentukan ambang batas konsumsi yang aman dan bahaya kesehatan terkait BPA. Peningkatan kesadaran publik tentang batas aman konsumsi BPA sangat diperlukan, mengingat keberadaannya yang meluas dalam berbagai produk plastik. Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) telah menetapkan batas aman BPA sebesar 0,6 ppm sesuai dengan Peraturan Badan POM Nomor 20 tentang Kemasan Pangan (Pusat Data dan Informasi Obat dan Makanan, 2022). Bahkan dalam level yang dianggap aman oleh standar yang ada, paparan BPA dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan (Artha et al., 2023; Sonavane & Gassman, 2019). Dampak toksisitas BPA mencakup gangguan pada sistem endokrin, saraf, kardiovaskular, dan reproduksi (Lam et al., 2011).

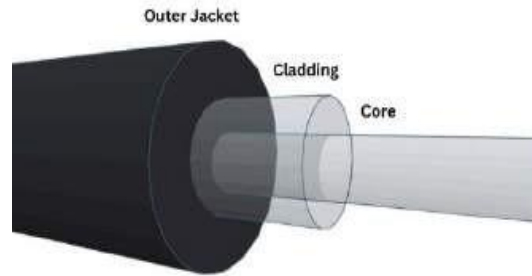
Dengan meningkatnya kesadaran tentang keberadaan BPA yang meluas dalam produk plastik, menjadi penting untuk mengeksplorasi metode deteksi dan pengukuran BPA. Teknik deteksi yang ada, seperti *high-performance liquid chromatography* (Han et al., 2023), *chromatography-mass spectrometry* (Bojke et al., 2023), dan *surface-enhanced Raman scattering* (Yin et al., 2018), menawarkan selektivitas dan batas deteksi yang signifikan. Namun, kelemahan dari teknik ini termasuk kebutuhan akan instrumen yang mahal dan rumit serta prosedur yang memakan waktu dan tenaga (Xiong et al., 2014). Oleh karena itu, studi ini memperkenalkan metode deteksi baru menggunakan sensor serat optik berdasarkan konsep gelombang *evanescent*. Dalam studi terbaru, konsep medan *evanescent* diterapkan untuk mendeteksi BPA dalam air ((Lam et al., 2011; Tajik et al., 2020). Sensor serat optik yang beroperasi berdasarkan prinsip propagasi gelombang *evanescent* menunjukkan kepraktisan dan efektivitas dalam berbagai aplikasi (Xiong et al. 2014). Sensor serat optik adalah pilihan praktis dan serbaguna untuk kebutuhan pemantauan dan penginderaan karena efektivitas biayanya dalam pembuatan dan kemampuan pemantauan *real-time* (Khoiro et al. 2023). Penelitian ini memperkenalkan pendekatan baru untuk mengukur BPA dalam air menggunakan sensor optik berbasis serat optik tanpa *cladding*. Sensor ini mampu mengukur konsentrasi BPA dengan akurat melalui pemanfaatan fenomena medan *evanescent*. Penggunaan inovatif serat optik tanpa *cladding* sebagai sistem penginderaan tanpa reagen memungkinkan kontak langsung dengan analit, secara signifikan meningkatkan sensitivitas dan kecepatan proses deteksi. Metode ini merupakan kemajuan signifikan dalam teknologi pemantauan lingkungan, menawarkan solusi yang kuat dan efisien untuk menilai kualitas air dan memastikan kesehatan masyarakat.

