

**SIMULASI *LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE* (LSPR)
PADA NANOPARTIKEL LOGAM Cu, Au, DAN Ag (*SPHERE*,
TRIANGLE, *ROD*) UNTUK SENSOR GLUKOSA PADA URINE DENGAN
MATLAB**

SKRIPSI

Oleh:
INA LUTFIANAH
NIM. 220604110007



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**SIMULASI *LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE* (LSPR)
PADA NANOPARTIKEL LOGAM Cu, Au, DAN Ag (*SPHERE*,
TRIANGLE, *ROD*) UNTUK SENSOR GLUKOSA PADA URINE DENGAN
MATLAB**

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si.)**

**Oleh:
INA LUTFIANA
NIM. 220604110007**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

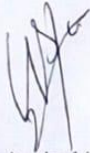
**SIMULASI *LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE* (LSPR)
PADA NANOPARTIKEL LOGAM Cu, Au, DAN Ag (*SPHERE*,
TRIANGLE, *ROD*) UNTUK SENSOR GLUKOSA PADA URINE DENGAN
MATLAB**

SKRIPSI

Oleh:
INA LUTFIANAH
NIM. 220604110007

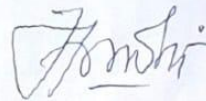
Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal, 26 Juni 2026

Dosen Pembimbing I



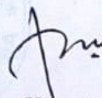
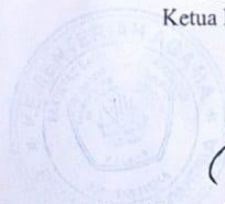
Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si
NIP. 19870215 202321 2 031

Dosen Pembimbing II



Ahmad Luthfin, M.Si
NIP. 19860504 201903 1 009

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T.
NIP. 19740513 200312 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

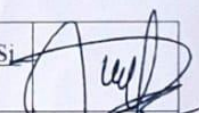
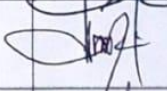
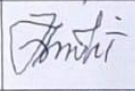
SIMULASI *LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE* (LSPR) PADA
NANOPARTIKEL LOGAM Cu, Au, DAN Ag (*SPHERE, TRIANGLE, ROD*)
UNTUK SENSOR GLUKOSA PADA URINE DENGAN MATLAB

SKRIPSI

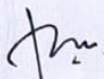
Oleh:

INA LUTFIANA
NIM. 220604110007

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si.)
Pada Tanggal, 26 Juni 2026

Penguji Utama	Prof. Dr. Drs. H. Mokhammad Tirono, M.Si NIP. 19641211 199111 1 001	
Ketua Penguji	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji	<u>Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si</u> NIP. 19870215 202321 2 031	
Anggota Penguji	<u>Ahmad Luthfin, M.Si</u> NIP. 19860504 201903 1 009	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi


Farid Samsu Hyananto, S.Si, M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : INA LUTFIANAH

NIM : 220604110007

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Simulasi *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* pada Nanopartikel Logam *Cu, Au, dan Ag (sphere, triangle, rod)* untuk Sensor Glukosa pada Urine dengan MATLAB

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 26 Juni 2026
Yang Membuat Pernyataan



INA LUTFIANAH
NIM. 220604110007

MOTTO

“Karena sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan,”

(Q.S. al-Insyirah (94): 5)

Sholat, sabar, dan dzikir.

(Hani Junaidi)

Hidup bukan tentang seberapa sempurna semuanya terlihat, tetapi tentang seberapa tulus kita menjalaninya.

(Nyoman Ayu Carmenita)

Allah tidak akan membiarkan hamba-Nya yang menengadah, meminta kepada-Nya kembali dengan tangan kosong. Allah mendengar setiap harapan, menerima setiap permohonan, dan selalu memberi yang terbaik pada waktu yang tepat, bahkan bagi hamba-Nya yang penuh dosa sekalipun.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, kasih, dan kekuatan-Nya yang senantiasa mengiringi setiap langkah dalam perjalanan ini, karya sederhana ini dengan tulus dan kerendahan hati saya persembahkan kepada:

1. Ayah Sukarsono Hadi tercinta. Terima kasih atas doa yang tidak pernah berhenti dipanjatkan untuk penulis. Terima kasih atas setiap nasihat, afirmasi positif, dan keyakinan yang Ayah berikan ketika penulis mulai meragukan diri sendiri. Terima kasih atas kerja keras dan pengorbanan yang mungkin tidak akan pernah bisa penulis balas sepenuhnya. Kehadiran Ayah selalu menjadi pengingat bahwa penulis tidak pernah berjuang sendirian.
2. Ibu tersayang, Afifah. Terima kasih atas kasih sayang yang sering kali tidak diucapkan dengan kata-kata, tetapi selalu penulis rasakan dalam perhatian sehari-hari. Dalam makanan yang disiapkan, dalam hal-hal kecil yang selalu Ibu ingat tentang penulis, dan dalam doa yang tidak pernah putus. Terima kasih karena selalu menjadi tempat pulang, bahkan ketika penulis sering memilih menyimpan banyak hal sendiri.
3. Adik penulis tersayang, Afit. Terima kasih telah menjadi salah satu alasan penulis untuk terus tersenyum dan bertahan. Terima kasih atas doa, dukungan, dan kehadiran kalian yang membuat rumah selalu memiliki tempat untuk dirindukan.
4. Untuk Kakak Yanti dan Kakak ipar Mas Yogi tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan, motivasi, serta semangat dalam setiap langkah perjuanganku. Terima kasih atas segala perhatian, pengorbanan, dan kasih sayang yang telah diberikan sehingga aku mampu menyelesaikan perjalanan ini.

Secara khusus, karya ini juga kupersembahkan kepada keponakan pertamaku tercinta, Daffa, yang kehadirannya selalu membawa kebahagiaan, keceriaan, dan menjadi penyemangat dalam setiap proses yang kujalani. Semoga pencapaian ini menjadi kebanggaan bagi keluarga serta menjadi pengingat bahwa setiap usaha yang disertai doa, dukungan, dan kasih sayang akan membuahkan hasil yang terbaik.

5. Pacar penulis, Praditya NurHaikal. Terima kasih telah membawa begitu banyak kebahagiaan dalam hidup penulis. Terima kasih atas perhatian dan kasih sayang yang kalian tunjukkan dengan begitu tulus. Kamu mungkin tidak menyadarinya, tetapi banyak hari yang terasa lebih ringan karena mengingat tawa dan tingkah.
6. Untuk diri sendiri, Ina Lutfianah, Terima kasih karena telah bertahan sejauh ini. Terima kasih karena tetap melangkah meskipun sering kali diliputi keraguan, ketakutan, dan pertanyaan yang tidak kunjung menemukan jawaban. Terima kasih karena memilih untuk percaya bahwa setiap kesulitan akan berlalu dan setiap perjuangan akan menemukan akhirnya. Tidak semua hari berjalan mudah, tetapi kamu berhasil sampai di titik ini.

