p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 3 Tahun 2026, hal 511-523

PENINGKATAN SENSITIVITAS SENSOR SERAT OPTIK MELALUI PELAPISAN NANOPARTIKEL EMAS HASIL SINTESIS DENGAN METODE ABLASI LASER ND:YAG

[1)]Alfi Nuria Jasmine, [1)]Latifatul Aisyah Nabila, [1)]Ahmad Taufiq, [1,2,*)]Nurul Hidayat

[1)] Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang, 65145, Indonesia,
[2)] Pusat Sains dan Rekayasa, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang 65145, Indonesia.
*email: nurul.hidayat.fmipa@um.ac.id

Abstrak

Sensor serat optik berbasis indeks bias memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan lingkungan dan dalam penelitian ini difokuskan pada peningkatan performa sensor melalui pelapisan nanopartikel emas (AuNPs). AuNPs disintesis menggunakan metode ablasi laser Nd:YAG dalam media air deionisasi tanpa bahan kimia tambahan. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa partikel memiliki morfologi bulat dengan distribusi ukuran yang seragam dan menunjukkan puncak serapan optik pada 527 nm, mengindikasikan terjadinya fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Sensor disusun dengan struktur *single mode–no core–single mode* (SNS) untuk memperluas jangkauan medan *evanescent*, sedangkan pelapisan AuNPs dilakukan menggunakan teknik *self-assembly monolayer*. Pengujian sensor dilakukan terhadap variasi indeks bias larutan etilen glikol pada rentang 1,3909 hingga 1,4256. Sebelum pelapisan, sensitivitas sensor sebesar 1,66 a.u./RIU, meningkat menjadi (3,490 $\pm$ 0.170) a.u./RIU setelah pelapisan, dengan peningkatan sebesar 110,4%. Nilai *limit of detection* (LOD) menurun dari 0,356 menjadi 0,161 RIU, sedangkan koefisien determinasi mencapai R^2 = 0,992, menunjukkan hubungan linier yang sangat baik antara respons optik dan indeks bias. Uji kestabilan selama 30 menit menunjukkan fluktuasi intensitas di bawah 1%, yang menandakan kestabilan optik sensor dalam kondisi lingkungan terkontrol. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa pelapisan AuNPs hasil sintesis ablasi laser Nd:YAG secara signifikan meningkatkan sensitivitas, kestabilan, dan linieritas sensor serat optik berbasis LSPR, serta menawarkan pendekatan sintesis non-toksik yang potensial untuk pengembangan sensor optik presisi tinggi.

Kata Kunci: Nanopartikel Emas, Sensor Serat Optik, Indeks Bias, Sensitivitas, Ablasi Laser

Abstract

Fiber optic sensors based on refractive index have high sensitivity to environmental changes, and in this study, the focus was on improving sensor performance through gold nanoparticle (AuNPs) coating. AuNPs were synthesized using the Nd:YAG laser ablation method in deionized water without any additional chemicals. Characterization results showed that the particles have a spherical morphology with a uniform size distribution and exhibit an optical absorption peak at 527 nm, indicating the occurrence of LSPR. The sensor was constructed with a single mode–no core–single mode (SNS) structure to expand the evanescent field range, while the AuNPs coating was carried out using the self-assembled monolayer technique. Sensor testing was conducted on variations in the refractive index of ethylene glycol solutions in the range of 1.3909 to 1.4256. Before coating, the sensor's sensitivity was 1.66 a.u./RIU, which increased to 3.49 a.u./RIU after coating, representing an increase of 110.4%. The limit of detection (LOD) decreased from 0.356 to 0.161 RIU, while the coefficient of determination reached R^2 = 0.99292, indicating an excellent linear relationship between the optical response and the refractive index. A stability test over 30 minutes showed intensity fluctuations below 1%, indicating the optical stability of the sensor under controlled environmental conditions. These results demonstrate that coating with AuNPs synthesized through Nd:YAG laser ablation significantly enhances the sensitivity, stability, and linearity of LSPR-based optical fiber sensors, and offers a potential non-toxic synthesis approach for the development of high-precision optical sensors.

***Keywords**: Gold Nanoparticles, Optical Fiber Sensor, Refractive Index, Sensitivity, Laser Ablation*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Inovasi teknologi sensor telah memainkan peran krusial dalam mendukung pemantauan lingkungan dan sistem deteksi presisi tinggi [1]. Sensor optik, khususnya berbasis serat optik, banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi seperti pemantauan kesehatan [2], [3], [4], deteksi pH dan kualitas lingkungan [5], serta pengukuran suhu dan kelembaban [6], [7]. Di antara berbagai pendekatan, sensor berbasis serat optik menonjol karena keunggulannya dalam hal fleksibilitas, ukuran kecil, kekebalan terhadap gangguan elektromagnetik, serta kemampuannya mengakses area sulit secara in-situ. Salah satu konfigurasi struktural yang mulai banyak menarik perhatian adalah struktur SNS, yang memungkinkan pemanfaatan medan *evanescent* secara lebih maksimal pada area NCF untuk meningkatkan interaksi dengan lingkungan sekitar. Namun demikian keterbatasan sensitivitas terhadap perubahan indeks bias masih menjadi tantangan utama dalam optimasi kinerja sensor SNS. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu memperkuat respons optik struktur tersebut, salah satunya melalui integrasi material plasmonik seperti AuNPs yang dapat menghasilkan fenomena LSPR dan meningkatkan sensitivitas sensor secara signifikan [8].

Salah satu material yang paling menjanjikan untuk memicu efek LSPR adalah AuNPs, yang memiliki sifat optik unggul, kestabilan kimia tinggi, dan biokompatibilitas baik [9], [10], [11], [12]. LSPR merupakan fenomena optik yang terjadi ketika cahaya berinteraksi dengan permukaan nanopartikel logam seperti emas, memicu osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan partikel [13]. Resonansi ini sangat sensitif terhadap perubahan indeks bias di lingkungan sekitar nanopartikel, sehingga menghasilkan pergeseran spektrum yang dapat digunakan sebagai sinyal dalam sistem sensor optik. Pada konfigurasi sensor serat optik, interaksi antara AuNPs yang terimobilisasi pada permukaan serat dan medan *evanescent* dari cahaya terpanduh menghasilkan penguatan respons LSPR [14]. Efek ini memperkuat medan elektromagnet lokal dan meningkatkan sensitivitas deteksi terhadap variasi indeks bias. Berdasarkan laporan Makhsin dkk, pelapisan AuNPs pada serat optik dapat meningkatkan sensitivitas dari 2619,1 nm/RIU menjadi 3669,8 nm/RIU, menunjukkan kenaikan performa deteksi sebesar 40% [15]. Sebaliknya, sensor tanpa pelapisan plasmonik cenderung memiliki sensitivitas lebih rendah karena tidak adanya penguatan medan elektromagnetik oleh LSPR [16]. Oleh karena itu, integrasi AuNPs dalam sistem sensor optik menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan sensitivitas secara signifikan tanpa mengubah struktur dasar serat secara kompleks.

Dalam pengembangan sensor optik berbasis AuNPs, metode sintesis sangat menentukan kualitas, kemurnian, dan stabilitas partikel yang dihasilkan. Metode kimiawi seperti reduksi sitrat umumnya menghasilkan AuNPs berukuran 20–40 nm [17]. Namun partikel tersebut sering kali membawa residu senyawa sitrat pada permukaannya, yang dapat memengaruhi kestabilan koloid dan respon plasmonik. Sebaliknya, metode *Pulsed Laser Ablation in Liquid* (PLAL), khususnya dengan laser Nd:YAG, mampu menghasilkan AuNPs berukuran kurang dari 30 nm tanpa senyawa tambahan, sehingga menghasilkan nanopartikel yang lebih murni dan biokompatibel [18]. Dalam teknik ini, pulsa laser dengan panjang gelombang 1064 nm diarahkan ke permukaan target emas yang terendam dalam air deionisasi, menyebabkan pelepasan atom dan pembentukan koloid AuNPs langsung di dalam larutan. Proses ini tidak memerlukan agen pereduksi maupun stabilizer, menjadikannya metode yang ramah lingkungan dan bebas kontaminan kimia. Menurut Sortino dkk, AuNPs hasil ablasi laser menunjukkan distribusi ukuran yang lebih sempit dan stabil secara optik, sehingga meningkatkan sensitivitas dan konsistensi sensor LSPR secara keseluruhan [19].