II. METODE

A. Pembuatan Sampel BPA

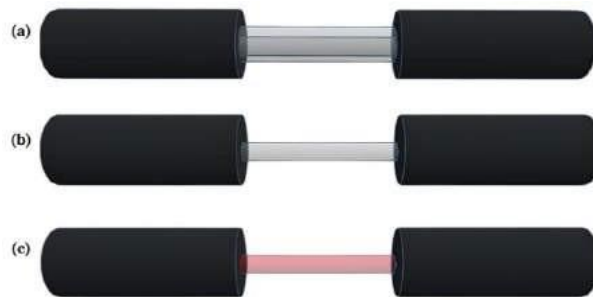
Bisphenol-A 98% dilarutkan dalam etanol dengan rasio 1:1 sebelum dilarutkan dalam air deionisasi. Air deionisasi digunakan sebagai pengencer untuk menghasilkan variasi konsentrasi BPA. Proses ini dilakukan sesuai dengan prinsip pengenceran, menghasilkan konsentrasi BPA yang berbeda dalam air (Gilbert-Kawai & Wittenberg, 2014).

B. Pembuatan Sensor Serat Optik tanpa *Cladding*



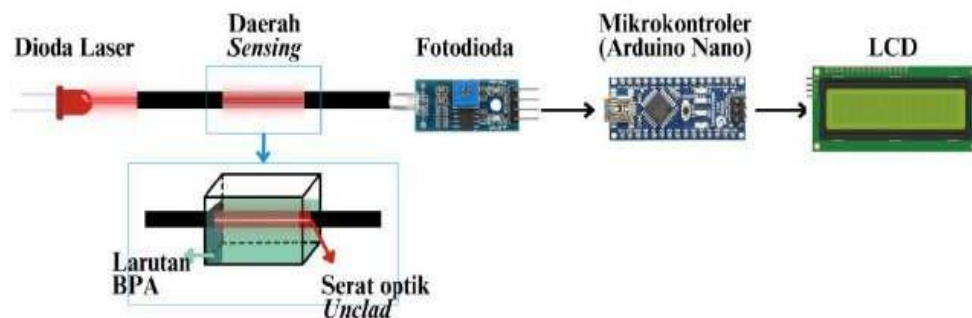
Gambar 1. Struktur Serat Optik

Serat optik *multimode* dan *singlemode* dikupas menggunakan teknik etsa kimia untuk menghilangkan *cladding*. Visualisasi terkait struktur serat optik ditunjukkan pada Gambar 1. Serat optik sepanjang 15 cm dikupas jaketnya sepanjang 1,5 cm di bagian tengah, seperti divisualisasikan pada Gambar 2(a). Proses etsa kimia dilakukan dengan merendam serat optik tanpa jaket dalam aseton selama 10 detik, kemudian segera direndam dalam air deionisasi untuk menghentikan reaksi aseton dengan *cladding* (Abd Rashid et al., 2022; Abdurrahman et al., 2015). Lapisan bertekstur halus yang terbentuk kemudian dihaluskan menggunakan amplas (Jaharudin et al., 2023). Setelah *cladding* dikupas, harapannya hanya ada inti dari serat optik, seperti divisualisasikan pada Gambar 2(b). Kualitas etsa dapat ditentukan oleh perubahan tegangan yang dicatat oleh sensor setelah merendam serat dalam air deionisasi (Khoiro et al., 2023). Selain itu, serat optik tanpa *cladding* akan membuat cahaya yang melewati inti dapat terlihat, seperti pada Gambar 2(c).



Gambar 2. Serat optik tanpa lapisan jaket: (a) terdapat *cladding*, (b) tanpa *cladding*, (c) saat terdapat cahaya laser

C. Desain Instrumentasi Serat Optik



Gambar 3. Desain Instrumentasi

Instrumen sensor serat optik yang ditampilkan pada Gambar 2 terdiri dari tiga komponen utama. Komponen pertama mencakup modul Pemancar Laser KY-008 merah 650 nm sebagai sumber cahaya, yang dihubungkan ke sumber daya arus searah (DC). Pemilihan panjang gelombang 650 nm dilakukan berdasarkan pertimbangan stabilitas yang mirip dengan penelitian sebelumnya. Selanjutnya, komponen kedua adalah bagian sensor yang terbuat dari serat optik tanpa *cladding*.

