

Deteksi Residu Malathion pada Tanaman Tomat Menggunakan Sensor LSPR Berbasis Nanobipiramida Emas

Rusmanianty, Iwantono*

Universitas Riau, Indonesia

Email: rusmanianty0195@student.unri.ac.id, iwantono@lecturer.unri.ac.id*

Keywords:

Malathion; sensor plasmonik; LSPR; EMAS nanobipiramida; pesticide residues; tomatoes.

Abstract

*This study aims to develop a plasmonic sensor based on gold nanobipyramids (GNBP) to detect malathion residues in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). GNBP was synthesized using the seed-mediated growth method and characterized using UV-Vis spectroscopy, X-Ray Diffraction (XRD), and Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). The results of UV-Vis characterization showed two peaks of localized surface plasmon resonance (LSPR), namely transverse surface plasmon resonance (t-SPR) at about 560 nm and longitudinal surface plasmon resonance (l-SPR) at about 740 nm which indicates the formation of an anisotropic structure of the gold nanobipyramid. XRD analysis confirmed the typical crystal structure of the face centered cubic (FCC) of gold, while the FESEM imagery showed a bipyramidal morphology with a relatively homogeneous size distribution. Sensor sensitivity testing showed a change in absorbance intensity after the interaction between GNBP and malathion-containing tomato extract, indicating a change in the plasmonic response due to changes in the local refractive index around the nanoparticles. The l-SPR band showed a higher sensitivity than the t-SPR band to the presence of malathion. In addition, repeatability and stability tests show that the sensor has a consistent and stable response during repeated measurements of up to 600 seconds. The results show that GNBP-based plasmonic sensors have good potential for pesticide residue detection applications in the fields of food safety and environmental monitoring.*

Kata Kunci:

Malathion; sensor plasmonik; LSPR; nanobipiramida emas; residu pestisida; tomat.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sensor plasmonik berbasis gold nanobipiramida (GNBP) untuk mendeteksi residu malathion pada tanaman tomat (*Solanum lycopersicum* L.). GNBP disintesis menggunakan metode seed-mediated growth dan dikarakterisasi menggunakan spektroskopi UV-Vis, X-Ray Diffraction (XRD), dan Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). Hasil karakterisasi UV-Vis menunjukkan dua puncak localized surface plasmon resonance (LSPR), yaitu transverse surface plasmon resonance (t-SPR) pada sekitar 560 nm dan longitudinal surface plasmon resonance (l-SPR) pada sekitar 740 nm yang menandakan terbentuknya struktur anisotropik nanobipiramida emas. Analisis XRD mengonfirmasi struktur kristal face centered cubic (FCC) khas emas, sedangkan citra FESEM menunjukkan morfologi bipiramida dengan distribusi ukuran yang relatif homogen. Pengujian sensitivitas sensor menunjukkan adanya perubahan intensitas absorbansi setelah interaksi antara GNBP dan ekstrak tomat yang mengandung malathion, yang mengindikasikan perubahan respons plasmonik akibat perubahan indeks bias lokal di sekitar nanopartikel. Pita l-SPR menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan pita t-SPR terhadap

keberadaan malathion. Selain itu, pengujian repetabilitas dan stabilitas menunjukkan bahwa sensor memiliki respons yang konsisten dan stabil selama pengukuran berulang hingga 600 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor plasmonik berbasis GNBP memiliki potensi yang baik untuk aplikasi deteksi residu pestisida pada bidang keamanan pangan dan pemantauan lingkungan.

PENDAHULUAN

Pestisida merupakan senyawa kimia penting dalam pertanian modern yang digunakan untuk mengendalikan hama, penyakit, dan gulma guna meningkatkan produktivitas tanaman (Beyuo et al., 2024). Meskipun efektif dalam praktik pertanian, residu pestisida yang tersisa dalam lingkungan dan produk pangan telah menimbulkan kekhawatiran serius terhadap kesehatan manusia, ekosistem, serta kualitas air dan tanah (Zhou et al., 2025; Syafrudin et al., 2021). Paparan pestisida dikaitkan dengan gangguan sistem saraf, gangguan endokrin, dan risiko kanker tertentu, bahkan pada konsentrasi rendah dalam makanan maupun lingkungan (Mnif et al., 2011).

Deteksi pestisida secara cepat dan sensitif menjadi kebutuhan penting dalam pemantauan keamanan pangan dan lingkungan (Botnaru et al., 2025). Metode analitik tradisional seperti kromatografi gas atau cair yang digabung dengan spektrometri massa (GC-MS dan LC-MS) merupakan standar dalam analisis residu pestisida (Tsagkaris et al., 2021). Namun, teknik tersebut umumnya memerlukan waktu analisis yang lama, preparasi sampel yang kompleks, biaya operasional tinggi, peralatan laboratorium yang besar, serta operator dengan keahlian khusus (Ghosh et al., 2022). Hal ini membatasi penggunaannya untuk deteksi *in situ* maupun pemantauan secara waktu nyata (Gai et al., 2023).

