



Optimalisasi Sensor (SPR) Surface Plasmon Resonance dengan Lapisan Emas dan Perak untuk Deteksi Logam Berat

Optimization of Surface Plasmon Resonance Sensor with Gold and Silver Coating for Heavy Metal Detection

Lathifah Dika Mauludi¹, Meta Yantidewi^{2*}, Rohim Aminullah Firdaus^{3*}

^{1,2,3}Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

*Corresponding Author: E-mail: rohimfirdaus@unesa.ac.id

Artikel Penelitian

Article History:

Received: 21 June, 2024

Revised: 30 June, 2024

Accepted: 9 July, 2024

Kata Kunci:

Sensor SPR;
Lapisan Emas Dan Perak;
Logam Berat

Keywords:

SPR Sensors;
Gold and Silver Layers;
Heavy Metals

DOI: [10.56338/jks.v7i7.5545](https://doi.org/10.56338/jks.v7i7.5545)

ABSTRAK

Penelitian ini mengukur efektivitas lapisan logam berat dengan menggunakan emas (Au) dan perak (Ag) sebagai sensor SPR (Surface Plasmon Resonance). Hasil menunjukkan bahwa perak lebih sensitif dibandingkan emas dalam mendeteksi logam berat (Fe, Pb, Hg) karena interaksi plasmoniknya yang lebih kuat. Emas memiliki stabilitas kimia dan bioaktivitas yang baik, sementara perak menunjukkan sensitivitas dan akurasi lebih tinggi tetapi rentan terhadap oksidasi. Sensor berbasis perak menunjukkan sensitivitas, akurasi deteksi, dan figure of merit (FoM) yang lebih baik dibandingkan sensor berbasis emas, meskipun memerlukan perlindungan tambahan terhadap oksidasi. Kinerja optimal sensor terjadi pada panjang gelombang tertentu (emas pada 650 nm dan perak pada 500 nm), membatasi fleksibilitas dalam aplikasi yang memerlukan panjang gelombang berbeda.

ABSTRACT

This study measured the effectiveness of heavy metal coating using gold (Au) and silver (Ag) as SPR (Surface Plasmon Resonance) sensors. Results show that silver is more sensitive than gold in detecting heavy metals (Fe, Pb, Hg) due to its stronger plasmonic interaction. Gold has good chemical stability and bioactivity, while silver offers higher sensitivity and accuracy but is susceptible to oxidation. Silver-based sensors exhibit better sensitivity, detection accuracy and figure of merit (FoM) than gold-based sensors, although they require additional protection against oxidation. Optimal performance of the sensors occurs at specific wavelengths (gold at 650 nm and silver at 500 nm), limiting flexibility in applications that require different wavelengths.

PENDAHULUAN

Belakangan ini, masalah pencemaran lingkungan telah menjadi fokus utama di seluruh dunia. Logam berat secara alami terdapat di lingkungan dan sangat penting untuk kelangsungan hidup, namun

dapat menjadi berbahaya jika terakumulasi dalam organisme. Beberapa logam berat yang paling sering mencemari lingkungan antara lain merkuri, kadmium, arsenik, kromium, nikel, tembaga, dan timbal (Ali et al., 2019). Logam berat merupakan elemen dengan densitas tinggi dan biasanya beracun dalam konsentrasi yang rendah. Dalam konteks biologi dan kesehatan manusia, logam berat dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama: logam berat esensial dan logam berat non-esensial. Logam berat esensial adalah elemen yang diperlukan dalam jumlah kecil untuk fungsi fisiologis dan biokimia normal. Contoh dari logam berat esensial adalah besi (Fe), seng (Zn), dan tembaga (Cu). Sebaliknya, logam berat non-esensial tidak memiliki fungsi biologis yang diketahui dan seringkali bersifat toksik bahkan pada konsentrasi rendah, seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd) (Tchounwou et al., 2012). Studi-studi terbaru menunjukkan bahwa meskipun logam berat esensial diperlukan dalam jumlah kecil, kelebihan konsumsinya juga dapat berbahaya, menunjukkan bahwa keseimbangan kadar logam berat dalam tubuh adalah aspek kritis dari kesehatan manusia. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih baik mengenai fungsi, sumber, dan dampak dari logam berat esensial dan non-esensial sangat penting dalam bidang toksikologi dan kesehatan masyarakat (Flora et al., 2008).