Meskipun fenomena LSPR pada permukaan nanopartikel logam telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan performa sensor optik, efektivitas pendekatan ini sangat ditentukan oleh metode sintesis dan kualitas struktur nanopartikel yang digunakan. Metode sintesis kimia seperti reduksi sitrat atau *Turkevich* umumnya melibatkan bahan aditif seperti agen pereduksi dan *stabilizer*, yang berpotensi meninggalkan residu kimia dan menyebabkan ketidakteraturan ukuran partikel serta kestabilan koloid yang rendah. Hal ini dapat berdampak langsung pada respons optik sensor, terutama dalam aplikasi jangka panjang atau lingkungan cair yang kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkan metode sintesis alternatif yang non-toksik, bebas kontaminan,

dan mampu menghasilkan AuNPs dengan distribusi ukuran sempit serta kestabilan optik tinggi. Salah satu pendekatan yang memenuhi kriteria ini adalah PLAL, yang terbukti mampu menghasilkan AuNPs murni tanpa senyawa tambahan. belum banyak laporan yang mengevaluasi sensitivitas dan kestabilan optik sensor SNS yang dilapisi AuNPs hasil PLAL dalam satu studi.

Pelapisan AuNPs hasil PLAL telah dilaporkan mampu menghasilkan distribusi ukuran partikel yang sempit dan kemurnian tinggi, dua faktor kunci untuk meningkatkan sensitivitas sekaligus kestabilan sensor berbasis LSPR. Namun, sebagian besar riset terkini seperti Wu dkk, masih berfokus pada pengembangan sensor berstruktur *multimode fiber* (MMF) atau *tapered single-mode fiber* (SMF-taper) dengan pelapisan plasmonik yang disintesis melalui metode kimia [20]. Struktur SNS yang dipadukan dengan AuNPs hasil PLAL belum banyak dikaji secara mendalam, sehingga peluang untuk memaksimalkan performa sensor melalui pendekatan ini masih terbuka lebar. Dengan mempertimbangkan celah tersebut, penelitian ini menitikberatkan pada karakterisasi sintesis AuNPs via PLAL dan integrasinya ke dalam struktur SNS guna menghasilkan sensor serat optik yang tidak hanya memiliki sensitivitas tinggi, tetapi juga kestabilan optik unggul dalam mendeteksi perubahan indeks bias secara presisi.

Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis dan mengkarakterisasi AuNPs menggunakan metode PLAL berbasis laser Nd:YAG tanpa melibatkan bahan kimia tambahan, serta mengevaluasi pengaruh pelapisan AuNPs terhadap sensitivitas dan kestabilan optik sensor serat optik berstruktur SNS berbasis fenomena LSPR dalam mendeteksi variasi indeks bias. Selain itu, penelitian ini mengkaji efektivitas mekanisme LSPR dalam memperkuat respons optik sistem sensor yang telah dimodifikasi, serta menilai potensi PLAL sebagai teknik sintesis non-kimia yang efisien dan minim kontaminasi dalam menghasilkan AuNPs berkualitas tinggi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem sensor optik yang lebih bersih, stabil, dan presisi tinggi, sekaligus memperluas pemahaman mengenai pemanfaatan struktur SNS dalam aplikasi pelapisan nanopartikel emas suatu pendekatan yang hingga kini masih relatif jarang diteliti secara mendalam.

II. METODE

A. Sintesis AuNPs

Sintesis nanopartikel emas dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode PLAL dengan laser Nd:YAG pada panjang gelombang 1064 nm. Proses dilakukan dalam medium air deionisasi, dengan logam emas murni sebagai target ablasi dan 20 mL air deionisasi sebagai media cair. Proses ablasi berlangsung selama 20 menit dengan energi laser sebesar 300 mJ dan variasi frekuensi pulsa 2 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, dan 8 Hz untuk mengamati pengaruh laju pulsa terhadap ukuran dan distribusi partikel, mengingat frekuensi lebih tinggi cenderung menghasilkan partikel berukuran lebih kecil dan homogen. Setelah proses ablasi, larutan koloid AuNPs menunjukkan perubahan warna dari merah muda pucat hingga merah pekat, bergantung pada frekuensi pulsa yang digunakan. Variasi warna ini berhubungan dengan fenomena LSPR, yang dipengaruhi oleh ukuran dan distribusi partikel, serta mencerminkan efektivitas proses sintesis. Warna yang lebih pekat umumnya dikaitkan dengan konsentrasi partikel lebih tinggi dan distribusi ukuran yang lebih seragam. Dari berbagai variasi tersebut, pada frekuensi 8 Hz menghasilkan larutan dengan warna paling homogen dan intens, menandakan hasil sintesis AuNPs yang paling optimal [21], [22].

Kemudian dilakukan karakterisasi untuk menunjukkan sifat optik, struktur kristal, dan morfologi partikel. Pengujian optik dilakukan menggunakan spektroskopi *ultraviolet–visible* (UV-Vis), dengan pengamatan puncak absorbansi pada rentang panjang gelombang 520–540 nm. Puncak ini berkaitan erat dengan resonansi plasmon permukaan lokal dan berfungsi sebagai indikator terhadap ukuran rata-rata serta distribusi partikel dalam larutan. Selanjutnya dilakukan Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengamati bentuk, ukuran, dan distribusi partikel, baik pada substrat silika maupun pada permukaan serat optik yang telah dilapisi. Kemudian analisis struktur kristal dilakukan menggunakan difraksi sinar-X (XRD) dengan sumber Cu-Kα (λ = 1,5406 Å) pada rentang sudut 2θ sebesar 0° hingga 90°. Sampel disiapkan dengan meneteskan larutan koloid AuNPs ke atas substrat silika dan mengeringkannya secara bertahap. Puncak difraksi yang diamati mengindikasikan struktur kristal fasa FCC khas emas, dengan orientasi

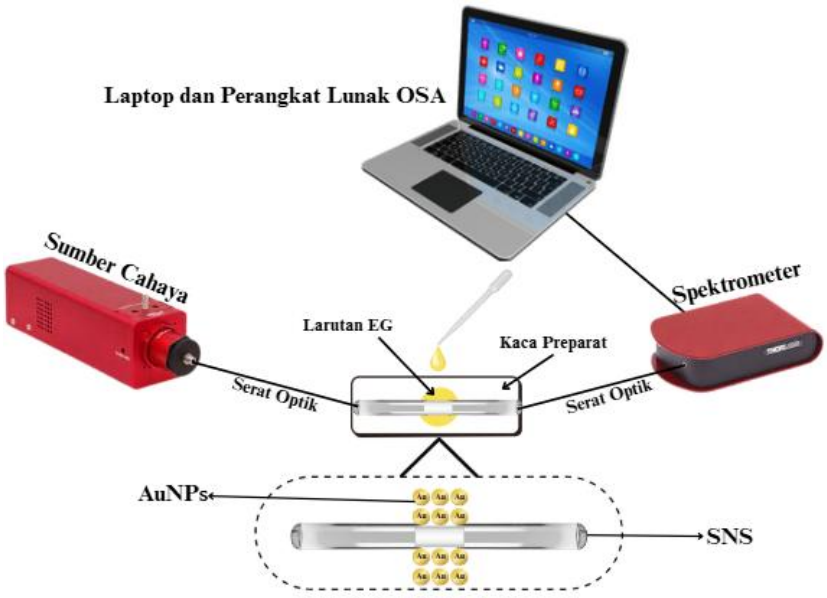
kristal pada bidang (111), (200), (220), dan (311). Ketiga karakteristik tersebut merupakan faktor krusial dalam memastikan performa optik sensor serat berbasis LSPR dalam mendeteksi perubahan indeks bias secara sensitif dan stabil.