Sebagai alternatif, sensing berbasis nanoteknologi telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir (Liu et al., 2024). Sensor optik berbasis nanomaterial seperti nanopartikel emas (AuNPs) menawarkan keunggulan signifikan karena fenomena resonansi plasmon permukaan terlokalisasi (Localized Surface Plasmon Resonance/LSPR) dan kemampuan *surface-enhanced Raman scattering* (SERS) (He et al., 2019; Mikac et al., 2022). Fenomena plasmonik ini memungkinkan amplifikasi medan elektromagnetik di permukaan nanopartikel sehingga meningkatkan sensitivitas deteksi pestisida hingga level *ultra trace* (Yu et al., 2021).

Di antara berbagai jenis nanopartikel emas, nanobipiramida emas (GNBP) menarik perhatian karena memiliki sifat plasmonik yang kuat akibat morfologi anisotropiknya. Struktur dengan ujung yang tajam mampu menghasilkan penguatan medan elektromagnetik lokal yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel berbentuk sferis, sehingga meningkatkan sensitivitas resonansi plasmon permukaan terlokalisasi (LSPR) (Guo et al., 2023). Karakteristik tersebut menjadikan nanobipiramida emas berpotensi digunakan sebagai material sensor optik untuk mendeteksi residu pestisida pada konsentrasi rendah (Iwantono et al., 2025). Perubahan lingkungan di sekitar permukaan nanopartikel dapat menyebabkan pergeseran spektral pada puncak LSPR yang kemudian digunakan sebagai indikator keberadaan molekul target (Campu et al., 2019).

Berbagai strategi sensor plasmonik telah diterapkan untuk mendeteksi pestisida, termasuk sensor LSPR berbasis perubahan puncak absorbansi, sensor SERS dengan substrat plasmonik yang dimodifikasi, serta sensor plasmonik yang dikombinasikan dengan elemen pengenalan seperti aptamer atau polimer terukir molekuler (Moslemi et al., 2024). Meskipun

sensor plasmonik menunjukkan sensitivitas yang tinggi dalam deteksi residu pestisida, pengembangan sensor yang sederhana, cepat, dan mampu bekerja pada matriks sampel kompleks seperti produk pangan masih menjadi tantangan (Putra et al., 2021; Zainul, 2025).

Urgensi penelitian ini didasarkan pada beberapa faktor kritis. Pertama, data dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa residu pestisida pada produk pertanian di Indonesia masih menjadi masalah serius dengan dampak kesehatan jangka panjang. Kedua, metode deteksi konvensional tidak praktis untuk pemantauan rutin di tingkat petani atau di pasar tradisional, sehingga diperlukan sensor yang sederhana dan cepat. Ketiga, pengembangan sensor berbasis nanoteknologi berbasis dasar emas yang relatif stabil dan sensitif dapat menjadi solusi yang menjanjikan untuk deteksi residu pestisida di Indonesia.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sensor LSPR berbasis GNBP untuk mendeteksi residu malathion pada tanaman tomat, yang merupakan matriks sampel yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Penelitian ini juga mengkaji secara komprehensif karakterisasi optik, struktur kristal, dan morfologi GNBP serta menguji sensitivitas, repetabilitas, dan stabilitas sensor pada matriks ekstrak tomat. Selain itu, penelitian ini membandingkan respons pita t-SPR dan l-SPR terhadap keberadaan malathion untuk mengidentifikasi mode plasmonik yang paling sensitif.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan sensor LSPR berbasis nanobipiramida emas dalam mendeteksi residu insektisida pada tanaman tomat melalui pengamatan perubahan respon plasmonik terhadap variasi konsentrasi analit.

METODE PENELITIAN

Bahan

Hidrogen tetrakloroaurat ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hidrat asam kloroplatinat ($\text{H}_2\text{PtCl}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), setiltrimetilamonium bromida (CTAB), natrium borohidrida (NaBH_4), asam askorbat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), asam klorida (HCl), perak nitrat (AgNO_3) seluruh larutan disiapkan menggunakan air deionisasi. Sebelum digunakan, seluruh peralatan gelas dibersihkan, kemudian disonikasi dalam air deionisasi selama 15 menit. Proses sonikasi dilanjutkan menggunakan etanol selama 15 menit, kemudian diulangi kembali dengan air deionisasi selama 15 menit untuk memastikan peralatan gelas bebas dari kontaminan. Setelah proses pembersihan selesai, peralatan gelas dikeringkan dalam oven pada suhu $60\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam.

Sintesis Nanobipiramida Emas

GNBP anisotropik disintesis menggunakan metode pertumbuhan termediasi benih (SMG). Proses sintesis dilakukan melalui tahap pembentukan seed sebagai inti pertumbuhan, kemudian dilanjutkan dengan proses pertumbuhan partikel dalam larutan growth untuk membentuk struktur nanobipiramida emas.