Dalam beberapa dekade terakhir teknologi nano-mikro-fabrikasi memberikan kemajuan dalam bioteknologi seperti penerapan sensor optik, kimia, dan mekanik sebagai perangkat penginderaan molekuler salah satunya adalah pengembangan sensor surface plasmon resonance (SPR) (Kumar et al., 2023). Sensor ini responsif terhadap perubahan indeks bias (RI) dengan skala nanometer sehingga sangat cocok untuk mendeteksi biomolekuler. Namun, beberapa produk sensor SPR komersial biasanya menggunakan konfigurasi berbasis prisma yang sulit untuk diperkecil (Ganesan, 2020). Salah satunya adalah pengembangan sensor surface plasmon resonance (SPR). Surface Plasmon Resonance (SPR) adalah metode optik yang memiliki sensitivitas tinggi. Teknik ini beroperasi dengan merangsang gelombang muatan pada antarmuka antara logam, seperti Au, Ag dan bahan dielektrik. Setiap modifikasi dalam karakteristik optik lapisan dielektrik yang berdekatan dengan lapisan logam mempengaruhi aktivasi plasmon, yang membentuk dasar pengukuran SPR. Sensor responsif terhadap perubahan indeks bias (RI) di lingkungan pada skala nanometer, sehingga cocok untuk mendeteksi SPR berbasis serat optik logam berat yang mungkin lebih miniatur daripada menggunakan berbasis prisma. Keuntungan lain dari sensor berbasis serat optik (FO-SPR) adalah sensor SPR berbasis prisma sangat sensitif. Dalam optimasi, pengetahuan tentang fenomena plasmonik desain sensor FO-SPR sangat penting untuk mencapai kinerja optimal yang juga dapat mengurangi trial and error sehingga meminimalkan biaya dalam eksperimen. Beberapa metode numerik dapat diterapkan untuk menyelidiki fenomena plasmonik termasuk finite-difference time-domain (FDTD).

Faktor yang mempengaruhi kinerja penginderaan sensor SPR adalah film logam. Ketahanan yang kuat terhadap bahan kimia dan oksidasi menjadikan emas (Au) pilihan yang menarik untuk sensor SPR yang ditandai dengan stabilitas tinggi. Namun, kehilangan emas yang tinggi yang melekat mengorbankan sensitivitas dan resolusi penginderaan karena lebar spektrum yang luas. Sebaliknya, perak (Ag) memungkinkan kerugian rendah untuk meningkatkan sensitivitas dan resolusi penginderaan karena bagian permitivitas imajiner yang kecil, tetapi rentan terhadap oksidasi dan juga mudah membentuk perak sulfida (Du & Zhao, 2017). Perak (Ag), dan Emas (Au) adalah logam transisi yang memiliki sifat listrik dan optik yang baik sehingga banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi elektronik, maupun optoelektronika. Secara mekanika kuantum, Ag memiliki konfigurasi elektron $[Kr] 5s^1 4d^{10}$ sedangkan Au adalah $[Xe] 6s^1 4f^{14} 5d^{10}$, masing-masing. Konfigurasi elektron kedua logam tersebut masuk ke dalam pengecualian aturan Madelung (di mana secara prediktif ketiga logam tersebut memiliki konfigurasi elektron Ag: $[Kr] 5s^2 4d^9$, dan Au: $[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^9$). Menariknya, dari logam tersebut memiliki satu elektron di 4s yang mana adalah elektron valensi yang menyebabkannya menjadi konduktif (Chang, 2010; Simon, 2013).