B. Preparasi Sensor Berbasis Serat Optik

Preparasi sensor berstruktur SNS, dimana SMF sebagai area input dan output sepanjang 15 cm dan NCF sebagai area sensing sepanjang 0,5 cm, panjang tersebut dinilai mampu memaksimalkan perluasan medan *evanescent* tanpa menurunkan efisiensi transmisi secara signifikan [23]. Prosedur diawali dengan perendaman area NCF dalam isopropil alkohol untuk menghilangkan kontaminan permukaan. Selanjutnya, NCF direndam dalam larutan *NaOH* 1,0 M selama 1 jam dan kemudian dibilas menggunakan air deionisasi guna mengaktifkan permukaan serat. Setelah proses pengeringan, NCF direndam dalam larutan etanol yang mengandung 1% MPTMS selama 24 jam untuk mengaktifkan gugus fungsional tiol (-SH) pada permukaannya. Selanjutnya, serat direndam dalam larutan koloid AuNPs selama 3 hari pada suhu ruang tanpa agitasi, untuk memungkinkan adsorpsi maksimum dan pembentukan lapisan AuNPs yang merata pada permukaan zona NCF.

C. Pengujian Sensitivitas Sensor dengan Struktur SNS

Pengujian sensitivitas sensor serat optik dengan struktur SNS dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor sebelum dan sesudah pelapisan AuNPs, seperti pada **Gambar 1**. Dalam pengujian ini, digunakan larutan etilena glikol (EG) dengan variasi konsentrasi sebesar 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100% sebagai medium perubahan indeks bias. Nilai indeks bias masing-masing larutan adalah 1,3909; 1,4003; 1,4085; 1,473; dan 1,4256, yang diukur menggunakan *Digital Refractometer*. Salah satu ujung dari struktur SNS dihubungkan ke sumber cahaya, sementara ujung lainnya dihubungkan ke spektrometer CCS175.



Gambar 1. Skema Pengukuran Spektrum Optik untuk Penginderaan Indeks Bias

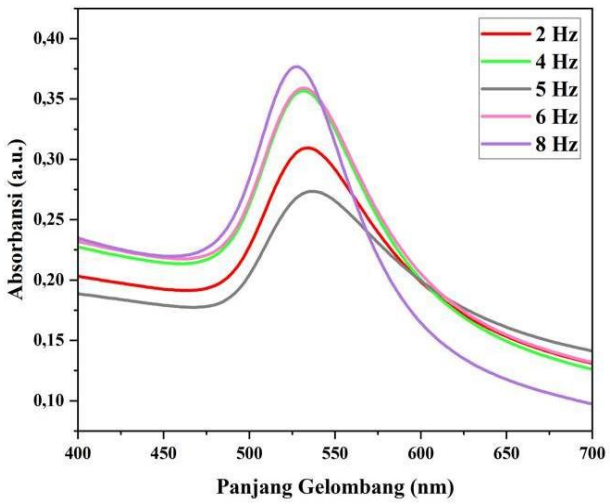
Bagian NCF dari struktur SNS direndam ke dalam larutan EG dengan konsentrasi tertentu selama 30 menit secara bergantian. Sebelum dilakukan pengujian dengan berbagai konsentrasi EG, sensor terlebih dahulu dibersihkan dengan perendaman dalam air murni untuk memastikan tidak ada kontaminasi dari pengujian sebelumnya. Spektrometer yang digunakan kemudian terhubung ke laptop melalui kabel USB, dan perangkat lunak Thorlabs CCS175. Selain pengujian sensitivitas, dilakukan pola uji stabilitas data sensor terhadap masing-masing konsentrasi larutan. Pengujian ini berlangsung selama 30 menit dengan pengambilan data setiap 2 menit, untuk mengevaluasi konsistensi sinyal dan kestabilan respon sensor terhadap setiap variasi larutan yang digunakan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi UV-Vis

Karakterisasi optik terhadap larutan AuNPs hasil sintesis menggunakan metode ablasi laser Nd:YAG pada frekuensi 8 Hz dilakukan menggunakan spektroskopi *ultraviolet–visible* (UV–Vis). Spektrum serapan menunjukkan puncak absorbansi maksimum pada panjang gelombang 527 nm dengan nilai absorbansi sebesar 0,376 a.u., dan nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) sebesar 50,143 nm, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2** dan **Tabel 1**. Puncak tunggal yang tajam tersebut mengindikasikan kemunculan fenomena LSPR akibat osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel saat berinteraksi dengan medan elektromagnetik cahaya.

Secara spektral, letak puncak serapan pada 527 nm menunjukkan indikasi *blue shift* dibandingkan panjang gelombang khas LSPR dari AuNPs berukuran lebih besar, yang biasanya berada pada rentang 530–540 nm [24]. Peristiwa *blue shift* ini menandakan bahwa ukuran partikel yang terbentuk relatif kecil dan tersebar secara seragam dalam medium koloid tanpa indikasi agregasi signifikan. Nilai FWHM yang rendah 50,143 nm memperkuat interpretasi bahwa distribusi ukuran partikel cukup sempit dan larutan bersifat stabil secara koloidal. Variasi frekuensi ablasi dari 2 Hz hingga 8 Hz memberikan pengaruh signifikan terhadap posisi puncak absorbansi dan FWHM. Pada frekuensi 8 Hz, diperoleh nilai absorbansi tertinggi dan FWHM terendah, mengindikasikan sintesis AuNPs yang paling optimal. Sebaliknya, frekuensi 5 Hz menghasilkan FWHM tertinggi sebesar 70,946 nm, menunjukkan distribusi ukuran partikel yang lebih lebar dan kemungkinan terjadinya aglomerasi. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi repetisi cenderung menghasilkan partikel berukuran lebih kecil dan lebih homogen, selama parameter lain tetap dikendalikan.



Gambar 2. Spektrum UV-Vis AuNPs dengan Variasi Frekuensi Laser Nd:YAG.

Temuan ini diperkuat oleh kajian Naser dkk, yang menyatakan bahwa peningkatan frekuensi repetisi laser dapat menghasilkan AuNPs dengan ukuran yang lebih kecil dan distribusi ukuran yang lebih homogen, ditandai oleh puncak spektrum UV–Vis di kisaran 520–530 nm [25].

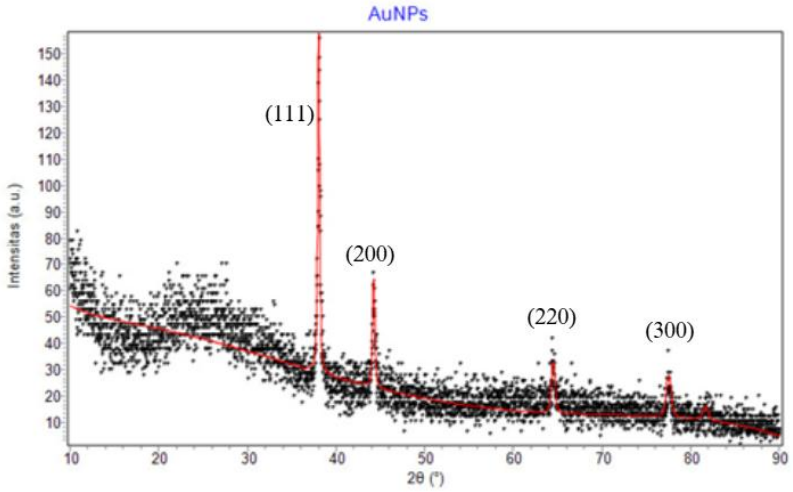
Tabel 1. Hasil Uji Karakterisasi UV-Vis AuNPs

Frekuensi (Hz)	Absorbansi (a.u.)	Panjang Gelombang (nm)	FWHM (nm)
2	0,305	533	51,430
4	0,357	531	55,206
5	0,275	536	70,946
6	0,358	531	57,698
8	**0,376**	**527**	**50,143**

Secara umum, karakteristik optik AuNPs pada frekuensi 8 Hz menunjukkan bahwa kondisi sintesis tersebut mampu menghasilkan nanopartikel dengan distribusi ukuran yang seragam, kestabilan koloid yang tinggi, dan puncak serapan tajam dalam rentang LSPR. Hal ini menjadikannya sesuai untuk mendukung mekanisme LSPR dalam aplikasi sensor serat optik berbasis indeks bias.