1. Pembentukan Nanobipiramida Emas

Proses pembentukan dimulai dengan mencampurkan larutan HAuCl_4 (0,15 mL; 0,01 M) dan H_2PtCl_4 (0,1 mL; 0,01 M) ke dalam larutan CTAB (9,75 mL; 0,1 M). Selanjutnya, larutan NaBH_4 dingin (0,9 mL; 0,01 M) ditambahkan secara perlahan. Penambahan NaBH_4 menyebabkan perubahan warna larutan dari kuning menjadi kecokelatan yang menandakan terjadinya reduksi ion Au^{3+} menjadi Au^0 (Yoo et al., 2022). Pembentukan dilakukan selama 2 jam pada suhu ruang sebelum digunakan untuk proses penumbuhan.

2. Penumbuhan Nanobipiramida Emas

Proses penumbuhan dimulai dengan mencampurkan larutan CTAB (20 mL; 0,1 M) dan HAuCl_4 (0,875 mL; 0,01 M). Selanjutnya, larutan H_2PtCl_4 (0,025 mL; 0,01 M), AgNO_3 (0,2 mL; 0,01 M), HCl (0,4 mL), dan asam askorbat/AA (0,16 mL; 0,1 M) ditambahkan secara bertahap ke dalam larutan sambil diaduk perlahan hingga homogen. Setelah itu, sebanyak 0,05 mL larutan nanoseed ditambahkan untuk memulai proses pertumbuhan nanopartikel. Larutan pertumbuhan kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 2 jam.

Karakterisasi Nanobipiramida Emas

Karakterisasi sifat optik dilakukan menggunakan spektroskopi ultraviolet-visible (UV-Vis) pada rentang panjang gelombang 200–1000 nm untuk mengamati karakteristik serapan plasmonik dan posisi puncak localized surface plasmon resonance (LSPR). Analisis struktur kristal dilakukan menggunakan difraksi sinar-X (X-ray diffraction/XRD) pada rentang sudut 2θ sebesar 20° – 60° untuk mengidentifikasi fase kristalin dan struktur material yang terbentuk. Karakterisasi morfologi permukaan dan bentuk partikel dilakukan menggunakan field emission scanning electron microscope (FESEM) dengan pembesaran $50.000\times$ dan $100.000\times$ untuk mengamati ukuran, distribusi, serta morfologi nanobipiramida emas secara lebih detail.

Persiapan Analit Target

Preparasi analit target dilakukan menggunakan buah tomat (*Solanum lycopersicum* L.) yang diperoleh dari tanaman tomat yang buahnya telah diberi perlakuan pestisida. Larutan malathion disiapkan dengan melarutkan 0,2 gram malathion ke dalam 500 mL air deionisasi. Tanaman tomat disemprot larutan malathion pada pagi dan sore hari. Penyemprotan dilakukan selama satu minggu berturut-turut untuk mensimulasikan paparan pestisida. Setelah perlakuan selesai, buah tomat dikumpulkan, dihancurkan hingga halus, kemudian ditambahkan 30 mL air deionisasi untuk memperoleh ekstrak tomat. Ekstrak tersebut selanjutnya digunakan sebagai analit target dalam pengujian sensor plasmonik untuk mendeteksi residu malathion secara sistemik di dalam buah tomat.

Sensor LSPR Berbasis GNBP

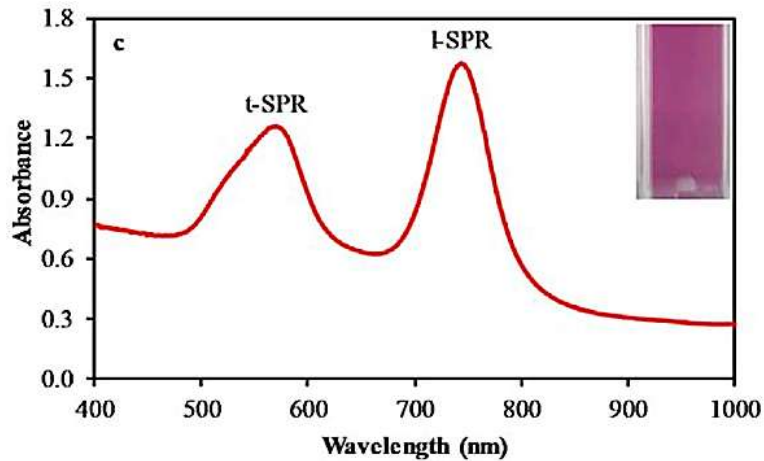
Pengujian sensor dilakukan menggunakan perangkat yang terdiri atas sumber cahaya, tempat kuvet, spektrometer, dan komputer yang dilengkapi perangkat lunak Ocean View. Sensor berbasis GNBP kemudian diuji menggunakan analit berupa ekstrak tomat yang telah diberi perlakuan malathion. Selama proses pengujian, sampel dipaparkan cahaya pada rentang panjang gelombang 300–1000 nm untuk mengamati respons spektral berupa perubahan intensitas absorbansi dan pergeseran panjang gelombang akibat interaksi antara analit dan permukaan nanopartikel. Pengujian performa sensor meliputi uji sensitivitas, repeatabilitas, dan stabilitas. Uji sensitivitas dilakukan menggunakan campuran ekstrak tomat dengan larutan GNBP untuk mengevaluasi respons sensor terhadap variasi perlakuan malathion. Uji repeatabilitas dilakukan sebanyak lima kali pengulangan selama 60 detik menggunakan larutan GNBP untuk menilai konsistensi respons sensor. Sementara itu, uji stabilitas dilakukan selama 10 menit untuk mengamati kestabilan intensitas spektrum sebagai fungsi waktu pengukuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Optik, Struktur, dan Morfologi GNBP