Karya ini juga penulis persembahkan untuk semua orang yang hadir dalam perjalanan hidup saya, yang mungkin tidak selalu saya sebutkan satu per satu, tetapi telah memberikan doa, dukungan, perhatian, dan alasan untuk terus melangkah hingga hari ini.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur bagi Allah SWT atas limpahan kasih sayang, rahmat ,
taufiq, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang
berjudul “Simulasi *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) Pada
Nanopartikel Logam Cu, Au, dan Ag (*Sphere, Triangle, Rod*) Untuk Sensor
Glukosa Pada Urine Dengan MATLAB” sebagai salah satu syarat untuk
memperoleh gelar sarjana pada program studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Shalawat serta salam
senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan
seluruh pengikutnya hingga akhir zaman.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan,
bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala
kerendahan hati, penulis sampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat yang tak terhitung jumlahnya, yang telah
memberikan kemudahan dalam setiap kesulitan dan kelapangan dalam setiap
kesempitan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
2. Kedua orang tua penulis, Ayah Sukarsono Hadi dan Ibu Afifah, yang senantiasa
memberikan doa, kasih sayang, dukungan, dan semangat yang tidak pernah
putus dalam setiap langkah penulis.
3. Adik penulis, Afit, Kakak Yanti, Mas Yogi dan Daffa keponakan penulis serta
keluarga besar penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, dan semangat
sehingga penulis dapat menyelesaikan studi ini.
4. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., selaku rektor Universitas Islam Negeri
Maulana Malik Ibrahim Malang.

5. Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd., M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
6. Farid Samsu Hananto S.Si., M.T., selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
7. Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si., dan Ahmad Luthfin, M.si selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu, serta motivasi selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Prof. Dr. Drs. H. Mokhammad Tirono, M.Si., dan Erika Rani, M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.
9. Seluruh Dosen dan Staff Akademik Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah memberikan ilmu, bantuan, dan pelayanan selama masa perkuliahan.
10. Ariani Tri Wahyuni, yang telah menemani penulis dalam berbagai proses selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas dukungan, perhatian, semangat, serta kehadirannya yang senantiasa membantu penulis melewati masa-masa sulit dan tetap percaya pada kemampuan diri sendiri.
11. Praditya NurHaikal, yang telah menemani penulis dalam berbagai proses selama penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas dukungan, perhatian, semangat, serta kehadirannya yang senantiasa membantu penulis melewati masa-masa sulit dan tetap percaya pada kemampuan diri sendiri.
12. Teman-teman satu bimbingan yang telah menjadi rekan seperjuangan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi. Terima kasih atas dukungan, bantuan,

semangat, serta berbagai pengalaman yang telah dibagikan selama perjalanan ini.

13. Teman-teman Program Studi Fisika Angkatan 2022 yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta kebersamaan yang berharga selama menempuh pendidikan di bangku perkuliahan..
14. Terakhir untuk diri sendiri. Terima kasih karena telah bertahan, berusaha, dan tidak menyerah hingga mampu menyelesaikan perjalanan ini. Terima kasih karena tetap melangkah meskipun sering kali diiringi keraguan dan ketakutan. Semoga segala usaha yang telah dilakukan menjadi awal dari langkah-langkah baik berikutnya.

Malang, 26 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT	xvi
المخلص.....	xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)	8
2.1.1 Absorbansi.....	12
2.1.2 Scattering	14
2.1.3 <i>Extinction</i>	16
2.2 Nanopartikel Logam	18
2.2.1 Nanopartikel Emas.....	22
2.2.1.1 <i>Nanosphere</i>	22
2.2.2.2 <i>Nanotriangle</i>	23
2.2.2.3 <i>Nanorod Gold</i>	24
2.2.2 Nanopartikel perak.....	25
2.2.3 Nanopartikel Tembaga.....	26
2.3 Glukosa pada urine	27
2.4 Metode MNPBEM (Metal Nanoparticle Boundary Element Method).....	29
2.5 Nanopartikel dalam Tinjauan Al-Qur'an.....	34

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian	37
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	37
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	37
3.3.1 Alat dan bahan penelitian.....	37

3.4 Prosedur Penelitian	37
3.4.1 Variabel Penelitian	38
3.4.2 Persiapan Data dan Parameter	38
3.4.3 Kalibrasi LSPR	39
3.4.4 Prosedur Visualisasi Data	40
3.5 Diagram Alur	41
3.6 Analisis Data	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Penelitian	43
4.1.1 Pengaruh Jenis Logam LSPR	43
4.1.1.1 Pelemahan Intensitas Cahaya	43
4.1.2 Pengaruh Bentuk Nanopartikel terhadap Karakteristik LSPR	52
4.1.2.1 Nanosphere (Ag) Absorbansi, Scattering dan Extinction	53
4.1.2.2 Nanorod (Ag) Absorbansi, Scattering, dan Extinction	57
4.1.2.3 Nanotriangle (Ag) Absorbansi, Scattering dan Extinction	66
4.1.3 Optimasi Material dan Ketebalan Lapisan Material Plasmoni	75
4.1.4 Pengaruh Indeks Bias Larutan Glukosa LSPR	79
4.1.5 Analisis Fenomena Redshift pada Nanopartikel Logam	81
4.1.6 Hasil Simulasi dengan Teori Gans	82
4.1.7 Hasil Optimasi Nanopartikel Sensor Glukosa Berbasis LSPR	83
4.1.8 Grafik Optimasi Nanopartikel LSPR	84
4.2 Pembahasan	86
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran	91
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Representasi Localized Surface Plasmon (LSP) pada nanopartikel...	11
Gambar 2. 2 Gambar (a) dan (b) menunjukkan The Lycurgus Cup.....	11
Gambar 2. 3 Bagan alir untuk simulasi BEM yang umum	31
Gambar 2. 4 Hasil simulasi BEM.....	32
Gambar 2. 5 Diskritisasi bentuk nanopartikel yang ada pada MNPBEM.....	33
Gambar 3. 1 Diagram Alir Simulasi LSPR.....	41
Gambar 4. 1 Grafik pengaruh jenis logam terhadap absorbansi LSPR.....	45
Gambar 4. 2 Grafik pengaruh jenis logam terhadap scattering LSPR.....	47
Gambar 4. 3 Grafik pengaruh jenis logam terhadap extinction LSPR	50
Gambar 4. 4 Nanorod (Ag) Teori Gans, kanan Nanorod (Ag)	52
Gambar 4. 5 Grafik Normalized Absorption Ag berbentuk nanosphere.....	54
Gambar 4. 6 Grafik Normalized scattering Ag berbentuk nanosphere.....	55
Gambar 4. 7 Grafik Normalized extinction Ag berbentuk nanosphere.....	57
Gambar 4. 8 Grafik Normalized Absorbansi Ag berbentuk nanorod	59
Gambar 4. 9 Grafik Normalized Scattering Ag berbentuk nanorod.....	62
Gambar 4. 10 Grafik Normalized Absorbansi Ag berbentuk nanotriangle.....	64
Gambar 4. 11 Grafik Normalized Scattering Ag berbentuk nanotriangle.....	67
Gambar 4. 12 Grafik Normalized Extinction Ag berbentuk nanotriangle	71
Gambar 4. 13 Grafik Normalized Extinction Ag berbentuk nanorod.....	74
Gambar 4. 14 Grafik pengaruh indeks bias larutan glukosa.....	76
Gambar 4. 15 Grafik redshift panjang gelombang resonansi LSPR.....	80
Gambar 4. 16 Grafik Hasil Simulasi Berdasarkan Teori Gans.....	82
Gambar 4. 17 Grafik optimasi respon LSPR Ag nanorod berdasarkan Gans	84