Komponen ketiga adalah bagian pengukuran sensor yang dirakit menggunakan modul sensor fotodioda dengan rentang tegangan operasi 3.3–5V. Fotodioda ini mendeteksi dan mengubah sinar laser menjadi arus listrik. Pada bagian akhir, fotodioda dihubungkan dengan Arduino Nano V3.0 At Mega 328P untuk memproses keluaran tegangan analog dari fotodioda dan menampilkan hasilnya pada layar LCD.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Kalibrasi Sensor

Sensor dikalibrasi menggunakan serat optik tanpa perlakuan. Ketika layar LCD menampilkan hasil konversi intensitas cahaya menjadi tegangan sebesar 4,8V, ini menunjukkan bahwa laser memancarkan cahaya yang sesuai dan fotodioda menerima intensitas yang tepat. Penurunan intensitas cahaya dari 5V menjadi 4,8V disebabkan oleh adanya *loss* intrinsik, yang diukur dalam desibel sebagai atenuasi intrinsik (α_i). Nilai atenuasi intrinsik pada serat optik yang digunakan adalah 0,35 dB.

Selain *loss* intrinsik, pengupasan *cladding* serat optik dengan panjang bervariasi juga mempengaruhi penurunan intensitas cahaya yang diterima oleh fotodioda. Penurunan ini diukur sebagai atenuasi ekstrinsik (α_e), yang terjadi ketika cahaya merambat melalui serat optik dengan daerah tanpa *cladding* di bagian tengah (Punjab et al., 2015). Hal ini menyebabkan kehilangan sinyal yang dikenal sebagai *loss* kupasan atau *loss* ekstrinsik. Fenomena ini mengakibatkan tegangan keluaran awal (V_1) yang dihasilkan oleh serat optik, dengan rata-rata V_1 sebesar 1760,86 mV untuk serat optik *multimode* dan 1562,21 mV untuk serat optik *singlemode*.

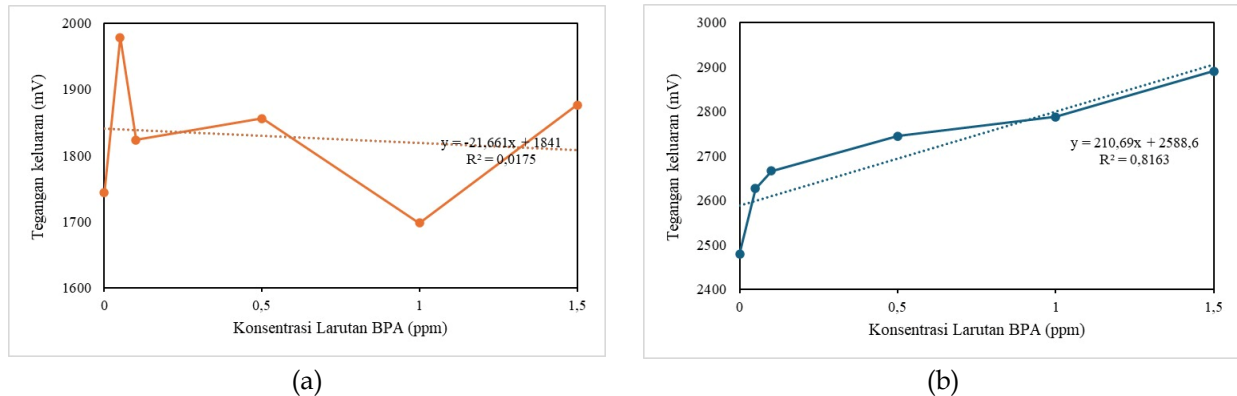
B. Pengujian Serat Optik

Tegangan keluaran akhir (V_2) diperoleh saat daerah *sensing* direndam dalam analit, merupakan hasil konversi intensitas cahaya oleh fotodioda setelah cahaya laser melalui serat optik yang telah diperlakukan. Grafik pada Gambar 1 menunjukkan perbandingan tegangan keluaran akhir dengan konsentrasi larutan BPA. Gambar 3(a) memperlihatkan data untuk serat optik *singlemode*, sementara Gambar 3(b) menunjukkan data untuk serat optik *multimode*. Hasil ini mengindikasikan sensitivitas serat optik terhadap variasi konsentrasi BPA, memungkinkan evaluasi efektivitas perlakuan serat optik dalam mendeteksi analit.