Refraktif indeks dan permittivitas material Ag dan Au, secara eksperimental di daerah panjang gelombang 400 – 1200 nm, telah diukur oleh beberapa pekerjaan terdahulu (Edward D. Palik, 1985).

Beruntungnya, model data eksperimental dapat didekati dengan menggunakan metode finite-difference time-domain (FDTD), sebagaimana yang dilakukan oleh Xu et al. (2019).

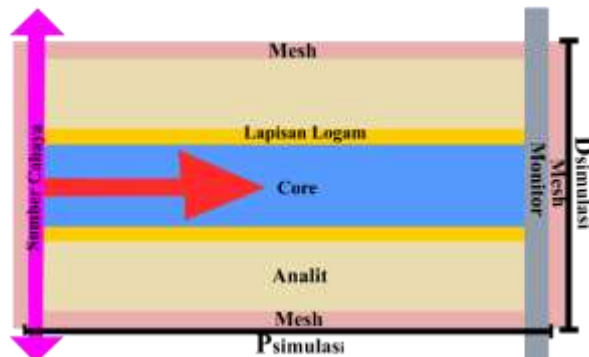
Dalam pengembangan sensor SPR, pemilihan material plasmonik yang tepat sangat penting untuk mencapai kinerja yang optimal. Material plasmonik yang umum digunakan dalam sensor SPR adalah logam mulia seperti emas (Au) dan perak (Ag) karena sifat optik dan stabilitas kimianya. Emas adalah pilihan populer karena ketahanannya terhadap oksidasi dan stabilitas kimia yang tinggi, meskipun memiliki kelemahan dalam hal sensitivitas yang lebih rendah dibandingkan perak. Di sisi lain, perak memiliki sensitivitas yang lebih tinggi karena properti optiknya yang superior, tetapi rentan terhadap oksidasi dan degradasi, yang dapat membatasi penggunaannya dalam aplikasi jangka panjang (Anker et al., 2008). Dari hasil kajian pustaka ini, ke dua logam adalah kandidat yang baik dalam mengeksitasi SPPs karena memenuhi syarat-syarat material yang dapat mengeksitasi SPs. Ketiga material tersebut dipertimbangkan untuk digunakan sebagai coating logam untuk desain sensor SPR berbasis fiber optik. Tujuan dari penelitian ini adalah mencari performa optimal desain sensor fiber optik berbasis SPR (dengan studi kasus pengukuran logam berat) berdasarkan perbandingan nilai S , DA , QF dan FOM . Parameter yang dioptimalkan adalah jenis material plasmonik yaitu Ag dan Au.

METODE

Desain Kontruksi Sensor

Pemodelan dirancang menggunakan metode Finite Difference Time Domain (FDTD) dalam perangkat lunak pemecah persamaan elektromagnetik. Simulasi dilakukan dalam 2D, pemodelan dan simulasi dimulai dengan pembentukan komponen struktural probe. Komponen probe penginderaan meliputi inti, analit, dan logam (material plasmonik).

Struktur FO sebagai sensor SPR dibangun dengan merancang geometri dan memperhitungkan nilai permitivitas setiap komponen yang terlibat dalam struktur. Sensor serat optik menggunakan serat optik silika mode tunggal kemudian melapisinya dengan film logam sehingga merangsang SPR. Permitivitas bahan dalam film tipis menggunakan model FDTD yang terintegrasi dalam perangkat lunak, di mana data referensi mengikuti model yang dikembangkan oleh Johnson dan Christy. Kemudian, panjang gelombang cahaya yang disuntikkan ke dalam probe ditetapkan dan diatur pada panjang gelombang 200 - 1100 nm. Kemudian, kondisi batas yang diterapkan dengan masing-masing sisi adalah perfectly matched layer (PML). Sementara itu, tipe mesh yang digunakan adalah auto-nonuniform dengan ukuran step minimal 2 nm. Terakhir, pengaturan monitor untuk merekam dan mengamati monitor probe diterapkan pada jenis simulasi yaitu 2D X-normal. Waktu simulasi menyesuaikan ukuran area simulasi.