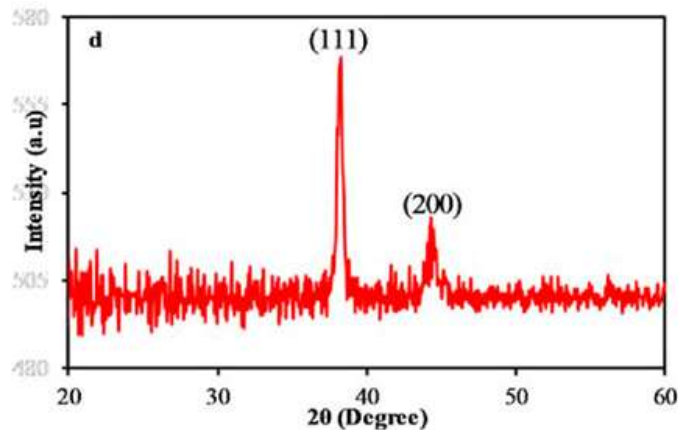
Karakterisasi sifat optik, struktur kristal, dan morfologi GNBP dilakukan menggunakan spektroskopi UV-Vis, difraksi sinar-X (XRD), dan field emission scanning electron

microscope (FESEM). Karakterisasi ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik plasmonik, struktur kristal, serta morfologi partikel GNBP yang terbentuk selama proses sintesis.



Gambar 1. Spektrum UV-Vis GNBP, adapted from Nafisah et al. (2021)

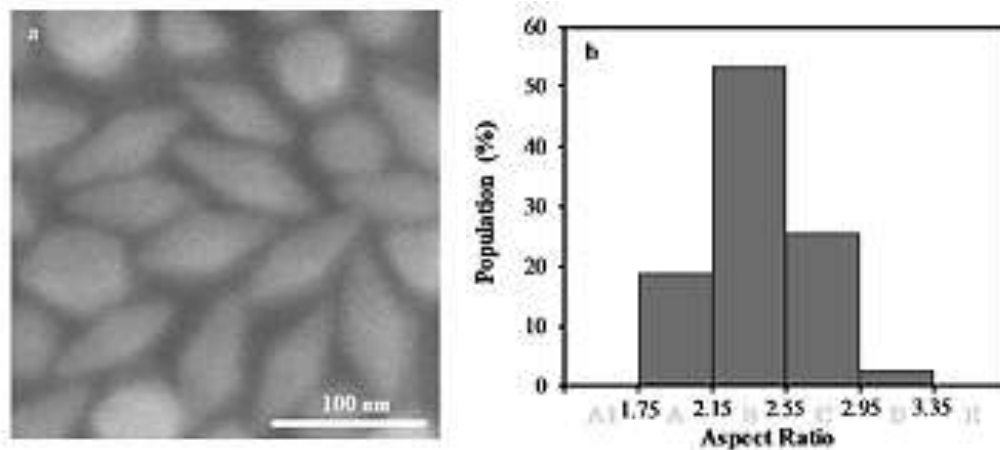
Berdasarkan spektrum UV-Vis pada Gambar 1, puncak t-SPR teramati pada panjang gelombang sekitar 560 nm, sedangkan puncak l-SPR muncul pada sekitar 740 nm. Keberadaan dua puncak serapan tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel emas yang terbentuk memiliki morfologi anisotropik berbentuk bipiramida. Puncak t-SPR berkaitan dengan osilasi elektron pada arah transversal partikel, sementara puncak l-SPR berkaitan dengan osilasi elektron pada arah longitudinal nanopartikel. Intensitas puncak l-SPR yang lebih tinggi dibandingkan t-SPR menunjukkan bahwa GNBP memiliki respons plasmonik yang kuat pada daerah longitudinal (Chow et al., 2019; Liu et al., 2014).



