

PERBANDINGAN SENSITIVITAS SENSOR PLASMONIK BERBASIS NANOPARTIKEL LOGAM BERDASARKAN PERUBAHAN UKURAN PARTIKELNYA

Yoza Bayu Pratama Suratno Putra¹, Fitri Afriani¹, Johan Iskandar², dan Yuant Tiandho^{1,*}

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bangka Belitung
Jl. Kampus Terpadu Balunijuk, Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, 33172

²Program Studi Kecerdasan Buatan dan Robotik, Universitas Pakuan
Bogor, Jawa Barat 16143, Indonesia

^{a)} email korespondensi: yuant@ubb.ac.id

ABSTRAK

Fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) pada nanopartikel logam telah banyak dimanfaatkan dalam pengembangan sensor optik yang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ukuran nanopartikel logam seperti emas, perak, dan tembaga terhadap pergeseran puncak serapan optik menggunakan pendekatan numerikal berbasis teori Mie scattering. Analisis dilakukan berdasarkan kajian numerikal dalam rentang panjang gelombang 300–900 nm dengan variasi ukuran partikel 10–100 nm dan medium air sebagai medium optik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan ukuran partikel menyebabkan pergeseran puncak LSPR (*redshift*) secara linear. Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin besar ukuran partikel, semakin kuat osilasi elektron bebas yang menyebabkan pergeseran resonansi ke arah panjang gelombang lebih besar. Kajian ini memberikan dasar konseptual bagi perancangan sensor optik berbasis nanopartikel perak yang efisien, sensitif, dan potensial digunakan dalam deteksi variasi indeks bias pada medium cair.

Kata kunci: LSPR, nanopartikel perak, Mie scattering, sensor optik, indeks bias

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas manusia terutama dalam bidang industri, pertambangan dan pertanian menyebabkan peningkatan pencemaran seperti logam berat merkuri (Hg^{2+}), timbal (Pb^{2+}), dan kadmium (Cd^{2+}) dalam lingkungan perairan. Ion-ion logam berat tersebut bersifat toksik, tidak dapat terdegradasi secara alami, dan cenderung terakumulasi dalam rantai makanan sehingga menimbulkan dampak serius bagi kesehatan manusia dan lingkungan (Yin et al., 2022). Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan upaya pemantauan dan deteksi logam berat dalam air dengan metode yang efisien, sensitif, serta cepat sangat diperlukan sebagai langkah awal pengendalian pencemaran.

Salah satu pendekatan yang memiliki potensi kuat dalam pengembangan sistem sensor adalah penerapan teknologi sensor optik berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), yaitu fenomena resonansi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel logam ketika berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik (Mie, 1908; Willets & Van Duyne, 2007). Resonansi ini sangat sensitif terhadap perubahan ukuran nanopartikel dan indeks bias di sekitar permukaan nanopartikel,

sehingga perubahan kecil pada lingkungan dapat menggeser posisi puncak serapan optik (*plasmon resonance peak*) (Anker et al., 2008). Oleh karena itu, teknologi LSPR banyak dikembangkan sebagai sensor untuk mendeteksi biomolekul maupun ion logam berat dengan sensitivitas tinggi.

Nanopartikel logam mulia seperti perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu) memiliki sifat optik unik akibat fenomena LSPR yang muncul pada panjang gelombang tampak (Maier, 2007). Posisi puncak resonansi bergantung pada ukuran partikel, bentuk, serta konstanta dielektrik medium di sekitarnya (Kelly et al., 2003). Pergeseran panjang gelombang LSPR dapat digunakan untuk mengukur perubahan indeks bias lingkungan sehingga berfungsi sebagai dasar kerja sensor optik. Selain itu hal yang menarik adalah resonansi plasmonik akan mengalami perubahan ketika terjadi perubahan nanopartikel, dimana hal tersebut dapat terjadi ketika nanopartikel logam berinteraksi dengan polutan oksidatif.