B. Karakterisasi XRD

Hasil pola difraksi pada **Gambar 3** menunjukkan keberadaan puncak-puncak intensitas tinggi pada bidang (111), (200), (220), dan (311), yang sesuai dengan struktur kristal *face-centered cubic* (FCC) khas emas. Intensitas dominan pada bidang (111) mengindikasikan adanya orientasi pertumbuhan kristal yang preferensial terhadap arah tersebut, yang merupakan ciri umum dari AuNPs hasil sintesis metode p*ulsed laser ablation* [26], [27]. Di antara keempat bidang tersebut, refleksi (111) menunjukkan intensitas dominan, yang mengindikasikan arah pertumbuhan kristal preferensial ke bidang tersebut dan mencerminkan keteraturan struktur yang tinggi. Karakterisasi ini didukung oleh parameter kisi sebesar a = b = c = 4,0765 Å dan volume sel sebesar 67,74 Å. Selain itu, AuNPs yang dihasilkan memiliki densitas kristal 19,301 g/cm³ dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 63,5 nm.



Gambar 3. Pola XRD dan Analisis Rietveld untuk AuNPs.

Nilai ini tergolong besar untuk nanopartikel emas dan diduga disebabkan oleh tidak digunakannya agen penstabil selama proses sintesis, sehingga pertumbuhan domain kristal berlangsung tanpa penghambat dan memungkinkan susunan atom mengkristal lebih sempurna. Selain itu, penggunaan pelarut berupa air murni (akuades) tidak memberikan kendali terhadap pertumbuhan kristal, serta laju pendinginan plasma dalam medium cair yang cenderung lambat memberi waktu lebih panjang bagi proses nukleasi dan pertumbuhan kristalit, sehingga ukuran domain kristal menjadi lebih besar [22].

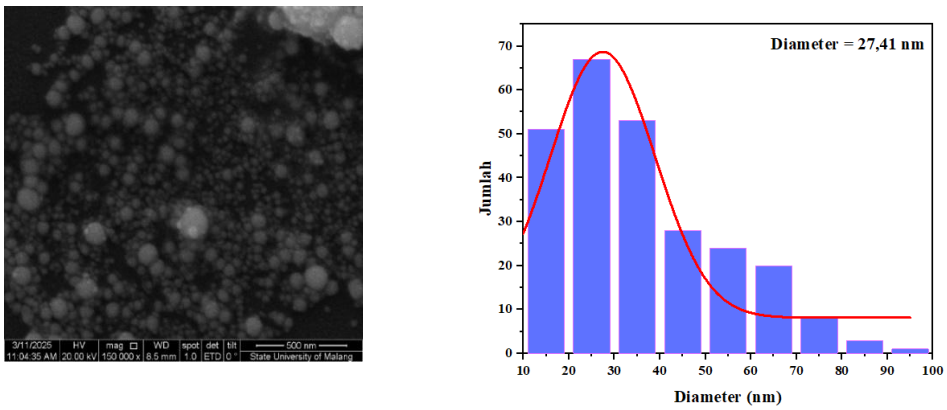
Nilai-nilai ini menunjukkan kecocokan yang baik antara pola eksperimen dan pola simulasi, sehingga validitas hasil identifikasi struktur kristal dapat diterima secara statistik. Parameter kisi hasil refinemen diperoleh sebesar (4,0765 ± 0,0004) Å dengan volume sel unit 67,74 Å³ dan densitas kristal 19,301 g/cm³. Data ini konsisten dengan referensi kristalografi emas murni dan sejalan dengan laporan Lanza dkk*l*. serta Santhosh Kumar dkk, yang melaporkan struktur FCC dengan puncak dominan (111), parameter kisi sekitar 4,07–4,08 Å, serta ukuran kristalit besar dalam kondisi sintesis tanpa surfaktan [28]. Dengan demikian, hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa AuNPs hasil ablasi laser Nd:YAG memiliki struktur kristal FCC tunggal yang stabil, parameter kisi presisi tinggi, dan ukuran kristalit besar yang mendukung efisiensi resonansi plasmon permukaan lokal dalam aplikasi sensor serat optik berbasis indeks bias.

C. Karakterisasi SEM

Karakterisasi morfologi AuNPs dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati bentuk, ukuran, dan distribusi partikel pada permukaan substrat. Pada Gambar 4(a) menunjukkan

bahwa partikel tersebar merata di permukaan, dengan bentuk mendekati sferis dan tidak ditemukan adanya aglomerasi masif antar partikel [29], serta Gambar 4(b) menunjukkan pada diameter partikel bervariasi dalam rentang sekitar 20–35 nm, dengan nilai rata-rata sebesar 27,41 nm sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9.

Variasi ukuran yang relatif sempit ini mencerminkan keberhasilan metode ablasi dalam menghasilkan partikel dengan dispersi ukuran yang seragam, sesuai dengan karakteristik ideal untuk aplikasi berbasis LSPR [30]. Jika dibandingkan dengan hasil karakterisasi XRD yang menunjukkan ukuran kristalit sebesar 63,5 nm, terdapat perbedaan nilai yang dapat dijelaskan oleh perbedaan prinsip dasar dari kedua metode. SEM mengamati morfologi dan ukuran fisik keseluruhan partikel dari gambar permukaan, termasuk kemungkinan agregasi kecil.



(a) (b)

Gambar 4. Hasil Sintesis dengan Metode Ablasi Laser Nd:YAG Pada Frekuensi Laser 8 Hz (a) Foto Mikrografi (b)Distribusi Ukuran Partikel Rata-rata.