Gambar 2. Pola difraksi sinar-X, adapted from Nafisah et al. (2021)

Berdasarkan pola difraksi sinar-X (XRD) pada **Gambar 2**, teridentifikasi dua puncak difraksi utama pada sudut 2θ sekitar 38° dan 44° yang masing-masing berkorelasi dengan bidang kristal (111) dan (200) dari material emas (Au). Intensitas difraksi tertinggi ditunjukkan oleh bidang (111), yang mengindikasikan bahwa orientasi kristal tersebut mendominasi struktur kristalin GNBP. Puncak difraksi yang tajam dengan lebar puncak yang relatif sempit menunjukkan tingkat kristalinitas material yang baik. Hasil karakterisasi ini mengonfirmasi bahwa nanopartikel yang terbentuk memiliki struktur kristal face centered cubic (FCC) khas

material emas, serta menunjukkan keberhasilan proses sintesis GNPB melalui metode seed-mediated growth.

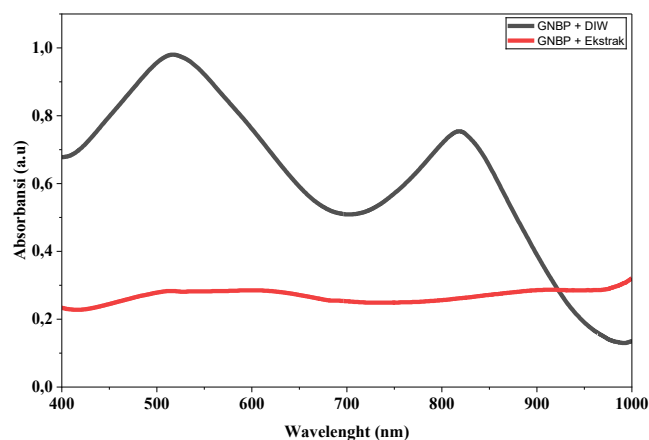


Gambar 3. (a) Citra FESEM, adapted from Nafisah et al. (2021) dan (b) histogram distribusi ukuran, adapted from Nafisah et al. (2021)

Berdasarkan citra FESEM **Gambar 3(a)** dan histogram distribusi ukuran pada **Gambar 3(b)** terlihat bahwa nanopartikel emas yang terbentuk memiliki morfologi anisotropik menyerupai bipiramida dengan orientasi partikel yang tersebar relatif homogen pada permukaan sampel. Partikel menunjukkan ujung yang cenderung tajam, yang merupakan karakteristik khas GNPB. Struktur ujung tajam berperan penting dalam meningkatkan penguatan medan elektromagnetik lokal sehingga mampu meningkatkan sensitivitas plasmonik material. Histogram distribusi ukuran menunjukkan bahwa sebagian besar nanopartikel berada pada rentang ukuran dominan sekitar 2,15–2,55 nm dengan populasi tertinggi mencapai lebih dari 50%. Distribusi ukuran yang relatif sempit menunjukkan bahwa metode seed-mediated growth mampu menghasilkan partikel dengan ukuran yang homogen.

Sensitivitas

Berdasarkan grafik sensitivitas pada **Gambar 4**, sensor LSPR berbasis GNPB menunjukkan perbedaan respons optik terhadap sampel tomat dengan perlakuan yang berbeda.



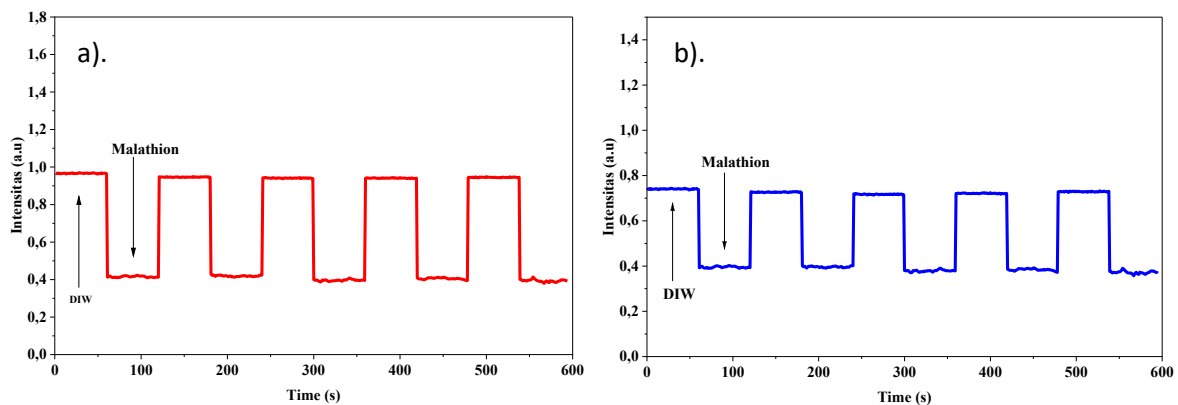
Gambar 4. Spektrum sensitivitas sensor LSPR berbasis GNPB terhadap sampel tomat dengan perlakuan berbeda.