Gambar 1. Skema desain Probe sensor SPR berbasis simulasi

Teknik Pengumpulan Data

Program perangkat lunak FDTD dibuat untuk menganalisis jenis dan kandungan logam berat. Logam berat diidentifikasi menggunakan sensor berbasis serat optik surface plasmon resonance (SPR) dengan deposisi beberapa logam (material plasmonik) yaitu Ag dan Au. Metode FDTD mudah dipahami dan diperpanjang. Metode ini dapat secara akurat dan kuat mengatasi masalah radiasi, bahkan mengatasi tantangan dalam menganalisis bahan kompleks dan struktur skala mikro dan nano yang rumit. Pengumpulan data dilakukan dengan menjalankan skrip simulasi untuk menghasilkan transmitansi yang nanti akan dilakukan olah data pada komputer. Kinerja sensor berbasis SPR optik tergantung pada berbagai parameter, termasuk sensitivitas, selektivitas, batas deteksi, akurasi deteksi, resolusi, pengulangan, reproduksibilitas, kebisingan, rentang kerja, waktu respons, linearitas, penyimpangan, faktor kualitas, dan angka prestasi. Namun, dalam simulasi, tidak semua parameter dapat diukur. Oleh karena itu, bagian ini hanya membahas subset parameter terukur dalam penelitian ini, seperti sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), faktor kualitas (QF), dan figure of merit (FOM). Yang dapat ditulis dengan persamaan 3.1-3.3:

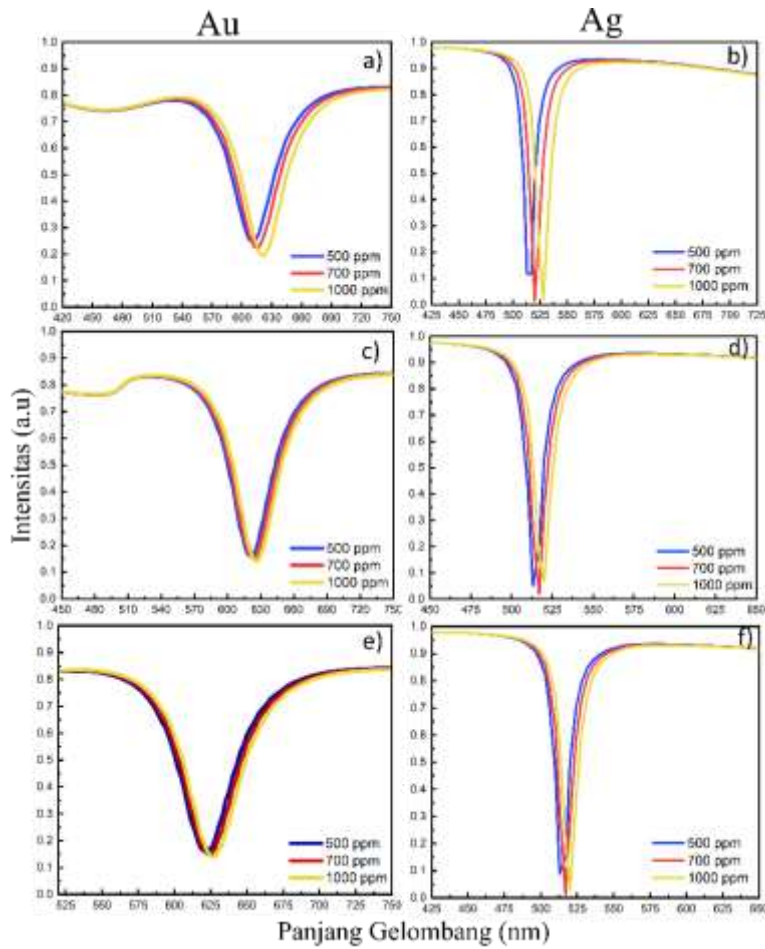
$$S = \frac{\Delta\lambda_{spr}}{\Delta n} \quad 3.1$$