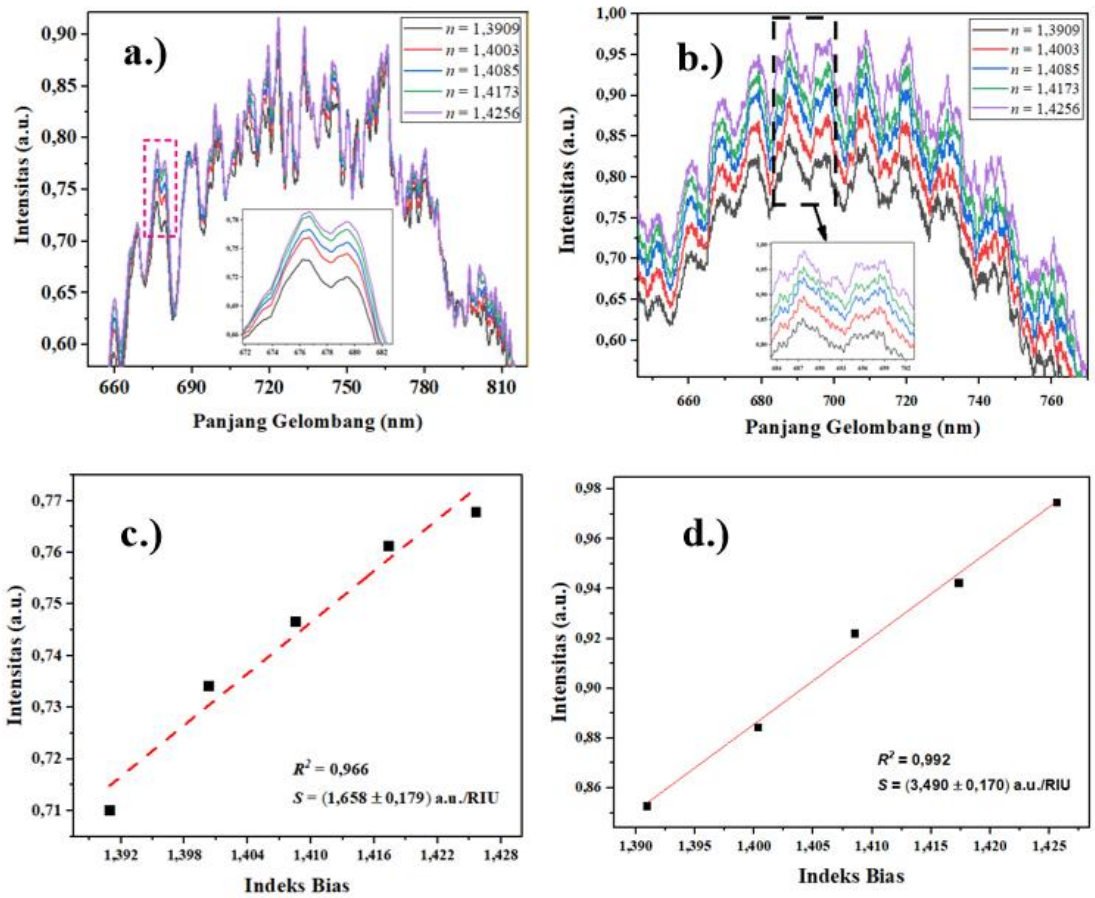
D. Analisis Sensitivitas Sensor Serat Optik

Sensor serat optik berbasis indeks bias bekerja dengan memanfaatkan medan *evanescent* yang muncul akibat perambatan cahaya dalam inti serat. Untuk meningkatkan sensitivitas terhadap perubahan ini, permukaan sensor dapt dimodifikasi dengan material plasmonik seperti AuNPs. Keberadaan AuNPs memperkuat intensitas interaksi optik di antarmuka karena fenomena osilasi kolektif elektron permukaan logam yang sensitif terhadap perubahan lingkungan sekitar [31]. Pengujian sensitivitas sensor dilakukan dalam dua kondisi: tanpa pelapisan (*No Coating*) dan setelah pelapisan AuNPs (*Coating*), menggunakan larutan dengan variasi indeks bias dari 1,3909 hingga 1,4256. Gambar 5(a) dan 5(b) menunjukkan perbandingan spektrum intensitas terhadap panjang gelombang untuk masing-masing kondisi, sedangkan Gambar 5(c) dan 5(d) memperlihatkan hubungan linier antara intensitas dan indeks bias. Pada kondisi *No Coating*, sensitivitas sensor hanya mencapai (1,658 $\pm$ 0,176) a.u./RIU dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,966. Setelah pelapisan, sensitivitas meningkat menjadi (3,490 $\pm$ 0.170) a.u./RIU dan R^2 menjadi 0,992, menunjukkan linieritas dan respons optik yang jauh lebih baik. Selain itu, nilai *limit of detection* (LOD), yang dihitung berdasarkan rumus 3σ/slope dari kurva kalibrasi, menurun dari 0,356 RIU menjadi 0,161 RIU. Penurunan ini mencerminkan kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan indeks bias yang lebih kecil secara signifikan [32].

Peningkatan sensitivitas sebesar 110,4% setelah pelapisan menunjukkan kontribusi signifikan dari efek LSPR dalam memperkuat interaksi antara medan evanescent dan medium luar. Partikel emas yang terdistribusi di permukaan sensor menciptakan titik-titik lokal resonansi optik, yang memperbesar perubahan intensitas saat terjadi fluktuasi indeks bias. Efek ini tidak hanya meningkatkan sinyal, tetapi juga memperbaiki koefisien linieritas dan batas deteksi, menjadikan pelapisan AuNPs sebagai strategi efektif dalam penguatan sensor berbasis serat optik. Keberhasilan ini juga menunjukkan bahwa metode sintesis AuNPs melalui ablasi laser Nd:YAG dapat menghasilkan partikel yang tidak hanya stabil secara struktural tetapi juga aktif secara optik. Temuan ini selaras dengan berbagai studi sebelumnya yang juga melaporkan peningkatan performa sensor setelah pelapisan AuNPs. Hidayat *et al.* melaporkan peningkatan sensitivitas sebesar 122% pada struktur tapered multimode fiber (TMMF) yang dilapisi Au nanosfer berdiameter 12,7 nm, dalam rentang indeks bias 1,3325–1,4266 [33]. Chiang dkk, mencatat

peningkatan sensitivitas sebesar 157% menggunakan AuNPs termodifikasi CM-dextran pada sensor FOPPR pipih, dalam rentang 1,33–1,38 [34]. Kedua penelitian tersebut memperkuat kesimpulan bahwa pelapisan partikel logam nano pada permukaan serat sangat efektif dalam memperkuat interaksi optik sensor.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan performa sensor tidak hanya ditentukan oleh keberadaan AuNPs, tetapi juga oleh sinergi antara konfigurasi serat optik dan efektivitas interaksi medan evanesen dengan fenomena LSPR. Hal ini mengindikasikan bahwa optimasi distribusi AuNPs, kualitas pelapisan, dan desain daerah sensing berpotensi memberikan peningkatan sensitivitas yang lebih lanjut.



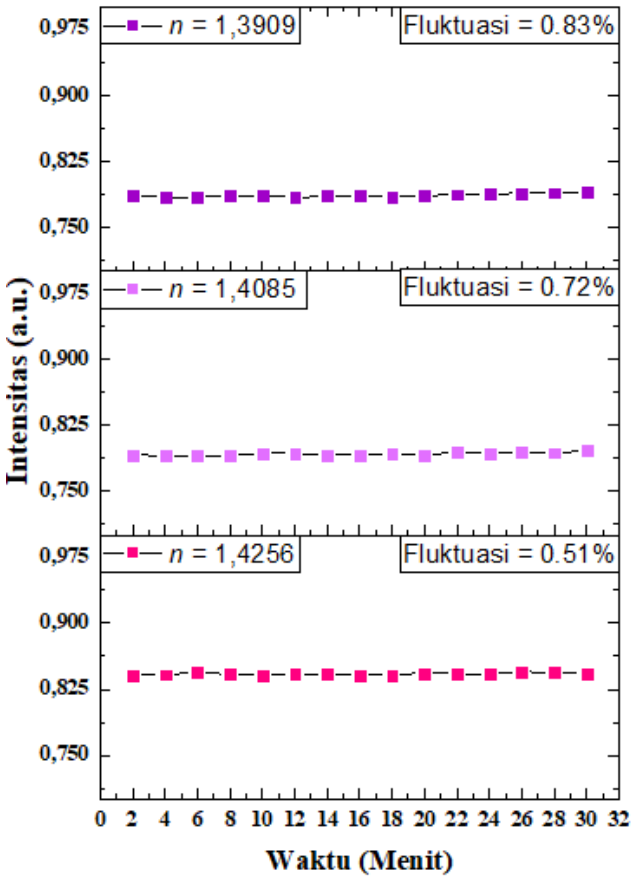
Gambar 5. Spektrum Optik dari Sensor SNS a.) *No-coating*, b.) Terlapisi AuNPs. Hasil Sensitivitas dari sensor SNS c.) *No-coating*, d.) Terlapisi AuNPs.