Gambar 4, menunjukkan spektrum absorptansi GNBP dalam medium DIW dan ekstrak tomat yang mengandung malathion. Kedua spektrum memperlihatkan dua pita utama LSPR, yaitu t-SPR pada rentang 500–600 nm dan l-SPR pada rentang 750–850 nm yang menandakan terbentuknya struktur anisotropik GNBP. Spektrum GNBP + DIW menunjukkan intensitas absorptansi lebih tinggi dibandingkan GNBP + ekstrak, dengan puncak maksimum sekitar 0,98 a.u. pada 520 nm dan 0,76 a.u. pada 810 nm. Sementara itu, spektrum GNBP + ekstrak menunjukkan intensitas absorptansi yang jauh lebih rendah dan relatif stabil pada kisaran 0,22–0,31 a.u.

Penurunan intensitas absorptansi pada sampel ekstrak menunjukkan adanya interaksi antara residu malathion dengan permukaan GNBP yang menyebabkan perubahan indeks bias lokal di sekitar nanopartikel sehingga mempengaruhi respons plasmonik. Pita l-SPR menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan lingkungan dibandingkan pita t-SPR. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor plasmonik berbasis GNBP memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi residu malathion melalui perubahan respons optik secara cepat dan sensitif.

Repitabilitas

Pengujian repitabilitas dilakukan untuk melihat siklus intensitas sampel dalam mendeteksi keberadaan malathion pada air cucian tanaman kangkung melalui pengulangan pengukuran selama 600 detik sebanyak 5 siklus. Hasil pengujian repitabilitas sensor dapat dilihat pada **Gambar 5**. Data pengujian dibagi menjadi dua daerah pengamatan, yaitu pita surface plasmon resonance transversal (t-SPR) dan longitudinal (l-SPR) sesuai dengan dua puncak absorpsi UV-Vis pada sensor nanobipiramida emas.



Gambar 5. Hasil pengujian repitabilitas sensor LSPR terhadap DIW dan malathion selama 600 detik menggunakan sensor nanobipiramida emas: (a) pita t-SPR dan (b) pita l-SPR.

Berdasarkan **Gambar 5(a)**, terlihat bahwa intensitas sinyal mengalami perubahan yang berulang secara periodik selama lima siklus pengukuran. Pada saat sensor dialiri DIW, intensitas berada pada nilai yang lebih tinggi, sedangkan ketika sensor diberikan sampel malathion, intensitas mengalami penurunan. Nilai intensitas pada daerah t-SPR untuk DIW berada pada kisaran sekitar 0,92–0,96 a.u., sedangkan intensitas malathion berada pada kisaran sekitar 0,39–0,42 a.u. Pola perubahan intensitas yang konsisten pada setiap siklus menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan respon yang stabil dan dapat kembali ke kondisi awal setelah proses pengukuran.

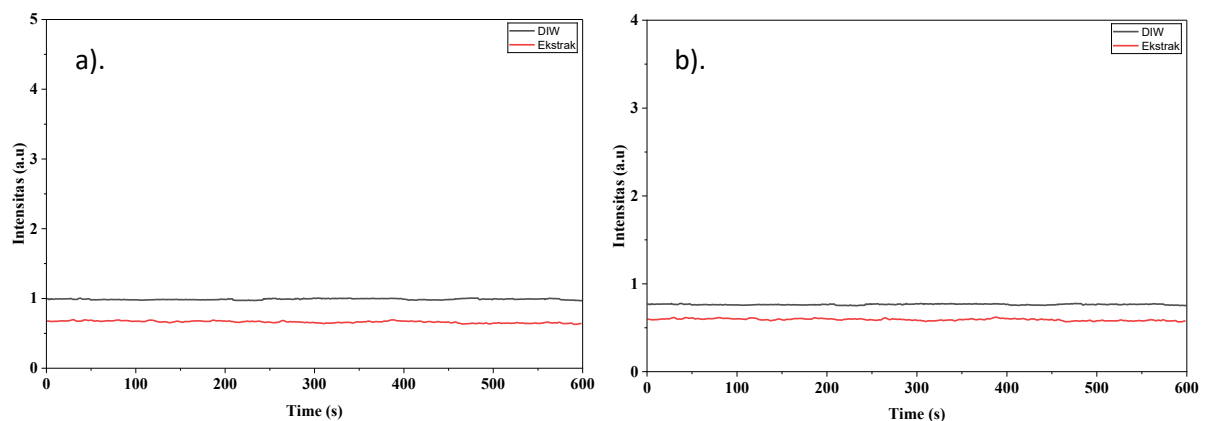
Selanjutnya, pada **Gambar 5(b)**, daerah 1-SPR juga menunjukkan pola repetabilitas yang serupa. Intensitas DIW berada pada kisaran sekitar 0,70–0,74 a.u., sedangkan intensitas malathion berada pada kisaran sekitar 0,36–0,40 a.u. Penurunan intensitas pada saat sensor mendeteksi malathion terlihat jelas pada setiap siklus pengukuran. Respon sensor yang terus berulang dengan pola yang hampir sama menunjukkan bahwa sensor memiliki kemampuan pengulangan (repeatability) yang baik dalam mendeteksi malathion.