Tabel 1. Data percobaan pada sensor serat optik *singlemode* dan *multimode*

Jenis Serat	Konsentrasi (ppm)	V (mV)		t (s)
		V_1	V_2	
<i>Multimode</i>	0,00	1811,52	2479,9	27,37
	0,05	1718,75	2626,23	22,03
	0,50	1702,89	2666,02	20,17
	1,00	1777,34	2744,14	20,49
	1,50	1777,34	2788,09	21,05
	2,00	1777,34	2890,62	21,85
<i>Singlemode</i>	0,00	1557,45	1743,78	22,55
	0,05	1565,78	1978,91	25,37
	0,50	1553,23	1823,54	21,35
	1,00	1569,69	1856,21	19,48
	1,50	1557,45	1698,43	25,27
	2,00	1569,69	1876,78	13,37

Pada Tabel 1. juga memuat data waktu kerja (t). Waktu kerja merupakan periode yang diukur mulai dari saat daerah *sensing* terendam oleh sampel hingga nilai V_2 menunjukkan stabil pada layar LCD. Data tersebut menunjukkan fluktuasi dalam waktu kerja; meskipun demikian, rentangnya berada dalam rentang 13 hingga 27 detik.



Gambar 4. Plot Data Tegangan Keluaran berdasarkan Konsentrasi Larutan BPA: (a) serat optik *singlemode* dan (b) serat optik *multimode*

Pada eksperimen dengan serat optik *singlemode* untuk mendeteksi konsentrasi BPA dalam air, grafik yang dihasilkan menunjukkan fluktuasi yang signifikan. Nilai R^2 yang mendekati 0 menunjukkan bahwa model regresi tidak mampu menjelaskan variasi dalam data (Enders, 2024). Fenomena ini disebabkan oleh serat optik *singlemode* tanpa *cladding* yang mempengaruhi efisiensi transmisi sinyal, menyebabkan kehilangan sinyal yang signifikan dan ketidakstabilan. Dalam serat optik, *cladding* membungkus inti dan memiliki indeks bias yang lebih rendah, membantu memandu cahaya di dalam inti melalui refleksi internal total. Ketika *cladding* dikupas, pemanduan ini hilang, mengakibatkan penyebaran mode cahaya keluar dari inti, berkurangnya kekuatan sinyal, meningkatnya *loss*, dan penurunan kualitas sinyal secara keseluruhan.

Eksperimen dengan serat optik *multimode* menunjukkan data yang menghasilkan grafik dengan pola linear yang konsisten. Penambahan garis tren pada grafik ini menunjukkan pola linear dengan persamaan yang memberikan nilai R^2 . Nilai R^2 merupakan indikator sejauh mana model regresi mampu menjelaskan variasi dalam data. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model regresi mampu menjelaskan sebagian besar variasi dalam data tersebut (Enders, 2024). Peningkatan tegangan keluaran seiring dengan bertambahnya konsentrasi larutan BPA menunjukkan bahwa indeks bias juga meningkat, sehingga lebih efektif memandu cahaya yang melewati serat optik (Allsop et al., 2019). Indeks bias inti lebih tinggi daripada *cladding*, namun indeks bias analit lebih rendah daripada *cladding*. Meskipun pada konsentrasi analit tertinggi, cahaya belum sepenuhnya terkonsentrasi dalam inti, konsentrasi analit tetap mempengaruhi pemanduan cahaya dalam inti.