E. Analisis Stabilitas Sensor Serat Optik Sesudah Terlapisi AuNPs

Pengujian stabilitas dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi sinyal optik yang dihasilkan oleh sensor serat optik berlapis AuNPs dalam rentang waktu pengukuran tertentu. Uji dilakukan selama 30 menit dengan tiga variasi larutan etilen glikol yang memiliki indeks bias n = 1,3909; 1,4085; dan 1,4256. Hasil pengamatan intensitas ditunjukkan pada Gambar 10. Selama durasi pengukuran, intensitas sensor menunjukkan pola yang stabil. Fluktuasi maksimum yang tercatat berada pada 0,83% untuk n = 1,3909; 0,72% untuk n = 1,4085; dan 0,51% untuk n = 1,4256. Nilai-nilai ini berada di bawah ambang batas 1%, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem sensor memiliki kestabilan yang baik dalam kondisi rentang pengukuran waktu dan kondisi lingkungan.

Nilai fluktuasi intensitas yang rendah ini menunjukkan bahwa AuNPs yang terimobilisasi pada permukaan serat optik memberikan kontribusi terhadap kestabilan optik. Stabilitas ini tidak hanya bergantung pada struktur serat, tetapi juga pada sifat kimia AuNPs yang memiliki kestabilan koloid tinggi dan tidak mudah terdegradasi dalam medium cair [35]. Studi sebelumnya oleh Ziai dkk, menunjukkan bahwa penambahan AuNPs ke dalam matriks hidrogel 3D secara efektif mencegah agregasi partikel dan menjaga kestabilan sinyal plasmonik dalam

jangka waktu operasional yang panjang. Berdasarkan hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa pelapisan AuNPs tidak hanya meningkatkan sensitivitas sensor, tetapi juga memperkuat kestabilan sinyal dalam sistem sensor serat optik. Koefisien variasi fluktuasi <1% menunjukkan kestabilan optik jangka pendek yang andal.



Gambar 6. Hasil Uji Stabilitas Sensor SNS Terlapisi AuNPs.

F. Efek Frekuensi Repitisi Laser terhadap AuNPs

Frekuensi repetisi laser merupakan salah satu parameter kunci dalam sintesis AuNPs menggunakan metode ablasi laser. Peningkatan frekuensi umumnya menghasilkan lebih banyak partikel dalam waktu yang lebih singkat, tetapi juga dapat memengaruhi ukuran dan distribusi partikel yang terbentuk [26]. Pada penelitian ini, sintesis AuNPs dilakukan dengan variasi frekuensi laser sebesar 2 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, dan 8 Hz. Hasil karakterisasi menggunakan spektroskopi UV–Vis menunjukkan bahwa frekuensi yang lebih tinggi memberikan absorbansi yang lebih kuat dan spektrum yang lebih tajam. Pada frekuensi 2 Hz diperoleh puncak absorbansi sebesar 0,305 a.u. pada 533 nm dengan nilai FWHM sebesar 51,43 nm. Sementara pada frekuensi 8 Hz, absorbansi meningkat menjadi 0,376 a.u. pada panjang gelombang 527 nm, dengan FWHM yang menyempit menjadi 50,14 nm. Pergeseran puncak serapan ke arah panjang gelombang yang lebih pendek (*blue shift*) mengindikasikan bahwa partikel yang terbentuk memiliki ukuran lebih kecil. Data ini diperkuat oleh hasil perhitungan ukuran kristalit dari analisis XRD yang menunjukkan penurunan dari ±70 nm pada frekuensi rendah menjadi 63,5 nm pada frekuensi 8 Hz.

Jika frekuensi dinaikkan secara berlebihan, misalnya di atas 20 Hz, maka akumulasi gelembung uap dapat menghalangi lintasan laser, menurunkan efisiensi ablasi, dan menyebabkan penurunan kualitas partikel [36]. Frekuensi 8 Hz dalam penelitian ini dipilih berdasarkan hasil karakterisasi optik dan struktur yang konsisten dengan parameter ideal untuk aplikasi sensor. Pada frekuensi ini, diperoleh AuNPs dengan spektrum absorbansi paling tinggi, FWHM paling sempit, dan ukuran kristalit paling kecil di antara variasi yang diuji. Selain itu, warna larutan koloid yang terbentuk berwarna merah tua, konsisten dengan spektrum plasmon khas AuNPs berukuran kecil di rentang 520–530 nm.

Hasil ini konsisten dengan laporan yang menyatakan bahwa peningkatan frekuensi repetisi dalam proses ablasi laser Nd:YAG dapat menghasilkan nanopartikel emas dengan ukuran kristalit yang lebih kecil, distribusi yang lebih homogen, dan respons optik yang lebih tajam, yang sesuai untuk aplikasi sensor plasmonik [29], [28]. Dengan demikian, frekuensi 8 Hz dalam penelitian ini terbukti menghasilkan AuNPs dengan absorbansi maksimum sebesar 0,376 a.u. pada panjang gelombang 527 nm, FWHM sebesar 50,14 nm, dan ukuran kristalit 63,5 nm. Seluruh parameter ini menunjukkan bahwa pemilihan frekuensi 8 Hz telah memberikan hasil yang paling optimal dalam menghasilkan AuNPs berkualitas tinggi, yang sesuai digunakan pada sistem sensor serat optik berbasis LSPR dalam rentang indeks bias 1,3909 hingga 1,4256.

G. Mekanisme Sensor Berbasis LSPR pada Serat Optik

Sensor serat optik berbasis LSPR memanfaatkan interaksi antara medan *evanescent* yang muncul pada batas inti–cladding serat optik dan nanopartikel logam (seperti emas) yang terimobilisasi pada permukaan serat. Ketika cahaya merambat melalui struktur serat optik, energi dalam medan *evanescent* dapat memicu osilasi kolektif elektron bebas di permukaan nanopartikel emas, menghasilkan fenomena LSPR [37]. Ketika terjadi perubahan indeks bias di sekitar permukaan sensor, frekuensi osilasi elektron bebas juga mengalami perubahan, sehingga puncak resonansi dapat bergeser. Respons ini terjadi karena peningkatan indeks bias dapat mempercepat osilasi elektron melalui modifikasi konstanta dielektrik efektif di antarmuka nanopartikel [38]. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 (d), peningkatan indeks bias larutan dari 1,3909 hingga 1,4256 menghasilkan respons intensitas yang meningkat secara linier pada sensor yang telah dilapisi AuNPs, dengan sensitivitas sebesar (3,490 $\pm$ 0.170) a.u./RIU dan R^2 sebesar 0,992.

Sebagai perbandingan, beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sensor indeks bias berbasis AuNPs dengan berbagai konfigurasi serat optik, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2. Peningkatan sensitivitas yang dilaporkan berkisar antara 60–157%, hal ini menunjukkan bahwa kinerja sensor tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan AuNPs, tetapi juga oleh konfigurasi serat optik yang menentukan efektivitas interaksi medan evanesen dengan fenomena LSPR. Pada penelitian ini, sensor berbasis SMF–NCF–SMF menunjukkan peningkatan sensitivitas sebesar 110%, lebih tinggi dibandingkan beberapa konfigurasi serat optik yang telah dilaporkan sebelumnya. Kinerja tersebut mengindikasikan bahwa konfigurasi SMF–NCF–SMF mampu memperkuat interaksi antara medan evanesen dan AuNPs sehingga perubahan indeks bias menghasilkan perubahan intensitas optik yang lebih besar. Meskipun demikian, sensitivitas yang diperoleh masih berada di bawah sensor berbasis FO-PPR dan TMMF, yang menunjukkan bahwa optimasi parameter fabrikasi, seperti distribusi AuNPs, panjang daerah sensing, dan kualitas pelapisan, masih berpotensi meningkatkan performa sensor [33] [34].