Berdasarkan hasil pengujian repetabilitas tersebut, sensor plasmonik berbasis nanobipiramida emas menunjukkan perilaku pemulihan respon yang baik dan stabil selama lima kali siklus pengukuran. Perbedaan intensitas yang jelas antara DIW dan malathion menunjukkan adanya interaksi antara molekul malathion dengan permukaan sensor sehingga menyebabkan penurunan intensitas sinyal. Selain itu, pola pengulangan yang konsisten dengan fluktuasi sinyal yang kecil menunjukkan bahwa sensor memiliki kestabilan performa yang baik dan berpotensi digunakan sebagai sensor deteksi malathion pada tanaman tomat secara berulang dan berkelanjutan.

Stabilitas

Stabilitas sensor LSPR diuji dengan mengamati perubahan intensitas spektrum sensor pada pita surface plasmon resonance (SPR) transversal (t-SPR) dan longitudinal (l-SPR) selama 600 detik menggunakan medium DIW dan ekstrak malathion. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kestabilan respon sensor nanobipiramida emas dalam mendeteksi malathion pada tanaman kangkung.

Gambar 6, menunjukkan hasil pengujian stabilitas sensor terhadap perubahan intensitas selama waktu pengamatan 600 detik.



Gambar 6. Uji stabilitas terhadap DIW dan ekstrak tomat selama 600 detik: (a) pita t-SPR dan (b) pita l-SPR.

Berdasarkan **Gambar 6(a)**, intensitas sinyal pada pita t-SPR menunjukkan perubahan yang relatif kecil selama pengamatan. Intensitas DIW berada pada kisaran sekitar 0,95–1,00 a.u., sedangkan intensitas ekstrak berada pada kisaran sekitar 0,62–0,67 a.u. Kedua kurva cenderung stabil dan tidak mengalami fluktuasi yang signifikan dari waktu 0 hingga 600 detik. Hal ini menunjukkan bahwa respon sensor pada pita transversal memiliki kestabilan yang baik selama proses pengukuran.

Selanjutnya, pada **Gambar 6(b)**, hasil pengujian pada pita l-SPR juga memperlihatkan pola yang stabil. Intensitas DIW berada pada kisaran sekitar 0,75–0,80 a.u., sedangkan intensitas ekstrak berada pada kisaran sekitar 0,56–0,61 a.u. Fluktuasi intensitas yang terjadi relatif kecil dan tidak menunjukkan adanya penurunan ataupun kenaikan yang drastis selama pengamatan berlangsung. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor mampu mempertahankan respon l-SPR secara konsisten selama proses deteksi.

Hasil pengujian stabilitas ini menunjukkan bahwa sensor nanobipiramida emas memiliki performa yang stabil dalam mendeteksi malathion pada tanaman tomat. Stabilitas tersebut ditunjukkan oleh nilai intensitas yang relatif konstan selama 600 detik pengamatan. Pengujian sensor dilakukan pada panjang gelombang respon puncak sebesar 518,886 nm untuk t-SPR dan 817,271 nm untuk l-SPR pada GNBP.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sensor plasmonik berbasis nanobipiramida emas (GNBP) untuk mendeteksi residu malathion pada tanaman tomat (*Solanum lycopersicum* L.). Hasil karakterisasi UV-Vis, XRD dan FESEM menunjukkan bahwa GNBP berhasil terbentuk dengan sifat plasmonik yang baik, ditandai dengan munculnya puncak t-SPR dan l-SPR serta struktur kristal face centered cubic (FCC) khas emas.

Hasil pengujian sensitivitas menunjukkan bahwa sensor mampu membedakan respon optik antara DIW dan ekstrak tomat yang mengandung malathion. Perubahan intensitas pada daerah t-SPR dan l-SPR mengindikasikan adanya interaksi antara molekul malathion dengan permukaan nanopartikel emas. Puncak l-SPR menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan t-SPR terhadap perubahan lingkungan sekitar nanopartikel.

Pengujian repetabilitas selama lima siklus menunjukkan bahwa sensor memiliki kemampuan pengulangan respon yang baik dan stabil. Selain itu, pengujian stabilitas selama 600 detik menunjukkan perubahan intensitas yang relatif kecil pada kedua daerah SPR, sehingga menandakan bahwa sensor mampu mempertahankan respon plasmonik secara konsisten selama proses deteksi.