Penggunaan serat optik berbahan polimer menunjukkan kemampuan material ini untuk memantulkan dan membiaskan cahaya. BPA, sebagai senyawa kimia yang sering digunakan dalam pembuatan plastik polikarbonat, memiliki sifat larutan yang, dengan meningkatnya konsentrasi, menjadi mirip dengan sifat *cladding* serat optik polimer dalam hal kemampuannya memandu cahaya. Hal ini disebabkan oleh peningkatan indeks bias larutan BPA yang mendukung pemantulan dan pemanduan cahaya dalam serat optik tanpa *cladding* (Teng et al., 2021).

Tabel 2. Perbandingan metode yang diusulkan dengan metode yang digunakan pada studi terdahulu untuk mendeteksi BPA dalam air

Metode	λ (nm)	Konfigurasi	Reagen	Referensi
Serat Optik Aptasensor	635	Lurus	Ya	(Yildirim et al., 2014)
Sensor Serat Optik	276/306	Lurus	Ya	(Xiong et al., 2014)
Sensor Serat Optik	650	Lurus	Tidak	sekarang

Terdapat tinjauan dari studi terdahulu sebagai perbandingan dengan studi saat ini yang dapat terlihat pada Tabel 2. Penelitian oleh Yildirim et al. menggunakan aptasensor serat optik dengan panjang gelombang sumber cahaya 635 nm, menunjukkan efektivitas yang tinggi dengan memanfaatkan reagen berupa aptamer dan probe-DNA. Di sisi lain, Xiong et al. melakukan variasi pada *cladding* serat optik sepanjang 20 mm, menciptakan *lapisan Molecularly Imprinted Polymer* (MIP) di sekitar inti serat optik, dan menggunakan gelombang *evanescent* untuk deteksi BPA. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa reagen yang dilapisi di sekitar inti serat berperan penting dalam menarik dan mengidentifikasi material BPA.

Dalam penelitian ini, pendekatan yang diambil berbeda, yakni tanpa menggunakan reagen. Fokus utama adalah pada perubahan indeks bias analit yang mempengaruhi propagasi cahaya melalui serat optik, terutama gelombang *evanescent* yang berinteraksi langsung dengan analit. Studi ini menitikberatkan pada pengembangan sensor serat optik untuk mendeteksi konsentrasi BPA dengan biaya yang terjangkau dan proses fabrikasi yang sederhana. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan alternatif yang lebih efisien dan praktis dalam deteksi BPA, sekaligus memperluas aplikasi serat optik dalam bidang sensor kimia.