Tabel 2. Komparasi Sensor Serat Optik Berbasis AuNPs

Nanomaterial	Struktur Serat Optik	Kenaikan Sensitivitas	Rentang Indeks Bias	Ref
AuNPs	Serat multimode yang diruncingkan (TMMF)	122%	1,33 – 1,43	[33]
AuNP-CM-Dextran	FOPPR pipih	157%	1,33 – 1,38	[34]
Au nanoparticles	Multimode-photonic crystal fiber	60%	1.33-1.37	[39]
AuNPs + lapisan Ag (SPR–LSPR)	Serat multimode (dengan efek kopel SPR–LSPR)	60%	1,33-1,38	[40]
AuNPs	Serat optik D-*shape*	77%	1,33 – 1,40	[27]
AuNPs	SMF-NCF-SMF	110%	1,39-1,42	Penelitian ini

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sensor serat optik berbasis indeks bias menggunakan AuNPs yang disintesis melalui metode ablasi laser Nd:YAG, serta mengevaluasi pengaruh pelapisan AuNPs terhadap performa optik sensor, baik secara struktural maupun fungsional. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa AuNPs hasil sintesis memiliki puncak serapan maksimum pada panjang gelombang 527 nm dengan absorbansi sebesar 0,376 a.u. dan FWHM sempit sebesar 50,14 nm, mengindikasikan distribusi ukuran yang

baik. Karakter morfologi yang diperoleh melalui SEM menunjukkan partikel berbentuk bulat dengan ukuran rata-rata 27,41 nm. Struktur kristal AuNPs teridentifikasi sebagai *face-centered cubic* (FCC) dengan dominasi orientasi bidang (111) dan ukuran kristalit sebesar 63,5 nm dari analisis XRD. Karakteristik ini menunjukkan bahwa AuNPs yang dihasilkan memiliki kualitas kristalin tinggi dan sifat optik yang stabil, sesuai untuk aplikasi plasmonik. Pelapisan nanopartikel emas pada permukaan sensor dilakukan dengan pendekatan self-assembly monolayer, yang berhasil menghasilkan distribusi partikel yang merata tanpa agregasi, sebagaimana ditunjukkan oleh analisis permukaan. Interaksi yang optimal antara partikel dan permukaan serat turut mendukung pembentukan resonansi plasmon yang kuat dan homogen di sepanjang zona sensing.

Peningkatan performa sensor terlihat jelas setelah pelapisan AuNPs. Sensitivitas mengalami peningkatan sebesar 110,4%. Nilai LOD turun dari 0,356 menjadi 0,161, sedangkan nilai koefisien determinasi mencapai R^2 = 0,992, menunjukkan linieritas sistem sensor yang sangat baik terhadap perubahan indeks bias. Selain itu, uji kestabilan selama 30 menit menunjukkan fluktuasi intensitas di bawah 1%, yang menandakan bahwa sensor memiliki stabilitas optik yang baik. Pelapisan AuNPs hasil ablasi laser Nd:YAG terbukti mampu meningkatkan sensitivitas sensor melalui penguatan efek localized surface plasmon resonance (LSPR). Hasil ini menunjukkan bahwa sensor yang dikembangkan memiliki potensi untuk diterapkan dalam pemantauan indeks bias pada bidang lingkungan, analisis cairan kimia, maupun biomedis. Namun, penelitian ini masih terbatas pada rentang indeks bias yang diuji serta belum mencakup evaluasi reproduktibilitas fabrikasi dan stabilitas sensor dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proses fabrikasi, mengevaluasi performa sensor dalam kondisi operasional yang lebih beragam, serta mengkaji keandalannya untuk aplikasi praktis.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Z. Akbarpour, V. Ahmadi, dan F. A. Roghabadi, "Enhanced Mach-Zehnder interferometer multimode–single-mode–multimode fiber optic refractive index sensor based on surface plasmon resonance," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 73, hlm. 103035, Okt 2022, doi: 10.1016/j.yofte.2022.103035.

[2] T. Guo, Á. González-Vila, M. Loyez, dan C. Caucheteur, "Plasmonic Optical Fiber-Grating Immunosensing: A Review," *Sensors*, vol. 17, no. 12, hlm. 2732, Nov 2017, doi: 10.3390/s17122732.

[3] J. S. Paiva, P. A. S. Jorge, C. C. Rosa, dan J. P. S. Cunha, "Optical fiber tips for biological applications: From light confinement, biosensing to bioparticles manipulation," *Biochim. Biophys. Acta BBA - Gen. Subj.*, vol. 1862, no. 5, hlm. 1209–1246, Mei 2018, doi: 10.1016/j.bbagen.2018.02.008.

[4] P. Vaiano *dkk.*, "Lab on Fiber Technology for biological sensing applications," *Laser Photonics Rev.*, vol. 10, no. 6, hlm. 922–961, Nov 2016, doi: 10.1002/lpor.201600111.

[5] L. Liu, Z. Liu, Y. Zhang, dan S. Liu, "Side-Polished D-Type Fiber SPR Sensor for RI Sensing With Temperature Compensation," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 15, hlm. 16621–16628, Agu 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3080290.

[6] R. Zakaria *dkk.*, "Investigation of Surface Plasmon Resonance (SPR) in MoS2- and WS2-Protected Titanium Side-Polished Optical Fiber as a Humidity Sensor," *Micromachines*, vol. 10, no. 7, hlm. 465, Jul 2019, doi: 10.3390/mi10070465.

[7] X. Li, P. Gong, Q. Zhao, X. Zhou, Y. Zhang, dan Y. Zhao, "Plug-in optical fiber SPR biosensor for lung cancer gene detection with temperature and pH compensation," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 359, hlm. 131596, Mei 2022, doi: 10.1016/j.snb.2022.131596.

[8] T. Huang *dkk.*, "Interfacial Sensitivity Enhancement in Optical Microfiber Functionalized With Gold Nanorods Through Tunable LSPR Coupling Strategy," *J. Light. Technol.*, vol. 40, no. 16, hlm. 5752–5761, Agu 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3181059.

[9] S. Singh dan P. K. Maurya, Ed., *Nanotechnology in Modern Animal Biotechnology: Recent Trends and Future Perspectives*. Singapore: Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-6004-6.

[10] R. M. A. Ayaz, A. Balazadeh Koucheh, dan K. Sendur, "Sensitivity of a tapered fiber refractive index sensor at diameters comparable to wavelength," *Optik*, vol. 265, hlm. 169417, Sep 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.169417.

[11] G. Zhu *dkk.*, "Localized Plasmon-Based Multicore Fiber Biosensor for Acetylcholine Detection," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, hlm. 1–9, 2022, doi: 10.1109/TIM.2021.3133335.

[12] H.-P. E, J. A. N. Kong, W.-C. Chen, C.-C. Chen, C.-H. Cheng, dan C.-Y. Liu, "Biocompatible spider silk-based metal-dielectric fiber optic sugar sensor," *Biomed. Opt. Express*, vol. 13, no. 9, hlm. 4483, Sep 2022, doi: 10.1364/BOE.462573.

[13] S. Yiğit Gezgin, A. Kepceoğlu, dan H. Ş. Kiliç, "Experimental and theoretical study of the characteristics of LSPR peaks for metal NPs produced by controlling Ar ambient gas pressure to enhance the efficiency of solar cells," *Can. J. Phys.*, vol. 99, no. 10, hlm. 907–912, Okt 2021, doi: 10.1139/cjp-2020-0626.

[14] M.-X. Li, W. Zhao, G.-S. Qian, Q.-M. Feng, J.-J. Xu, dan H.-Y. Chen, "Distance mediated electrochemiluminescence enhancement of CdS thin films induced by the plasmon coupling of gold nanoparticle dimers," *Chem. Commun.*, vol. 52, no. 99, hlm. 14230–14233, 2016, doi: 10.1039/C6CC08441A.

[15] S. R. Makhsin, M. H. Zakaria, M. H. Noor Akashah, R. Abdul Rani, P. J. Scully, dan P. Gardner, "Enhancing fibre optic sensor signals via gold nanoparticle-decorated agarose hydrogels," *Opt. Mater.*, vol. 143, hlm. 114247, Sep 2023, doi: 10.1016/j.optmat.2023.114247.

[16] B. A. Taha *dkk.*, "Comprehensive Review Tapered Optical Fiber Configurations for Sensing Application: Trend and Challenges," *Biosensors*, vol. 11, no. 8, hlm. 253, Jul 2021, doi: 10.3390/bios11080253.