ABSTRAK

Ina lutfianah, 2026. **Simulasi *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) pada Nanopartikel Logam Cu, Au, dan Ag (*sphere, triangle, rod*) untuk Sensor Glukosa pada Urine dengan MATLAB** Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
Pembimbing: (1) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.si. (2) Ahmad Luthfin, M.si.

Kata Kunci: *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), nanopartikel logam, glukosa urine, MATLAB, nanosphere, nanorod, nanotriangle, sensor optik.

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) merupakan fenomena osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel logam ketika berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan karakteristik optik LSPR pada nanopartikel logam tembaga (Cu), emas (Au), dan perak (Ag) dengan variasi bentuk nanosphere, nanorod, dan nanotriangle sebagai kandidat sensor glukosa pada urine. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan memanfaatkan model teoritis berdasarkan fungsi dielektrik logam dan pengaruh indeks bias medium. Parameter yang dianalisis meliputi spektrum absorbansi, scattering, dan extinction pada rentang panjang gelombang tampak hingga inframerah dekat. Variasi konsentrasi glukosa dimodelkan melalui perubahan indeks bias larutan urine sehingga dapat diamati pergeseran panjang gelombang resonansi (red shift) yang terjadi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap logam dan bentuk nanopartikel memiliki karakteristik resonansi yang berbeda. Nanopartikel Ag menghasilkan puncak resonansi dengan intensitas extinction tertinggi, sedangkan Au menunjukkan kestabilan optik yang baik dan Cu memiliki resonansi pada panjang gelombang yang lebih panjang. Selain itu, bentuk nanotriangle dan nanorod menghasilkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan nanosphere karena distribusi medan elektromagnetik yang lebih kuat pada ujung-ujung partikelnya. Peningkatan indeks bias akibat kenaikan konsentrasi glukosa menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nanopartikel logam berbasis LSPR berpotensi digunakan sebagai sensor glukosa non-invasif dengan sensitivitas yang dipengaruhi oleh jenis logam dan geometri nanopartikel.

ABSTRACT

Ina lutfianah. 2026. **Simulation of Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) Characteristics in Cu, Au, and Ag Nanoparticles with Sphere, Triangle, and Rod Geometries for Urine Glucose Sensor Applications Using MATLAB.**
Thesis. Physics Program, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang.
Advisors: (1) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.si (2) Ahmad Luthfin, M.si.

Keywords: Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), metallic nanoparticles, urine glucose, MATLAB, nanosphere, nanorod, nanotriangle, optical sensor.

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) is a phenomenon involving the collective oscillation of free electrons on the surface of metallic nanoparticles when interacting with electromagnetic waves. This study aims to simulate the optical characteristics of LSPR in copper (Cu), gold (Au), and silver (Ag) nanoparticles with various geometries, namely nanosphere, nanorod, and nanotriangle, as potential candidates for urine glucose sensing applications. The simulation was conducted using MATLAB based on theoretical models incorporating the dielectric functions of metals and the influence of the surrounding medium's refractive index. The analyzed parameters include absorption, scattering, and extinction spectra within the visible to near-infrared wavelength range. Variations in glucose concentration were modeled through changes in the refractive index of urine, allowing the observation of resonance wavelength shifts (red shifts). The simulation results indicate that each metal and nanoparticle geometry exhibits distinct resonance characteristics. Silver (Ag) nanoparticles produce the highest extinction peak intensity, while gold (Au) demonstrates good optical stability and copper (Cu) exhibits resonance at longer wavelengths. Furthermore, nanotriangle and nanorod geometries show higher sensitivity than nanosphere structures due to stronger electromagnetic field enhancement at their sharp edges and tips. An increase in the refractive index caused by higher glucose concentrations results in a shift of the resonance peak toward longer wavelengths. These findings suggest that LSPR-based metallic nanoparticles have significant potential for non-invasive glucose sensing, with sensitivity strongly influenced by both the metal type and nanoparticle geometry.

المخلص

إينا لطفيانة. 2026. محاكاة خصائص الرنين البلازموني السطحي الموضعي في الجسيمات النانوية المعدنية من النحاس والذهب والفضة ذات الأشكال الكروية والمثلثة والعصوية لتطبيقات استشعار الجلوكوز في البول باستخدام برنامج ماتلاب. رسالة جامعية. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج المشرفة الأولى: ويويس ساسمينانينغسيه، الماجستير المشرف الثاني: أحمد لطفين، الماجستير

الكلمات الرئيسية: الأنود الرنين البلازموني السطحي الموضعي ، الجسيمات النانوية المعدنية، جلوكوز البول، ماتلاب ، الجسيمات النانوية الكروية، الجسيمات النانوية العصوية

يُعد الرنين البلازموني السطحي الموضعي ظاهرة تتمثل في التذبذب الجماعي للإلكترونات الحرة على سطح الجسيمات النانوية المعدنية عند تفاعلها مع الموجات الكهرومغناطيسية. يهدف هذا البحث إلى محاكاة الخصائص البصرية للرنين البلازموني السطحي الموضعي في الجسيمات النانوية المعدنية من النحاس والذهب والفضة بأشكال مختلفة هي: الكروي ، والعصوي ، والمثلثي ، بوصفها مرشحات محتملة لاستشعار الجلوكوز في البول. أجريت المحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب بالاعتماد على نموذج نظري قائم على الدالة العازلة للمعادن وتأثير معامل انكسار الوسط المحيط وشملت المعلومات المدروسة أطراف الامتصاص والتشتت والانقراض ضمن نطاق الأطوال الموجية المرئية وحتى الأشعة تحت الحمراء القريبة. وقد تمثيل تغير تركيز الجلوكوز من خلال تغير معامل انكسار محلول البول، مما أتاح ملاحظة انزياح طول موجة الرنين نحو الأطوال الموجية الأكبر (الانزياح الأحمر).