$$DA = \frac{\Delta\lambda_{spr}}{FWHM} \quad 3.2$$

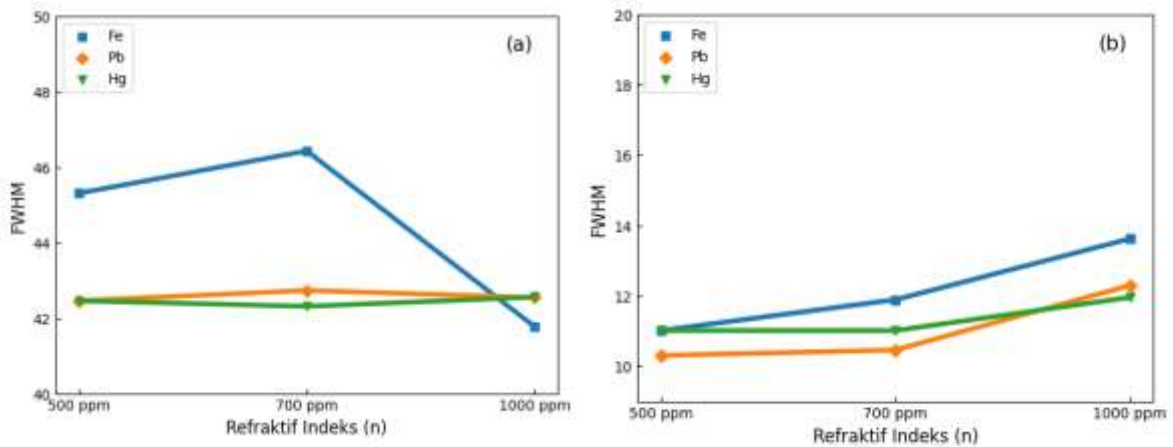
$$FOM = S \left(\frac{1-T_{spr}}{FWHM} \right) \quad 3.3$$

HASIL DAN DISKUSI

Dalam penelitian ini, berbagai analit dengan variasi refractive indeks dari logam berat yang berbeda diujikan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan Fen & Yunus. (2011) dan didapat hasil berupa kurva transmansi. Umumnya, dalam sensor SPR, logam seperti perak, aluminium, emas, tembaga, indium, dll digunakan sebagai film logam. Emas (Au) memiliki stabilitas dan bioaktivitas tinggi dalam sensor SPR, yang berdampak pada sensitivitas sensor. Logam perak (Ag) berkinerja lebih baik dibandingkan dengan emas (Au) dalam sensor SPR karena film logam Ag menunjukkan karakteristik, meningkatkan akurasi dan sensitivitas sensor SPR. Dari gambar 3.2 menunjukkan hasil transmansi untuk lapisan logam Au pada panjang gelombang 600-650 nm sedangkan lapisan Ag dihasilkan pada panjang gelombang 500-525 nm. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Escobedo et al. (2011), menunjukkan bahwa sensor SPR yang menggunakan emas menunjukkan performa optimal pada panjang gelombang sekitar 650 nm. Emas memiliki keunggulan stabilitas kimia yang tinggi, yang membuatnya kurang rentan terhadap oksidasi dan degradasi, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi jangka panjang (Hottin et al., 2013). Sementara perak dikenal memiliki respons plasmonik yang lebih kuat dibandingkan emas, dengan puncak resonansi yang tajam. Menurut penelitian oleh Hottin et al. (2012), sensor SPR berbasis perak menunjukkan sensitivitas yang tinggi pada panjang gelombang sekitar 500 nm. Namun, kekurangan utama perak adalah kecenderungannya untuk teroksidasi, yang dapat mempengaruhi konsistensi hasil transmansi dari waktu ke waktu. Tetapi memerlukan perlindungan tambahan untuk menghindari oksidasi dan degradasi (Xiong et al., 2022).