[17] A. Dixit, S. Sonwal, A. Upadhyay, V. K. Bajpai, Y. S. Huh, dan S. Shukla, "Development and characterization of gold nanoparticle-based colorimetric sensing assay functionalized with L-cysteine for the detection of calcium carbide in ripened mango and banana fruits," *Heliyon*, vol. 11, no. 4, hlm. e42614, Feb 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42614.

[18] M. Vinod, R. S. Jayasree, dan K. G. Gopchandran, "Synthesis of pure and biocompatible gold nanoparticles using laser ablation method for SERS and photothermal applications," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 11, hlm. 1430–1438, Nov 2017, doi: 10.1016/j.cap.2017.08.004.

[19] A. L. Sortino, M. Censabella, G. Munzi, S. Boninelli, V. Privitera, dan F. Ruffino, "Laser-Based Synthesis of Au Nanoparticles for Optical Sensing of Glyphosate: A Preliminary Study," *Micromachines*, vol. 11, no. 11, hlm. 989, Okt 2020, doi: 10.3390/mi11110989.

[20] H. Wu, Y. Xu, M. Sun, Y. Song, dan Q. Wang, "MMF-SMF-MMF optic surface plasmon resonance sensor based on hexagonal plate-like Co(OH)2/TiO2/Au structure," *Measurement*, vol. 226, hlm. 114007, Feb 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2023.114007.

[21] M. E. Shaheen dan A. Y. E. Abdelwahab, "Laser ablation in liquids: A versatile technique for nanoparticle generation," *Opt. Laser Technol.*, vol. 186, hlm. 112705, Agu 2025, doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112705.

[22] N. M. Ahmed *dkk.*, "Water pressure-assisted gold nanoparticle synthesis via pulsed laser ablation in liquid: A simple approach to controlling size distribution," *Optik*, vol. 332, hlm. 172382, Agu 2025, doi: 10.1016/j.ijleo.2025.172382.

[23] N. Mohd Razali *dkk.*, "No-core fiber by self-image length optimization for optical based refractive index sensor," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 74, hlm. 103133, Des 2022, doi: 10.1016/j.yofte.2022.103133.

[24] R. B. P. Rivera *dkk.*, "Influence of the Gold Nanoparticle Size on the Colorimetric Detection of Histamine," *ACS Omega*, vol. 9, no. 31, hlm. 33652–33661, Agu 2024, doi: 10.1021/acsomega.4c02023.

[25] H. Naser, H. M. Shanshool, dan K. I. Imhan, "Parameters Affecting the Size of Gold Nanoparticles Prepared by Pulsed Laser Ablation in Liquid," *Braz. J. Phys.*, vol. 51, no. 3, hlm. 878–898, Jun 2021, doi: 10.1007/s13538-021-00875-x.

[26] A. Khumaeni, H. Sutanto, dan W. S. Budi, "The Role of Laser Irradiance, Pulse Repetition Rate, and Liquid Media in the Synthesis of Gold Nanoparticles by the Laser Ablation Method using an Nd:YAG Laser 1064 nm at Low Energy," *Int. J. Technol.*, vol. 10, no. 5, hlm. 961, Okt 2019, doi: 10.14716/ijtech.v10i5.1953.

[27] J. Kaur Virk, S. Das, R. S. Kaler, H. Singh, dan T. Kundu, "D-shape optical fiber probe dimension optimization for LSPR based bio-sensor," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 71, hlm. 102930, Jul 2022, doi: 10.1016/j.yofte.2022.102930.

[28] G. Lanza, D. Betancourth, A. Avila, H. Riascos, dan J. A. Perez-Taborda, "Control of the size distribution of AuNPs for colorimetric sensing by pulsed laser ablation in liquids," *Kuwait J. Sci.*, vol. 52, no. 1, hlm. 100294, Jan 2025, doi: 10.1016/j.kjs.2024.100294.

[29] B. Azemoodeh Afshar, A. Jafari, M. Maqsood Golzan, dan R. Naderali, "Nonlinear optical properties of gold nanoparticles produced by laser ablation at two different radiation wavelengths," *Results Opt.*, vol. 12, hlm. 100462, Jul 2023, doi: 10.1016/j.rio.2023.100462.

[30] L. S. De Bortoli, C. R. Vanoni, C. L. Jost, D. Z. Mezalira, dan M. C. Fredel, "Stable and ligand-free gold nanoparticles produced by laser ablation as efficient electrocatalysts for electrochemical sensing of dopamine," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 947, hlm. 117744, Okt 2023, doi: 10.1016/j.jelechem.2023.117744.

[31] N. Punjabi, J. Satija, dan S. Mukherji, "Evanescent Wave Absorption Based Fiber-Optic Sensor - Cascading of Bend and Tapered Geometry for Enhanced Sensitivity," dalam *Sensing Technology: Current Status and Future Trends III*, vol. 11, A. Mason, S. C. Mukhopadhyay, dan K. P. Jayasundera, Ed., dalam Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, vol. 11. , Cham: Springer International Publishing, 2015, hlm. 25–45. doi: 10.1007/978-3-319-10948-0_2.

[32] B. Xu, L. Yang, Y. Li, dan C. Cao, "Sensitivity enhancement of fiber-optic SMOX sensor using gold film-AuNPs-antibody three layers structure," *Opt. Mater.*, vol. 162, hlm. 116876, Mei 2025, doi: 10.1016/j.optmat.2025.116876.

[33] N. Hidayat *dkk.*, "Sensitivity enhancement of gold nanospheres assisted CO2 laser tapered optical fiber for refractive index sensor," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 77, hlm. 103275, Mei 2023, doi: 10.1016/j.yofte.2023.103275.

[34] C.-Y. Chiang, C.-H. Chen, dan C.-W. Wu, "Fiber Optic Localized Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Carboxymethylated Dextran Modified Gold Nanoparticles Surface for High Mobility Group Box 1 (HMGB1) Analysis," *Biosensors*, vol. 13, no. 5, hlm. 522, Mei 2023, doi: 10.3390/bios13050522.

[35] H. Duman, F. Eker, E. Akdaşçi, A. M. Witkowska, M. Bechelany, dan S. Karav, "Silver Nanoparticles: A Comprehensive Review of Synthesis Methods and Chemical and Physical Properties," *Nanomaterials*, vol. 14, no. 18, hlm. 1527, Sep 2024, doi: 10.3390/nano14181527.

[36] S. Dittrich, Technical Chemistry I and Center of Nanointegration Duisburg Essen (CENIDE), University of Duisburg-Essen, Universitaetsstr. 7, 45141 Essen, Germany., S. Barcikowski, dan B. Gökce, "Plasma and nanoparticle shielding during pulsed laser ablation in liquids cause ablation efficiency decrease," *Opto-Electron. Adv.*, vol. 4, no. 1, hlm. 200072–200072, 2021, doi: 10.29026/oea.2021.200072.

[37] A. Moslemi *dkk.*, "Highly sensitive gold nanostar based optical fiber sensor with tunable plasmonic resonance," *Sens. Actuators Rep.*, vol. 9, hlm. 100326, Jun 2025, doi: 10.1016/j.snr.2025.100326.

[38] D. Zhang *dkk.*, "Damping resonance and refractive index effect on the layer-by-layer sputtering of Ag and Al2O3 on the polystyrene template," *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 238, hlm. 118430, Sep 2020, doi: 10.1016/j.saa.2020.118430.

[39] B.-T. Wang dan Q. Wang, "Sensitivity-Enhanced Optical Fiber Biosensor Based on Coupling Effect Between SPR and LSPR," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 20, hlm. 8303–8310, Okt 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2866169.

[40] B.-T. Wang dan Q. Wang, "Sensitivity-Enhanced Optical Fiber Biosensor Based on Coupling Effect Between SPR and LSPR," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 20, hlm. 8303–8310, Okt 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2866169.