Untuk menganalisis fenomena tersebut, digunakan pendekatan teori Mie scattering yang menjelaskan bagaimana partikel sferis berinteraksi dengan gelombang cahaya dan menghasilkan spektrum ekstingsi, hamburan, serta penyerapan (Bohren & Huffman, 1998). Simulasi numerikal

berbasis teori Mie mampu menggambarkan pengaruh variasi ukuran nanopartikel dan indeks bias medium terhadap pergeseran puncak LSPR (Hu et al., 2021).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa nanopartikel perak (AgNPs) memiliki resonansi plasmon yang lebih tajam dan sensitif dibandingkan Au dan Cu, menjadikannya kandidat utama dalam aplikasi sensor optik (Loiseau et al., 2019). Namun, sebagian besar studi yang ada masih berfokus pada eksperimen sintesis, sedangkan penelitian numerikal untuk memahami hubungan antara ukuran partikel, indeks bias, dan respon optik terhadap ion logam berat masih terbatas (Xu et al., 2021).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mendesain dan menganalisis sensor LSPR berbasis nanopartikel perak secara numerikal menggunakan metode Mie scattering. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan ukuran partikel untuk menggambarkan pengaruh perubahan kondisi air yang mengandung ion logam berat seperti Hg^{2+} . Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar teoritis dalam pengembangan sensor optik berbasis nanopartikel yang efisien, sensitif, serta potensial diterapkan pada sistem deteksi logam berat dalam air.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara numerikal teoritis menggunakan pendekatan Mie scattering untuk menganalisis fenomena LSPR pada nanopartikel logam. Kajian difokuskan pada pengaruh ukuran nanopartikel dan perubahan indeks bias lingkungan terhadap pergeseran panjang gelombang puncak serapan (λ_{peak}) dengan persamaan *extinction* adalah,

$$Q_{ext} = \frac{2}{k^2 a^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1)$$

di mana k adalah bilangan gelombang, a adalah radius nanopartikel, n adalah indeks bias medium, dan a_n serta b_n merupakan koefisien Mie yang bergantung pada konstanta dielektrik material dan ukuran partikel (Bohren & Huffman, 1998)

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat Mie Scattering Simulator dengan parameter panjang gelombang 300–900 nm. Adapun nanopartikel yang dimodelkan meliputi nanopartikel perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu) dengan medium air ($n = 1,333$). Simulasi yang dilakukan terfokus untuk mengkaji efek ukuran partikel (10–100 nm) pada spektrum absorbansi nanopartikel (Loiseau et al., 2019; Xu et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi Mie scattering menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanopartikel logam menyebabkan pergeseran puncak serapan (*plasmon*

resonance peak, λ_{peak}) ke arah panjang gelombang yang lebih besar atau mengalami *redshift*. Fenomena ini paling jelas terlihat pada nanopartikel perak (Ag), di mana λ_{peak} meningkat secara signifikan pada ukuran 10 nm ke ukuran 50 nm seperti disajikan pada Gambar 1.

Hasil ini menunjukkan bahwa perak memiliki sensitivitas paling tinggi terhadap perubahan ukuran partikel dibandingkan dua logam lainnya. Peningkatan ukuran partikel menyebabkan jumlah elektron bebas pada permukaan meningkat sehingga medan elektromagnetik lokal menjadi lebih kuat. Akibatnya, resonansi plasmon permukaan bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar. Fenomena ini sejalan dengan teori *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) yang menyatakan bahwa frekuensi osilasi elektron bebas bergantung pada dimensi partikel dan lingkungan optiknya (Maier, 2007).

Karakteristik ini menjadikan nanopartikel perak sebagai material dengan respons optik paling tajam dan puncak LSPR paling sensitif terhadap perubahan geometris maupun indeks bias medium. Nanopartikel emas menempati posisi kedua dengan puncak resonansi yang stabil namun memiliki redaman yang lebih tinggi, sedangkan tembaga menunjukkan redaman signifikan akibat sifat konduktivitas optiknya yang lebih rendah.

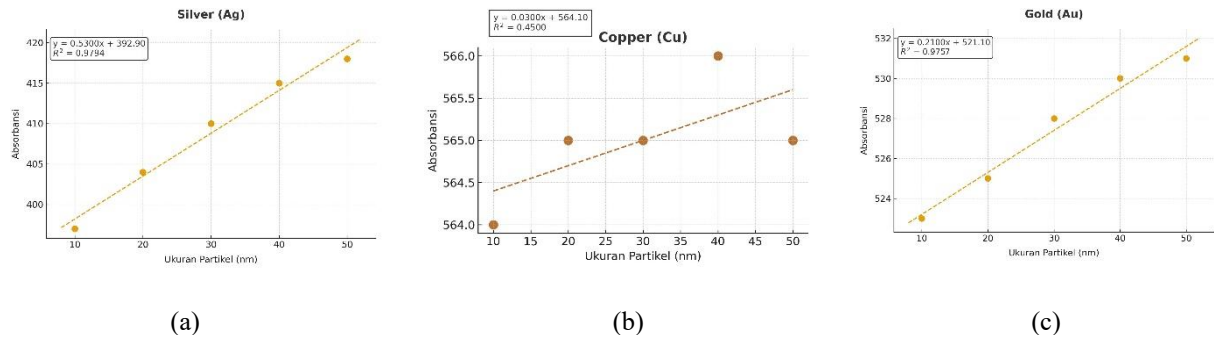
Hasil simulasi ini menegaskan bahwa nanopartikel perak (AgNPs) merupakan kandidat terbaik untuk desain sensor optik berbasis LSPR. Respon optik yang tajam dan sensitivitas tinggi terhadap perubahan ukuran maupun indeks bias menjadikannya material potensial untuk mendeteksi variasi lingkungan optik dalam air, termasuk perubahan akibat keberadaan logam berat atau senyawa terlarut lainnya. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa AgNP memiliki sensitivitas tertinggi di antara logam mulia lainnya untuk aplikasi sensor plasmonik (Loiseau et al., 2019; Xu et al., 2021).