أظهرت نتائج المحاكاة أن لكل نوع من المعادن وأشكال الجسيمات النانوية خصائص رنينية مختلفة. فقد أظهرت الجسيمات النانوية الفضية أعلى شدة لقمة الانقراض، في حين أظهر الذهب استقرارًا بصريًا جيدًا، بينما ظهر رنين النحاس عند أطوال موجية أطول. بالإضافة إلى ذلك، أظهرت الأشكال المثلثية والعصوية حساسية أعلى مقارنة بالشكل الكروي، وذلك بسبب التوزيع الأقوى للمجال الكهرومغناطيسي عند الحواف والأطراف الحادة للجسيمات. كما أن زيادة معامل الانكسار الناتجة عن ارتفاع تركيز الجلوكوز تؤدي إلى انتقال قمة الرنين نحو أطوال موجية أكبر وتشير هذه النتائج إلى أن الجسيمات النانوية المعدنية المعقدة على ظاهرة الرنين البلازموني السطحي الموضعي تمتلك إمكانات واعدة للاستخدام كمستشعرات غير جراحية للجلوكوز، حيث تتأثر حساسيتها بنوع المعدن والهندسة الشكلية للجسيمات النانوية

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penderita diabetes di Indonesia diperkirakan mencapai kisaran 19–20 juta orang dewasa berdasarkan laporan global yang dipublikasikan dalam *IDF Diabetes Atlas* (Saeedi et al., 2021). Prevalensi diabetes mellitus pada populasi dewasa di Indonesia menunjukkan tren peningkatan dalam satu dekade terakhir, sebagaimana dilaporkan dalam Riset Kesehatan Dasar dan publikasi global terbaru (Saeedi et al., 2021). Gejala umum diabetes meliputi buang air kecil berlebihan (poliuria), rasa haus berlebihan (polidipsia), serta penurunan berat badan tanpa sebab yang jelas (American Diabetes Association, 2024). Deteksi diabetes dapat dilakukan melalui pemeriksaan kadar glukosa darah maupun urine sebagai metode skrining non-invasif (American Diabetes Association Professional Practice Committee, 2024).

Glukosa dalam urine (glukosuria) terjadi ketika kadar glukosa darah melebihi ambang batas reabsorpsi ginjal sehingga ginjal tidak mampu menyerap seluruh glukosa dan sebagian dikeluarkan melalui urine (Alicic et al., 2022). Keberadaan glukosa dalam urine dapat digunakan sebagai indikator awal hiperglikemia dan dimanfaatkan sebagai metode skrining sederhana, terutama pada fasilitas pelayanan kesehatan dengan keterbatasan sarana laboratorium (American Diabetes Association, 2024). Meskipun pemeriksaan urine tidak seakurat pemeriksaan darah dalam menentukan kadar glukosa secara kuantitatif, metode ini tetap praktis, cepat, dan bersifat non-invasif sehingga masih digunakan sebagai pemeriksaan penunjang awal di layanan kesehatan primer (World Health Organization, 2022).

Nanopartikel logam seperti emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) telah

banyak digunakan dalam penelitian sensor berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) karena sifat optiknya yang unik saat berinteraksi dengan cahaya (Mauludi et al., 2024). Logam mulia seperti emas dan perak menunjukkan respons plasmonik kuat karena kemampuan elektron bebasnya menghasilkan resonansi tajam pada spektrum visual; hal ini memungkinkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan indeks bias di sekitar permukaan nanopartikel (Nemeth et al., 2025). Perak memiliki karakteristik puncak LSPR yang lebih tajam dan sensitivitas tinggi, sementara emas unggul dalam stabilitas kimia dan biokompatibilitas, yang membuatnya banyak dipilih untuk aplikasi biosensing. Tembaga, meskipun lebih ekonomis, masih dikaji sebagai alternatif karena kecenderungan oksidasi yang dapat menurunkan stabilitas plasmoniknya (Nemeth et al., 2025). Bentuk dan ukuran nanopartikel juga memengaruhi distribusi medan listrik lokal dan posisi panjang gelombang resonansi LSPR. Nanopartikel berbentuk sferis cenderung menghasilkan spektrum yang sederhana, sedangkan yang berbentuk anisotropik seperti nanorod dan nanotriangle dapat menghasilkan lebih banyak mode resonansi dan meningkatkan medan listrik lokal di ujung atau sudutnya, sehingga sensitivitas terhadap perubahan lingkungan menjadi lebih tinggi (Nemeth et al., 2025).

MNPBEM (Metal Nanoparticle Boundary Element Method) adalah toolbox berbasis MATLAB yang dikembangkan untuk menganalisis respons optik sebagai khalifah di bumi sebagaimana dalam Q.S. al-nanopartikel logam menggunakan pendekatan Boundary Element Method (BEM). Metode ini menyelesaikan persamaan Maxwell dalam domain frekuensi melalui pendekatan integral permukaan, sehingga efektif untuk sistem berukuran nano yang memiliki batas geometri kompleks (Waxenegger et al., 2021). MNPBEM mampu menghitung

parameter optik penting seperti penampang absorptansi, scattering, dan extinction berdasarkan fungsi dielektrik kompleks logam $\epsilon(\omega)$ serta indeks bias medium sekitarnya (Maccaferri et al., 2021). Keunggulan utama dalam metode ini mampu memodelkan berbagai bentuk nanopartikel seperti nanosphere, nanorod, nanotriangle dengan tingkat akurasi tinggi (Cha et al., 2022). Sensitivitas LSPR dipengaruhi oleh ukuran, dan jenis material nanopartikel. Metode MNPBEM (Matlab Nanoparticle Boundary Element Method) masih banyak digunakan dalam studi plasmonika modern untuk mengevaluasi pengaruh variasi diameter, aspek rasio, serta sudut tajam terhadap pergeseran panjang gelombang resonansi plasmon. Studi oleh Ulrich Hohenester (2021) menegaskan bahwa pendekatan Boundary Element Method (BEM) sangat efektif dalam memodelkan respons optik nanopartikel logam dengan bentuk kompleks dan anisotropik, termasuk dalam menganalisis multipolar plasmon modes yang muncul pada struktur non-sferis (Ulrich Hohenester (2021)). Peningkatan konsentrasi medan listrik lokal (local field enhancement) pada ujung atau sudut tajam nanopartikel secara signifikan meningkatkan sensitivitas LSPR. Efek ini sangat dominan pada struktur seperti nanorod dan nanotriangle, di mana distribusi medan listrik terlokalisasi kuat pada bagian ujung partikel sehingga menghasilkan pergeseran resonansi yang lebih besar terhadap perubahan indeks bias medium (Juan José Sáenz dkk(2021)).

Penelitian yang baru oleh Xiaohua Zhu dkk. (2022) menunjukkan peningkatan aspek rasio dan ketajaman sudut berbanding lurus dengan nilai sensitivitas dalam satuan nm/RIU. Dengan pendekatan numerik berbasis BEM, pergeseran panjang gelombang resonansi akibat perubahan indeks bias medium dapat dihitung secara kuantitatif dan Penelitian terkini oleh pergeseran panjang

gelombang resonansi LSPR memiliki hubungan yang mendekati linier terhadap perubahan indeks bias medium dalam rentang tertentu, sehingga memungkinkan deteksi biomolekul secara kuantitatif. Sensitivitas sensor LSPR dinyatakan dalam satuan nm/RIU dan diperoleh dari kemiringan kurva hubungan antara panjang gelombang resonansi dan indeks bias lingkungan. Hubungan linier ini menjadi dasar (Jingjing Li dkk. (2021)).