Sensor serat optik yang dikembangkan hanya mampu mendeteksi perubahan indeks bias larutan BPA, yang tidak cukup memberikan informasi lengkap tentang BPA. Oleh karena itu, penambahan reagen yang berinteraksi dengan BPA diperlukan untuk pengembangan lebih lanjut (Xiong et al., 2014). Selain itu, serat optik *singlemode* dalam studi ini belum menunjukkan reaksi yang konsisten. Perlakuan seperti *bending* dapat meningkatkan sensitivitas serat optik *singlemode* dibandingkan dengan penggunaan lurus (Khoiro et al., 2023), sehingga dapat menghasilkan data yang lebih stabil dan akurat dalam mendeteksi konsentrasi BPA.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji penggunaan serat optik *singlemode* dan *multimode* dalam mendeteksi konsentrasi BPA dalam air melalui pengukuran tegangan keluaran akhir (V_2). Hasil menunjukkan bahwa serat optik *multimode* menghasilkan data dengan pola linier yang konsisten, ditandai dengan nilai R^2 yang mendekati 1, yaitu 0,8613, yang menunjukkan kemampuan model regresi untuk menjelaskan variasi data secara signifikan. Peningkatan konsentrasi BPA meningkatkan indeks bias larutan, sehingga memudahkan pemanduan cahaya melalui serat optik. Sebaliknya, serat optik *singlemode* menunjukkan fluktuasi yang signifikan dan nilai R^2 yang mendekati 0, yaitu 0,8613, mengindikasikan bahwa model regresi tidak efektif dalam menjelaskan variasi data. Fenomena ini disebabkan oleh hilangnya *cladding* yang mengurangi efisiensi transmisi sinyal dan menyebabkan kehilangan sinyal yang signifikan. Meskipun sensor secara efektif mengukur konsentrasi BPA, sensor tersebut tidak memberikan analisis atau identifikasi material, sehingga diperlukan reagen yang dapat berinteraksi dengan BPA.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Rashid, N. C., Cholan, N. A., Tay, K. G., Yaacob, A., Sulaiman, N. I., Mokhiri, K., & Ngajikin, N. H. (2022). Optimization of light source wavelength for ammonia detection in water. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 20(5), 1132. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v20i5.24079>
- Abdurrahman, F., Arsad, I. D. N., Shaari, S., Ashrif, A., A Bakar, A. A., & Menon, P. S. (2015). Effects of cladding modification on the sensing potential of intrinsic polymer optical fiber as a VOCs sensor. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 17(5–6), 901–906.
- Abu Hasan, H., Muhamad, M. H., Budi Kurniawan, S., Buhari, J., & Husain Abuzeyad, O. (2023). Managing Bisphenol A Contamination: Advances in Removal Technologies and Future Prospects. *Water*, 15(20), 3573. <https://doi.org/10.3390/w15203573>
- Allsop, T. D. P., Neal, R., Wang, C., Nagel, D. A., Hine, A. V., Culverhouse, P., Ania Castañón, J. D., Webb, D. J., Scarano, S., & Minunni, M. (2019). An ultra-sensitive aptasensor on optical fibre for the direct detection of bisphenol A. *Biosensors and Bioelectronics*, 135, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.02.043>
- Artha, R. P., Anindita, S. F., & Iskandar, M. I. (2023). TREN PRODUKSI DAN KONSUMSI PLASTIK DI INDONESIA. <https://www.danareksa.co.id/storage/2023/other/641444d08d734.pdf>
- Bojke, A., Littwin, M., Szpiech, A., Duljas, E., Jasiński, P., Wittstock, I., Jażdżewska, O., & Galer-Tatarowicz, K. (2023). Determination of Bisphenol A (BPA) in the Port of Gdynia Waters Using Gas Chromatography Coupled with Mass Spectrometry (GC-MS). *Water*, 15(16), 2958. <https://doi.org/10.3390/w15162958>
- da Silva Costa, R., Sainara Maia Fernandes, T., de Sousa Almeida, E., Tomé Oliveira, J., Carvalho Guedes, J. A., Julião Zocolo, G., Wagner de Sousa, F., & do Nascimento, R. F. (2021). Potential risk of BPA and phthalates in commercial water bottles: a minireview. *Journal of Water and Health*, 19(3), 411–435. <https://doi.org/10.2166/wh.2021.202>
- Enders, F. B. (2024, May 9). coefficient of determination. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/coefficient-of-determination>
- Gilbert-Kawai, E. T., & Wittenberg, M. D. (2014). The dilution principle – measurement of fluid compartment volume. In E. T. Gilbert-Kawai & M. D. Wittenberg (Eds.), *The dilution principle – measurement of fluid compartment volume. In Essential Equations for Anaesthesia: Key Clinical Concepts for the FRCA and EDA* (pp. 114–114). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139565387.058>
- Han, X., Zhao, R., Tian, Y., Li, Y., Chen, X., Ma, J., Wang, W., Zhang, Y., Geng, S., & Liu, M. (2023). Simple high-performance liquid chromatography-ultraviolet method for simultaneous separation and detection of 14 bisphenol pollutants in building materials. *Journal of Separation Science*, 46(11). <https://doi.org/10.1002/jssc.202300006>
- Jaharudin, N. A. N., Cholan, N. A., Rashid, N. C. A., Sulaiman, N. I., Tay, K. G., & Ngajikin, N. H. (2023). Reagentless iron detection in water based on unclad fiber optical sensor. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 21(5), 1147. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i5.24775>
- 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. 2023 *International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET)*, 337–340. <https://doi.org/10.1109/ICRAMET60171.2023.10366760>
- Lam, S. H., Hlaing, M. M., Zhang, X., Yan, C., Duan, Z., Zhu, L., Ung, C. Y., Mathavan, S., Ong, C. N., & Gong, Z. (2011). Toxicogenomic and Phenotypic Analyses of Bisphenol-A Early-Life Exposure Toxicity in Zebrafish. *PLoS ONE*, 6(12), e28273. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028273>
- Mishra, A., Goel, D., & Shankar, S. (2023). Bisphenol A contamination in aquatic environments: a