KESIMPULAN

Penelitian numerikal berbasis teori *Mie scattering* menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanopartikel logam berpengaruh signifikan terhadap pergeseran puncak *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Nanopartikel perak (Ag) memberikan pergeseran panjang gelombang puncak terbesar dibandingkan emas (Au) dan tembaga (Cu), menunjukkan sensitivitas optik tertinggi terhadap perubahan ukuran dan indeks bias medium. Hasil ini menegaskan bahwa sifat plasmonik sangat bergantung pada dimensi partikel serta interaksi medan elektromagnetik dengan elektron bebas pada permukaannya.

Pendekatan numerikal ini membuktikan bahwa metode Mie scattering dapat digunakan sebagai dasar perancangan sensor LSPR tanpa perlu eksperimen kompleks. Nanopartikel perak direkomendasikan sebagai material paling potensial dalam pengembangan sensor

optik berbasis plasmon untuk deteksi variasi indeks bias di medium cair. Kajian lanjutan dapat difokuskan pada penambahan lapisan fungsionalisasi untuk meningkatkan interaksi permukaan dan sensitivitas sensor terhadap perubahan kimia lingkungan.



Gambar 1. (a) Hubungan antara ukuran nanopartikel perak (Ag) dengan panjang gelombang puncak hasil simulasi Mie scattering, (b) hubungan antara ukuran nanopartikel emas (Au) dengan panjang gelombang puncak, dan (c) hubungan antara ukuran nanopartikel tembaga (Cu) dengan panjang gelombang puncak.

Tabel 1, peningkatan ukuran nanopartikel logam menyebabkan pergeseran panjang gelombang puncak ke arah merah (redshift), paling signifikan terjadi pada perak (Ag).

Ukuran Partikel (nm)	λ_{peak} Perak (Ag) (nm)	λ_{peak} Emas (Au) (nm)	λ_{peak} Tembaga (Cu) (nm)
10	397	523	564
20	404	525	565
30	410	528	565
40	415	530	566
50	418	531	565

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia melalui Program Hilirisasi Riset Pengujian Model dan Prototipe (Hibah No. 2112/UN50/M/PP/2025)

REFERENSI

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), pp.442–453.

Bohren, C.F. & Huffman, D.R., 1998. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: Wiley.

Hu, M., Qian, W. & Li, X., 2021. *Numerical simulation of plasmonic nanoparticles using Mie theory*. Optics Express, 29(4), pp.5110–5124.

Johnson, P.B. & Christy, R.W., 1972. *Optical constants of the noble metals*. Physical Review B, 6(12), pp.4370–4379.

Kelly, K.L., Coronado, E., Zhao, L.L. & Schatz, G.C., 2003. *The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment*. The Journal of Physical Chemistry B, 107(3), pp.668–677.

Loiseau, A., Asila, V., Boitel-Aullen, G., Lam, M., Salmain, M. & Boujday, S., 2019. *Silver-based plasmonic nanoparticles for sensing applications: a review*. Sensors, 19(24), 5529.

Maier, S.A., 2007. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. New York: Springer.

Mie, G., 1908. *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. Annalen der Physik, 25(3), pp.377–445.

Willets, K.A. & Van Duyne, R.P., 2007. *Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing*. Annual Review of Physical Chemistry, 58, pp.267–297.

Xu, T., Lu, Y., Zhang, H. & Zhao, Y., 2021. *Strategies to improve performances of LSPR biosensing*. Sensors and Actuators B: Chemical, 339, 129859.

Yin, X., Li, Y., Sun, J. & Yang, L., 2022. *Detection of heavy metal ions in water using plasmonic nanomaterials: A review*. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 17, 100631.