Deteksi glukosa dalam urine, memiliki peningkatan konsentrasi glukosa yang menyebabkan kenaikan indeks bias larutan, dan akan menghasilkan pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (red-shift). Pada nanopartikel emas (Au) dan perak (Ag) berbentuk anisotropik seperti nanorod dan nanotriangle menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel sferis (Yong Wang dkk. (2022)). Penelitian lebih lanjut yakni pendekatan numerik berbasis Boundary Element Method (BEM), termasuk implementasinya dalam MNPBEM, mampu memodelkan respons spektral nanopartikel secara akurat terhadap variasi indeks bias lingkungan biologis. Dalam simulasi biosensing, medium urin dapat direpresentasikan sebagai variasi nilai indeks bias tertentu yang berkorelasi dengan konsentrasi glukosa. Melalui simulasi ini, pergeseran panjang gelombang resonansi dapat diprediksi sebelum tahap fabrikasi, sehingga memungkinkan optimasi desain nanopartikel secara efisien (Maria Gonzales dkk. (2023)). Dalil yang paling terkenal tentang “setiap penyakit ada obatnya” berasal dari hadis Nabi ﷺ:

اَنْزَلَ هَٰذَا دَآءِ اِ هَلْ اَنْزَلَ لَهُ شِفَآءً

Artinya : “Allah tidak menurunkan suatu penyakit melainkan menurunkan pula obatnya.” (HR. Muslim, No. 2204)”

Hadis ini mengajarkan bahwa setiap penyakit, termasuk diabetes melitus, hendaknya diupayakan pengobatannya melalui konsultasi medis, pengaturan pola makan, olahraga, dan terapi yang dianjurkan oleh tenaga kesehatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh jenis logam (Cu, Au, Ag) terhadap absorbansi, scattering, dan extinction pada intensitas puncak LSPR?
2. Bagaimana pengaruh bentuk nanopartikel (nanorod, nanosphere, nanotriangle) terhadap absorbansi, scattering, extinction LSPR larutan glukosa dalam urine?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh jenis logam nanopartikel (Cu, Au, dan Ag) terhadap parameter optik berupa absorbansi, scattering, dan extinction pada intensitas puncak Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR).
2. Menganalisis pengaruh bentuk nanopartikel (nanorod, nanosphere, dan nanotriangle) terhadap nilai absorbansi, scattering, dan extinction LSPR pada larutan glukosa dalam urine.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

A. Manfaat bagi Mahasiswa :

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa terkait karakterisasi nanopartikel logam serta mekanisme kerja *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) dalam aplikasi biosensor. Selain itu, penelitian ini mendukung pengembangan kompetensi mahasiswa

dalam melaksanakan eksperimen laboratorium, menganalisis data spektrum optik, serta memahami hubungan antara bentuk dan jenis logam nanopartikel respons optiknya. Penelitian ini juga menjadi sarana untuk melatih kemampuan berpikir kritis, melakukan interpretasi hasil penelitian secara sistematis, serta memperluas wawasan dan pengalaman mahasiswa dalam bidang nanoteknologi dan kimia analitik. Kompetensi tersebut diharapkan dapat menunjang pelaksanaan penelitian lanjutan maupun pengembangan inovasi di masa mendatang.

B. Manfaat bagi Universitas:

Penelitian ini memberikan manfaat bagi universitas dalam meningkatkan kualitas dan kuantitas karya ilmiah, khususnya pada bidang nanoteknologi dan biosensor optik. Hasil penelitian ini berpotensi memperkuat reputasi akademik universitas di bidang sains dan teknologi melalui kontribusi terhadap pengembangan metode deteksi glukosa yang bersifat non-invasif.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya, membuka peluang kerja sama dengan institusi atau laboratorium lain, serta mendukung pengembangan inovasi yang relevan dengan kebutuhan di bidang kesehatan dan pendidikan.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada tiga jenis logam nanopartikel, yaitu Cu, Au, dan Ag, untuk melihat pengaruhnya terhadap absorbansi, scattering, dan extinction pada puncak LSPR.
2. Bentuk nanopartikel yang dikaji dibatasi pada tiga bentuk, yaitu nanorod,

nanosphere, dan nanotriangle, tanpa membahas bentuk lain.

3. Parameter optik yang dianalisis hanya meliputi absorbansi, scattering, dan extinction, sesuai dengan tujuan penelitian yang berkaitan dengan karakteristik puncak LSPR.
4. Sampel yang digunakan dibatasi pada larutan glukosa dalam urine dengan variasi konsentrasi tertentu dan tidak membahas pengaruh komponen lain yang terdapat dalam urine.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) merupakan fenomena osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel logam ketika berinteraksi dengan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Resonansi ini terjadi ketika frekuensi cahaya yang datang sebanding dengan frekuensi osilasi elektron, sehingga memunculkan peningkatan kuat medan elektromagnetik pada permukaan nanopartikel. Karakteristik ini menjadikan LSPR sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan optik di sekitar nanopartikel, khususnya indeks bias medium (Nanda, 2024). Secara matematis, kondisi resonansi untuk partikel kecil (ukuran jauh lebih kecil dari panjang gelombang cahaya) dapat dijelaskan dengan teori quasi-static approximation, di mana LSPR terjadi saat:

$$\text{Re}[\varepsilon_m(\omega)] = -2\varepsilon_d \quad (2.1)$$

Dengan

Re : Bagian real dari permitivitas kompleks logam

$\varepsilon_m(\omega)$: Permitivitas kompleks material logam sebagai fungsi frekuensi cahaya

ε_d : Permitivitas atau konstanta dielektrik medium di sekitar nanopartikel

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) terjadi ketika nanopartikel logam seperti Au (emas) atau Ag (perak) berinteraksi dengan cahaya pada frekuensi tertentu. Cahaya yang mengenai nanopartikel menyebabkan terbentuknya medan listrik di permukaan partikel, mengakibatkan osilasi kolektif elektron bebas di permukaan nanopartikel. Osilasi ini terjadi karena adanya muatan berlawanan di sisi-sisi nanopartikel. Frekuensi osilasi dipengaruhi oleh ukuran nanopartikel, jenis

logam, dan medium di sekitarnya. Ketika osilasi elektron mencapai frekuensi tertentu, resonansi terjadi, menghasilkan penyerapan cahaya yang signifikan (Nurjannah, 2022).