- review of sources, environmental concerns, and microbial remediation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1352. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11977-1>
- Nandi, M., & Roy, P. (2023). Bisphenol A derived chemosensors for various ionic species: Small progress, long way to go and ample opportunities. *Inorganica Chimica Acta*, 557, 121709. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2023.121709>
- Punjabi, N., Satija, J., & Mukherji, S. (2015). *Evanescent Wave Absorption Based Fiber-Optic Sensor - Cascading of Bend and Tapered Geometry for Enhanced Sensitivity* (pp. 25–45). https://doi.org/10.1007/978-3-319-10948-0_2
- Pusat Data dan Informasi Obat dan Makanan. (2022). Sarasehan Upaya Perlindungan Kesehatan Masyarakat Melalui Regulasi Pelabelan Bisfenol A (BPA) pada Air Minum Dalam Kemasan (AMDK). In *Badan POM*. <https://www.pom.go.id/siaran-pers/sarasehan-upaya-perlindungan-kesehatan-masyarakat-melalui-regulasi-pelabelan-bisfenol-a-bpa-pada-air-minum-dalam-kemasan-amdk>
- Rogers, K. (2024, March 3). *bisphenol A*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/bisphenol-A>
- Sonavane, M., & Gassman, N. R. (2019). Bisphenol A co-exposure effects: a key factor in understanding BPA's complex mechanism and health outcomes. *Critical Reviews in Toxicology*, 49(5), 371–386. <https://doi.org/10.1080/10408444.2019.1621263>
- Tajik, S., Beitollahi, H., Nejad, F. G., Zhang, K., Le, Q. Van, Jang, H. W., Kim, S. Y., & Shokouhimehr, M. (2020). Recent Advances in Electrochemical Sensors and Biosensors for Detecting Bisphenol A. *Sensors*, 20(12), 3364. <https://doi.org/10.3390/s20123364>
- Teng, C., Min, R., Zheng, J., Deng, S., Li, M., Hou, L., & Yuan, L. (2021). Intensity-Modulated Polymer Optical Fiber-Based Refractive Index Sensor: A Review. *Sensors*, 22(1), 81. <https://doi.org/10.3390/s22010081>
- Xiong, Y., Ye, Z., Xu, J., Liu, Y., & Zhang, H. (2014). A microvolume molecularly imprinted polymer modified fiber-optic evanescent wave sensor for bisphenol A determination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 406(9–10), 2411–2420. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-7664-4>
- Yin, W., Wu, L., Ding, F., Li, Q., Wang, P., Li, J., Lu, Z., & Han, H. (2018). Surface-imprinted SiO₂@Ag nanoparticles for the selective detection of BPA using surface enhanced Raman scattering. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 258, 566–573. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.11.141>
- Yildirim, N., Long, F., He, M., Shi, H.-C., & Gu, A. Z. (2014). A portable optic fiber aptasensor for sensitive, specific and rapid detection of bisphenol-A in water samples. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16(6), 1379–1386. <https://doi.org/10.1039/C4EM00046C>