Secara keseluruhan, sensor LSPR berbasis nanobipiramida emas memiliki potensi yang baik sebagai metode deteksi residu malathion pada tanaman tomat secara cepat, sensitif, dan stabil. Namun, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, seperti belum dilakukan pengujian variasi konsentrasi malathion dan karakterisasi tambahan menggunakan EDX. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan pengujian pada variasi konsentrasi pestisida dan jenis tanaman lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Beyuo, J., Sackey, L. N. A., Yeboah, C., Kayoung, P. Y., & Koudadje, D. (2024). The implications of pesticide residue in food crops on human health: A critical review. *Discover Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00141-z>
- Botnaru, A. A., et al. (2025). Innovative analytical approaches for food pesticide residue detection: Towards One Health-oriented risk monitoring. *Journal of Xenobiotics*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/jox15050151>
- Campu, A., et al. (2019). Multimodal biosensing on paper-based platform fabricated by plasmonic calligraphy using gold nanobipyramids ink. *Frontiers in Chemistry*, 7, Article 55. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00055>

- Gai, T., Nie, J., Ding, Z., Wu, W., & Liu, X. (2023). Progress of rapid detection of pesticides in fruits and vegetables. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3, Article 1253227. <https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1253227>
- Ghosh, S., et al. (2022). The application of rapid test paper technology for pesticide detection in horticulture crops: A comprehensive review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9, Article 48. <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00248-6>
- Guo, R., et al. (2023). Multicolor visual detection of deoxynivalenol in grain based on magnetic immunoassay and enzymatic etching of plasmonic gold nanobipyramids. *Toxins*, 15(6), Article 351. <https://doi.org/10.3390/toxins15060351>
- He, Y., Xiao, S., Dong, T., & Nie, P. (2019). Gold nanoparticles with different particle sizes for the quantitative determination of chlorpyrifos residues in soil by SERS. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(11), Article 2817. <https://doi.org/10.3390/ijms20112817>
- Iwantono, I., et al. (2025). Detection of malathion in *Ipomoea aquatica* using a plasmonic sensor based on Ag-modified gold nanobipyramids. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 9(1), 85–98. <https://doi.org/10.55043/jaast.v9i1.369>
- Liu, W., Liu, D., Zhu, Z., Han, B., Gao, Y., & Tang, Z. (2014). DNA induced intense plasmonic circular dichroism of highly purified gold nanobipyramids. *Nanoscale*, 6(9), 4498–4502. <https://doi.org/10.1039/C4NR00166D>
- Liu, X., et al. (2024). Non-linear responses via agglomeration and aggregation of gold nanoparticles for surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) coupled with chemometric analysis for chlorpyrifos detection. *Food Chemistry*, 455, Article 139944. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139944>
- Mikac, L., Rigó, I., Škrabić, M., Ivanda, M., & Veres, M. (2022). Comparison of glyphosate detection by surface-enhanced Raman spectroscopy using gold and silver nanoparticles at different laser excitations. *Molecules*, 27(18), Article 5767. <https://doi.org/10.3390/molecules27185767>
- Mnif, W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B. (2011). Effect of endocrine disruptor pesticides: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(6), 2265–2303. <https://doi.org/10.3390/ijerph8062265>
- Moslemi, A., Sansone, L., Esposito, F., Campopiano, S., Giordano, M., & Iadicicco, A. (2024). Optical fiber probe based on LSPR for the detection of pesticide thiram. *Optics & Laser Technology*, 175, Article 110882. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110882>
- Nafisah, S., et al. (2021). Effect of additive acid on seeded growth of gold nanobipyramids. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 148, Article 109764. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109764>
- Putra, R. A., Fadlly, T. A., Yakob, M., Jalil, Z., & Rahwanto, A. (2021). *Biosensor berbasis surface plasmon resonance (SPR)*. Deepublish.
- Syafrudin, M., et al. (2021). Pesticides in drinking water: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), Article 468. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020468>
- Tsagkaris, A. S., Pulkrabova, J., & Hajslova, J. (2021). Optical screening methods for pesticide residue detection in food matrices: Advances and emerging analytical trends. *Foods*, 10(1), Article 88. <https://doi.org/10.3390/foods10010088>
- Yoo, S., Nam, D. H., Singh, T. I., Leem, G., & Lee, S. (2022). Effect of reducing agents on the synthesis of anisotropic gold nanoparticles. *Nano Convergence*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00296-1>
- Yu, H., et al. (2021). Nylon membranes modified by gold nanoparticles as surface-enhanced Raman spectroscopy substrates for several pesticides detection. *RSC Advances*, 11(39), 24183–24189. <https://doi.org/10.1039/D1RA03490A>

- Zainul, R. (2025). *Elektrokimia dalam teknologi sensor dan deteksi analit*. PT RajaGrafindo Persada.
- Zhou, W., Li, M., & Achal, V. (2025). A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100410>