Dalam bidang sensor, LSPR digunakan untuk mendeteksi perubahan lingkungan optik di sekitar nanopartikel, termasuk biomolekul seperti glukosa, protein, DNA, dan antigen. Perubahan konsentrasi glukosa dalam urine dapat mengubah indeks bias medium sehingga memengaruhi posisi puncak absorpsi, scattering, atau extinction pada nanopartikel. Prinsip inilah yang menjadikan LSPR sangat menarik untuk aplikasi biomedis, terutama karena tidak memerlukan reagen, proses deteksinya cepat, dan dapat dilakukan secara real-time (Zhang et al., 2023).

Secara keseluruhan, perkembangan LSPR dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan signifikan dalam desain material, teknik fabrikasi, serta aplikasi biosensing, termasuk deteksi glukosa menggunakan perubahan indeks bias. Dengan demikian, pemahaman tentang pengaruh logam, bentuk nanopartikel, dan medium biologis sangat penting untuk menghasilkan sensor yang akurat dan dapat diandalkan (Badilescu & Truong, 2020).

Nanopartikel logam seperti emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) merupakan material yang paling sering digunakan dalam aplikasi LSPR karena memiliki densitas elektron bebas tinggi dan kemudahan fabrikasi. Au dikenal sangat stabil dan biokompatibel, Ag memiliki puncak resonansi yang paling tajam, sedangkan Cu lebih ekonomis meskipun kurang stabil karena mudah teroksidasi. Ketiga logam ini dapat menghasilkan absorpsi, scattering, dan extinction yang kuat ketika terpapar cahaya pada panjang gelombang tertentu, sehingga sangat potensial untuk aplikasi optik dan biosensing (Bhalla, 2024).

Bentuk nanopartikel seperti nanosphere, nanorod, dan nanotriangle juga memengaruhi intensitas dan posisi puncak LSPR. Nanorod memiliki dua mode plasmon utama (longitudinal dan transversal) sehingga dapat menghasilkan puncak resonansi ganda, sedangkan nanotriangle memberikan peningkatan medan lokal di ujung-ujung sudutnya. Perubahan bentuk menghasilkan perbedaan kuat medan dekat (*near-field enhancement*) dan respons optik yang lebih kaya dibandingkan nanosphere, sehingga banyak digunakan dalam sensor berbasis indeks bias dan biomolekul (Bonyár, 2021).

LSPR pada nanopartikel logam sangat dipengaruhi oleh keadaan nanopartikel itu sendiri serta kondisi lingkungan di sekitarnya. Faktor *direct* yang memengaruhi LSPR adalah karakteristik material logam yang digunakan, seperti panjang gelombang resonansi dalam bentuk bulk (λ_{bulk}). Di sisi lain, faktor *indirect* yang juga memengaruhi LSPR adalah konstanta dielektrik (ϵd) dari medium di sekitar nanopartikel. Hubungan antara panjang gelombang resonansi LSPR (λ_{LSPR}) dengan keadaan nanopartikel dan medium sekitarnya dapat dijelaskan melalui persamaan berikut (Satoshi Kawata et al., 2017):

$$\lambda_{LSPR} = \lambda_{bulk} (1 + 2 \epsilon d) \quad (2.2)$$

Di mana

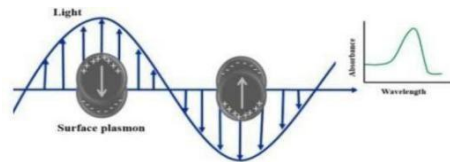
λ_{LSPR} = panjang gelombang resonansi LSPR (nm)

λ_{bulk} = panjang gelombang resonansi material dalam keadaan bulk (nm)

ϵd = konstanta dielektrik dari medium sekitarnya

Persamaan ini menunjukkan bahwa panjang gelombang resonansi (λ_{LSPR}) tidak hanya bergantung pada sifat material nanopartikel (ditunjukkan oleh λ_{bulk}), tetapi juga dipengaruhi oleh lingkungan di sekitar nanopartikel, yang dinyatakan melalui

konstanta dielektrik medium sekitarnya (ϵ_d). Dengan demikian, perubahan indeks bias lingkungan dapat menyebabkan pergeseran panjang gelombang resonansi LSPR, sehingga metode ini sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan dan dapat digunakan untuk deteksi molekul di sekitarnya.



Gambar 2. 1 Representasi Localized Surface Plasmon (LSP) pada nanopartikel dan peristiwa pengikatan nanopartikel dalam spektrum absorbansi. (Aji, 2024).

Persamaan kedua, yaitu hukum Gauss untuk medan magnet:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

Menyatakan bahwa divergensi medan magnet ($\nabla \cdot \mathbf{B}$) selalu nol, yang berarti bahwa tidak ada *monopole* magnetik, yang artinya fluks medan magnet keluar dan masuknya selalu sama, yang membentuk loop tertutup (Dan, 2020).



Gambar 2. 2 Gambar (a) dan (b) menunjukkan The Lycurgus Cup, artefak romawi abad ke-4 yang memperlihatkan perubahan warna akibat interaksi cahaya dengan nanopartikel emas dan perak dalam kaca dikroik. Gambar (c) menunjukkan larutan emas koloid dari eksperimen Michael Faraday yang menghasilkan warna merah khas akibat efek plasmonik nanopartikel emas (Locarno & Brinks, 2023).

2.1.1 Absorbansi

Absorbansi merupakan besaran optik yang menggambarkan cahaya melewatinya. Dalam konteks nanomaterial logam, absorbansi sangat dipengaruhi oleh fenomena resonansi plasmon permukaan terlokalisasi (LSPR), yaitu osilasi kolektif elektron bebas akibat paparan gelombang elektromagnetik. Ketika resonansi terjadi, sebagian besar energi cahaya tidak hanya dipantulkan atau disebarkan, tetapi terutama diserap, sehingga menghasilkan puncak absorbansi yang tajam pada panjang gelombang tertentu (Huang, 2021).

Bentuk nanopartikel misalnya nanosphere, nanorod, dan nanotriangle juga memberikan pengaruh signifikan terhadap absorbansi karena bentuk tersebut menentukan distribusi medan listrik lokal dan karakteristik resonansi. Nanorod memiliki dua mode absorbansi (transversal dan longitudinal), yang membuatnya lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan. Nanotriangle menghasilkan intensifikasi medan listrik pada ujung-ujung tajamnya (tip-enhancement), menyebabkan absorbansi menjadi lebih kuat pada panjang gelombang tertentu. Sementara nanosphere cenderung menunjukkan satu mode absorbansi yang lebih sederhana namun stabil (Zhang & Li, 2023). Absorbansi nanopartikel juga dapat dijelaskan melalui persamaan extinction dalam teori Mie (untuk nanosphere) atau teori Gans (untuk nanorod dan nanotriangle), di mana ekstingsi adalah gabungan dari absorbansi dan scattering. Persamaan extinction umum untuk nanopartikel adalah:

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{sca}} \quad (2.5)$$

Jika ukuran nanopartikel kecil dibanding panjang gelombang cahaya, maka absorbansinya dapat diperkirakan dari (Kelly et al., 2003)):

$$\sigma_{abs} = (2\pi/\lambda) \text{Im}(\alpha) \quad (2.6)$$

dimana :

σ_{abs} = (absorption cross section) (m^2)

$\text{Im}(\alpha)$ = imaginary part polarizability

$2\pi / \lambda$ = (Konstanta gelombang dari cahaya) (Mulyani et al., 2021).