Gambar 2. Kurva Hasil Transmittansi (a-b) logam berat Fe, (c-d) logam berat Pb, dan (e-f) logam berat Hg



Gambar 3. Kurva FWHM terhadap refraktif indeks (n) dengan varian logam berat

Berdasarkan hasil kurva yang didapatkan pada gambar 3.1, oleh karena itu kami melakukan

plot dengan variasi refraktif indeks (n) terhadap FWHM yang ditunjukkan pada gambar 3.3 dan diperoleh data seperti pada tabel 1 dan 2. FWHM mendefinisikan lebar penuh pada setengah dari spektrum transmitansi maksimum sensor. Semakin kecil nilai FWHM maka semakin baik sensor tersebut. Pada lapisan Au saat mendeteksi logam berat Fe dengan n 1000 ppm, sedangkan lapisan Ag saat mendeteksi logam berat Pb dengan n 500 ppm. Hal ini membuktikan bahwa sensor ini dapat mendeteksi analit berupa logam berat dengan nilai refraktif indeks yang berbeda. Kemudian diperlukan parameter lain untuk mengetahui performa sensor ini.

Tabel 1. Performa Sensor FWHM lapisan Au terhadap refraktif indeks (n)

Refraktif Indeks (n)	FWHM		
	Fe	Pb	Hg
500 ppm	45.307	42.459	42.459
700 ppm	46.430	42.731	42.311
1000 ppm	41.766	42.546	42.555

Tabel 2. Performa Sensor FWHM lapisan Ag terhadap refraktif indeks (n)

Refraktif Indeks (n)	FWHM		
	Fe	Pb	Hg
500 ppm	11.010	10.299	11.010
700 ppm	11.887	10.455	11.008
1000 ppm	13.621	12.293	11.954

Tabel 3. Performa Sensor Sensitivitas

Logam Berat (Analit)	Sensitivitas (S)	
	Au	Ag
Fe	632.91	1891.89
Pb	1428.57	2857.14
Hg	1333.33	2666.66

Selain FWHM, Pada sensor SPR berbasis fiber optik dengan interogasi panjang gelombang sensitivitas (S) dikalkulasi dengan persamaan 3.1. Akurasi deteksi (DA) memiliki makna seberapa akurat sensor dapat mendeteksi analit (atau konsentrasi analit). di mana mendefinisikan rasio antara perubahan panjang gelombang resonansi dan full width half maximum (FWHM), semakin besar perubahan panjang gelombang resonansi dan semakin sempit FWHM maka dapat dikatakan akurasinya semakin baik. Sedangkan untuk figure of merit (FoM), parameter yang ada pada formula FOM adalah S , FWHM, dan transmitansi minimum. semakin tinggi S , semakin sempit FWHM, dan semakin dalam transmitansi minimum T_{min} (pada λ_{SPR}), maka FoM sensor dapat dinilai tinggi.

Berdasarkan data sensitivitas pada Tabel 3, sensor engan lapisan Au menunjukkan sensitivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan sensor SPR dengan lapisan Ag untuk semua analit yang diujikan (Fe, Pb, dan Hg). Emas (Au) memiliki sifat optik yang berbeda dengan perak (Ag), terutama dalam hal kemampuannya untuk menyerap dan memancarkan cahaya. Penyerapan cahaya oleh Au yang lebih tinggi dapat menyebabkan sensitivitas sensor yang lebih rendah karena kurangnya cahaya yang dapat berinteraksi dengan analit. Interaksi antara logam dan analit juga berperan penting dalam sensitivitas sensor. Ag cenderung berinteraksi lebih kuat dengan analit Fe, Pb, dan Hg dibandingkan dengan Au. Interaksi yang lebih kuat ini menghasilkan perubahan indeks bias yang lebih besar pada

permukaan sensor, yang diterjemahkan sebagai sensitivitas yang lebih tinggi.