Absorbansi pada nanopartikel logam juga sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel. Semakin besar ukuran nanopartikel, semakin kuat absorbansinya karena jumlah elektron yang dapat beresonansi juga lebih banyak. Namun ketika ukuran menjadi terlalu besar, absorbansi dapat melemah akibat meningkatnya efek radiative damping dan penyebaran energi. Oleh karena itu, pemilihan ukuran partikel yang optimal sangat penting untuk menghasilkan absorbansi yang tajam dan responsif pada aplikasi sensing glukosa (Mulyani et al., 2021).

Selain ukuran dan bentuk, komposisi logam juga memiliki peran penting terhadap intensitas absorbansi. Emas (Au) dikenal memiliki puncak absorbansi yang stabil dan resistansi korosi yang sangat baik, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi biosensing. Namun perak (Ag) umumnya menghasilkan absorbansi dan puncak LSPR yang lebih tajam (*higher Q-factor*) serta sensitif terhadap perubahan indeks bias, meskipun stabilitas kimianya lebih rendah. Tembaga (Cu) memberikan absorbansi kuat pada wilayah tampak–inframerah namun rentan terhadap oksidasi, sehingga memerlukan perlakuan khusus untuk menjaga stabilitas optiknya (Siregar et al., 2023).

Pada aplikasi sensor glukosa, absorbansi digunakan untuk mengukur respons optik secara kuantitatif melalui kurva LSPR. Ketika konsentrasi glukosa meningkat, densitas optik medium berubah, sehingga absorbansi mengalami pergeseran (*red-shift* atau *blue-shift*) tergantung jenis nanopartikel yang digunakan. Fenomena ini memungkinkan pendeteksian glukosa tanpa reagen, cepat, dan dengan sensitivitas tinggi. Oleh karena itu, absorbansi merupakan parameter optik yang sangat penting sebagai dasar mekanisme sensing optik berbasis LSPR (Wang et al., 2024).

2.1.2 Scattering

Scattering atau penyebaran cahaya adalah fenomena ketika gelombang elektromagnetik yang datang mengenai suatu nanopartikel kemudian dipantulkan, dibelokkan, atau tersebar ke berbagai arah. Pada nanopartikel logam seperti emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu), peristiwa scattering terjadi akibat osilasi kolektif elektron bebas yang dipicu oleh cahaya pada frekuensi resonansi, yang dikenal sebagai Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR). Ketika resonansi tercapai, intensitas scattering meningkat secara signifikan sehingga menghasilkan puncak optik yang tajam dalam spektrum. Scattering menjadi sangat penting dalam aplikasi sensor plasmonik karena dapat memberikan informasi perubahan lingkungan optik di sekitar nanopartikel (Zhang et al., 2021). Pada nanopartikel berbentuk bola (nanosphere), teori Mie digunakan untuk menjelaskan proses scattering. Jika ukuran nanopartikel jauh lebih kecil dibanding panjang gelombang cahaya, maka scattering mengikuti pendekatan Rayleigh. Dalam pendekatan ini, intensitas scattering sangat dipengaruhi oleh ukuran nanopartikel, indeks bias medium, dan polarisabilitas. Secara matematis, cross-section scattering dirumuskan sebagai:

$$\sigma_{sca} = 6\pi / k^4 |\alpha|^2 \quad (2.7)$$

Keterangan: (Bohren, C. F. & Huffman, D. R. (1983))

σ_{sca} = Cross-section scattering (m²)

k = Bilangan gelombang ($2\pi / \lambda$) (m⁻¹)

α = Polarisabilitas nanopartikel (m³)

Rumus tersebut menunjukkan bahwa scattering berbanding lurus dengan pangkat empat panjang gelombang dan pangkat enam ukuran partikel. Oleh karena itu, nanopartikel yang lebih besar akan menghasilkan scattering lebih kuat dibanding nanopartikel kecil (Imran et al., 2021). Polarisabilitas nanopartikel (α) menjadi parameter kunci dalam menentukan intensitas scattering. Pada nanopartikel berbentuk bola, polarisabilitas dinyatakan sebagai:

$$\alpha = 4\pi r^3 \cdot ((\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m)) \quad (2.8)$$

Ketika kondisi resonansi $\epsilon_p + 2\epsilon_m = 0$ terpenuhi, intensitas scattering mencapai puncaknya. Resonansi ini menjelaskan mengapa logam mulia seperti Ag dan Au memiliki scattering yang kuat, karena keduanya memiliki permitivitas negatif pada panjang gelombang tampak (Zhao et al., 2023).

Nanopartikel yang tidak berbentuk bola, seperti nanorod dan nanotriangle, scattering dijelaskan menggunakan teori Gans. Dalam teori ini, bentuk dan aspek rasio nanopartikel memengaruhi posisi puncak scattering. Nanorod memiliki dua mode resonansi, yaitu longitudinal dan transverse, sedangkan nanotriangle memiliki sudut tajam yang menghasilkan “hot-spot” medan listrik sehingga meningkatkan scattering. Nanopartikel tersebut menunjukkan respons optik yang lebih kompleks namun lebih kuat dibanding nanosphere, terutama untuk aplikasi sensing (Rahmati et al., 2021). Perubahan indeks bias akibat variasi konsentrasi glukosa dalam urine

menyebabkan pergeseran puncak scattering. Nanopartikel anisotropik seperti nanorod dan nanotriangle menunjukkan perubahan yang lebih kuat karena memiliki medan listrik terlokalisasi pada ujung atau sudut partikel. Karakteristik ini menjadikan scattering sebagai parameter penting dalam pengembangan sensor LSPR modern, khususnya sensor glukosa berbasis nanopartikel logam (Saraswati et al., 2022).