Tabel 4. Performa Sensor Akurasi Deteksi (DA)

Logam Berat (Analit)	Akurasi Deteksi (DA)	
	Au	Ag
Fe	3.742	5.239
Pb	1.497	2.994
Hg	1.498	2.996

Data Akurasi Deteksi (DA) pada Tabel 4 menunjukkan bahwa sensor dengan lapisan Ag memiliki DA 5.239, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sensor lapisan Au (DA 3.742). Hal ini menunjukkan bahwa sensor Ag lebih sensitif terhadap Fe. Pada Pb sensor Ag kembali menunjukkan akurasi lebih tinggi (DA 2.994) daripada sensor Au (DA 1.497). Masih terlihat pola yang sama, sensor Ag memiliki DA 2.996, sedangkan sensor Au memiliki DA 1.498 pada logam berat Hg.

Tabel 5. Performa Sensor Figure of Merit (FoM)

Logam Berat (Analit)	Figure of Merit (FoM)	
	Au	Ag
Fe	10.567	156.482
Pb	28.255	262.937
Hg	26.371	220.566

Dari tabel 5 menunjukkan sensor dengan lapisan Ag memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan Au. Hal ini ditunjukkan oleh nilai FoM yang lebih tinggi untuk Ag dibandingkan dengan Au pada semua logam berat yang diuji (Fe, Pb, dan Hg). Sensor dengan Ag sebagai lapisan memiliki FoM yang lebih tinggi sebesar 220.566 nm dibandingkan dengan Au pada semua logam berat yang diuji, menunjukkan kemampuan sensor untuk mendeteksi logam berat dengan lebih sensitif. Ag memiliki sifat optik yang lebih baik untuk aplikasi SPR dibandingkan dengan Au, termasuk permitivitas yang lebih tinggi dan kemampuan untuk menyerap cahaya lebih efisien pada panjang gelombang tertentu.

KESIMPULAN DAN SARAN

Telah berhasil dilakukan pengukuran terhadap logam berat dengan Au dan Ag sebagai lapisan. Penelitian ini menunjukkan bahwa perak (Ag) dan emas (Au) adalah logam yang sering digunakan dalam sensor SPR karena karakteristik optiknya. Emas memiliki stabilitas kimia tinggi dan bioaktivitas yang baik, sementara perak memiliki sensitivitas dan akurasi yang lebih tinggi tetapi rentan terhadap oksidasi. Sensor SPR dengan lapisan Ag lebih sensitif daripada dengan lapisan Au dalam mendeteksi logam berat (Fe, Pb, Hg). Hal ini disebabkan oleh interaksi plasmonik perak yang lebih kuat dengan analit dibandingkan emas. Data menunjukkan bahwa sensor berbasis Ag memiliki sensitivitas (S), akurasi deteksi (DA), dan figure of merit (FoM) yang lebih tinggi daripada sensor berbasis Au untuk semua logam berat yang diuji. Sensor dengan lapisan Ag lebih unggul dalam hal sensitivitas, akurasi deteksi, dan kinerja keseluruhan dibandingkan dengan sensor berlapis Au, meskipun memerlukan perlindungan tambahan untuk mencegah oksidasi.

KETERBATASAN

Meskipun perak menunjukkan sensitivitas dan akurasi yang tinggi, ia mudah teroksidasi. Oksidasi dapat mempengaruhi konsistensi hasil dari waktu ke waktu dan memerlukan perlindungan

tambahan. Penelitian ini menunjukkan bahwa emas dan perak bekerja optimal pada panjang gelombang tertentu (emas pada 650 nm dan perak pada 500 nm). Ini membatasi fleksibilitas sensor dalam aplikasi yang memerlukan panjang gelombang berbeda. Serta hanya menguji beberapa jenis logam berat (Fe, Pb, Hg). Kinerja sensor mungkin berbeda untuk analit lain, sehingga diperlukan uji lebih lanjut dengan berbagai jenis analit untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat. Studi lanjutan dengan variasi parameter sensor dan kondisi pengujian diperlukan untuk memvalidasi hasil simulasi dan mengoptimalkan sensitivitas sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Anker, J. N., Hall, W. P., Lyandres, O., Shah, N. C., Zhao, J., & Van Duyne, R. P. (2008). Biosensing with plasmonic nanosensors. *Nature Materials*, 7(6), 442–453. <https://doi.org/10.1038/nmat2162>
- Du, W., & Zhao, F. (2017). Silicon carbide based surface plasmon resonance waveguide sensor with a bimetallic layer for improved sensitivity. *Materials Letters*, 186, 224–226. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.120>
- Edward D. Palik. (1985). *Handbook of Optical Constants of Solids* (Vol. 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20920-2>
- Escobedo, C., Vincent, S., Choudhury, A. I. K., Campbell, J., Brolo, A. G., Sinton, D., & Gordon, R. (2011). Integrated nanohole array surface plasmon resonance sensing device using a dual-wavelength source. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(11), 115001. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/11/115001>
- Fen, Y. W., & Yunus, W. M. M. (2011). Characterization of the Optical Properties of Heavy Metal Ions Using Surface Plasmon Resonance Technique. *Optics and Photonics Journal*, 01(03), 116–123. <https://doi.org/10.4236/opj.2011.13020>
- Flora, S. J., Mittal, M., & Mehta, A. J. (2008). Heavy metal induced oxidative stress & its possible reversal by chelation therapy. *The Indian Journal of Medical Research*, 128 4, 501–523. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18979683>
- Ganesan, S. (2020). *Surface plasmon resonance based biosensor applied to phytosanitary domain*.
- Hottin, J., Moreau, J., Bellemain, A., & Canva, M. (2012). Biochip data normalization using multifunctional probes. *The Analyst*, 137(13), 3119. <https://doi.org/10.1039/c2an35120j>
- Hottin, J., Wijaya, E., Hay, L., Maricot, S., Bouazaoui, M., & Vilcot, J.-P. (2013). Comparison of Gold and Silver/Gold Bimetallic Surface for Highly Sensitive Near-infrared SPR Sensor at 1550 nm. *Plasmonics*, 8(2), 619–624. <https://doi.org/10.1007/s11468-012-9446-1>
- Kumar, S., Singh, R., Wang, Z., Li, M., Liu, X., Zhang, W., Zhang, B., & Li, G. (2023). (Invited) Advances in 2D nanomaterials-assisted plasmonics optical fiber sensors for biomolecules detection. *Results in Optics*, 10, 100342. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100342>
- Muhamad Allan Serunting, Okky Fajar Tri Maryana, Erga Syafitri, Solina Balqis, & Elsa Windiastuti. (2021). Green Synthesis Silver Nanoparticles (AgNPs) Using Lamtoro Pods Extract (*Leucaena leucocephala*) and Their Potential for Mercury Ion Detection. *Evergreen*, 8(1), 63–68. <https://doi.org/10.5109/4372261>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). *Heavy Metal Toxicity and the Environment* (pp. 133–164). https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Xiong, M., Teng, C., Chen, M., Cheng, Y., Deng, S., Li, F., Deng, H., Liu, H., & Yuan, L. (2022). Simulation Study of High Sensitivity Fiber SPR Temperature Sensor with Liquid Filling. *Sensors*, 22(15), 5713. <https://doi.org/10.3390/s22155713>

Xu, Y., Ang, Y., Wu, L., & Ang, L. (2019). High Sensitivity Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Two-Dimensional MXene and Transition Metal Dichalcogenide: A Theoretical Study. *Nanomaterials*, 9(2), 165. <https://doi.org/10.3390/nano9020165>