2.1.3 Extinction

Extinction adalah besaran optik yang menggambarkan total pelemahan intensitas cahaya ketika berinteraksi dengan nanopartikel. Extinction merupakan gabungan dari dua proses utama, yaitu absorpsi (penyerapan cahaya oleh nanopartikel) dan scattering (penyebaran cahaya ke berbagai arah). Secara matematis, dirumuskan sebagai:

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{sca}} \quad (2.9)$$

Rumus tersebut menunjukkan bahwa total energi yang hilang dari berkas cahaya tidak hanya diserap sebagai panas oleh nanopartikel, tetapi juga disebarkan ke lingkungan sekitarnya. Konsep *extinction* menjadi fundamental dalam kajian Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), karena puncak LSPR dalam spektrum optik umumnya diukur melalui kurva ekstingsi (Zhang et al., 2021). Nanopartikel logam seperti Au, Ag, dan Cu, proses extinction berkaitan erat dengan osilasi elektron bebas di permukaan nanopartikel ketika dikenai cahaya dengan frekuensi tertentu. Ketika frekuensi cahaya cocok dengan frekuensi resonansi elektron permukaan, terjadi LSPR yang menghasilkan peningkatan tajam pada puncak ekstingsi. Fenomena ini menjadi dasar berbagai aplikasi sensor plasmonik modern, termasuk sensor glukosa berbasis nanopartikel logam (Saraswati et al.,

2022). Nanopartikel kecil yang jauh lebih kecil dari panjang gelombang cahaya, extinction dapat dianalisis menggunakan teori Mie sederhana. Cross-section extinction dalam pendekatan dipolar diberikan oleh:

$$\sigma_{\text{ext}} = (4\pi k) \cdot \text{Im}(\alpha) \quad (2.10)$$

Rumus tersebut menunjukkan bahwa extinction bergantung pada polarisabilitas nanopartikel. Ketika kondisi resonansi dipenuhi dan $\text{Im}(\alpha)$ meningkat, puncak ekstingsi menjadi lebih tinggi dan lebih tajam (Kim et al., 2020). Hal ini menjelaskan mengapa nanopartikel Ag memiliki extinction yang kuat: permitivitas perak menghasilkan respons plasmonik yang sangat tinggi pada panjang gelombang tampak. Extinction juga dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk nanopartikel. Pada nanopartikel berukuran kecil (< 30 nm), absorbansi lebih dominan daripada scattering, sehingga ekstingsi terutama berasal dari energi yang diserap. Namun, untuk nanopartikel lebih besar (> 40 nm), scattering mulai mendominasi dan menghasilkan puncak ekstingsi yang lebih lebar. Oleh karena itu, variasi ukuran nanopartikel memengaruhi posisi dan intensitas puncak extinction (Wang et al., 2021). Bentuk nanopartikel seperti nanorod, nanotriangle, dan nanosphere juga menghasilkan perbedaan signifikan pada spektrum ekstingsi. Nanorod memiliki dua mode utama, yaitu longitudinal dan transversal, yang masing-masing memunculkan puncak ekstingsi berbeda. Nanotriangle memiliki sudut tajam yang menghasilkan medan listrik terlokalisasi (hot spot) sehingga meningkatkan extinction secara signifikan. Kombinasi ini memberikan peluang besar untuk meningkatkan performa sensor optik berbasis LSPR (Rahmati et al., 2021). Dalam konteks deteksi glukosa, perubahan konsentrasi glukosa memengaruhi indeks bias urine yang kemudian mengubah polarisabilitas medium. Perubahan ini memicu pergeseran puncak

ekstingsi (extinction peak), yang dapat diamati melalui simulasi atau eksperimen. Extinction peak shift ini menjadi parameter kunci dalam mendeteksi kadar glukosa menggunakan sensor plasmonik (Zhao et al., 2023). Extinction merupakan parameter optik utama dalam analisis sifat plasmonik nanopartikel logam, karena mencerminkan keseluruhan interaksi cahaya dengan nanopartikel. Pemahaman mengenai absorbansi, scattering, dan faktor-faktor yang memengaruhi ekstingsi sangat penting dalam merancang sensor LSPR yang akurat dan responsif.

2.2 Nanopartikel Logam

Nanopartikel adalah nanopartikel yang tersusun dari material konduktif seperti emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu). Pada ukuran nano, elektron bebas di permukaan dapat mengalami osilasi kolektif saat berinteraksi dengan cahaya sehingga membentuk fenomena Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR). Fenomena ini menghasilkan peningkatan absorbansi, scattering, dan ekstingsi pada panjang gelombang tertentu. Nanopartikel logam menjadi elemen penting dalam biosensor karena puncak LSPR-nya sensitif terhadap perubahan indeks bias lingkungan (Sánchez et al., 2020).

A. Nanosphere

Nanosphere merupakan nanopartikel berbentuk bola dengan simetri isotropik yang menghasilkan satu mode plasmon dominan. Au nanosphere biasanya memberikan puncak absorbansi sekitar 520–540 nm, sementara Ag berada pada kisaran 390–420 nm. Simetri yang tinggi membuat distribusi medan listrik merata, sehingga sensitivitasnya terhadap perubahan lingkungan relatif lebih rendah dibanding bentuk anisotropik. Secara teoretis, sifat optik nanosphere dapat dijelaskan menggunakan teori Mie. Respons optiknya umumnya dihitung melalui

polarisabilitas:

$$\alpha = 4\pi a^3 ((\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_p + 2\epsilon_m)) \quad (2.12)$$

Nanosphere tetap banyak digunakan karena mudah disintesis, stabil, dan memberikan puncak plasmon yang kuat, sesuai untuk aplikasi sensing dasar (Yuan et al., 2021).

B. Nanotriangle

Nanotriangle (nanoprism segitiga) memiliki tepi dan sudut yang tajam sehingga menghasilkan hotspot plasmon yang memperkuat medan listrik lokal. Hal ini meningkatkan sensitivitas LSPR terhadap perubahan indeks bias di sekitarnya. *Nanotriangle* umumnya memiliki dua atau tiga mode plasmon : dipole, quadrupole, dan out-of-plane. Sifat optiknya umumnya dihitung menggunakan modifikasi Teori Gans, dengan polarisabilitas arah:

$$\alpha_i = V ((\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_m + L_i (\epsilon_p - \epsilon_m))) \quad (2.12)$$

Keunggulan *nanotriangle* adalah sensitivitas yang lebih tinggi dibanding *nanosphere* karena lokalisasi medan yang lebih kuat pada ujung-ujungnya (hot-spots). Bentuk ini sangat cocok untuk deteksi biomolekul termasuk glukosa (Rahmani et al., 2022).

C. Nanorod

Nanorod adalah nanopartikel berbentuk batang yang memiliki dua mode plasmon utama: transverse mode (sekitar 520–540 nm) dan longitudinal mode (600–1100 nm). Mode longitudinal dapat dituning dengan mengubah rasio aspek (panjang/diameter). Semakin besar rasio aspek, semakin panjang (red-shift) puncak LSPR. Polarisabilitas nanorod dijelaskan oleh rumus Gans:

$$\alpha_i = V ((\epsilon_p - \epsilon_m) / (\epsilon_m + L_i (\epsilon_p - \epsilon_m))) \quad (2.13)$$

Nanorod dikenal memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan indeks bias, sehingga sangat efektif untuk sensor glukosa, biomarker, dan perubahan komposisi medium (Zhang et al., 2023).

Nanopartikel logam memiliki kemampuan untuk mengalami Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), yaitu fenomena resonansi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel ketika terpapar cahaya. Resonansi ini menghasilkan puncak absorbansi, scattering, dan extinction yang tajam pada panjang gelombang tertentu. Keunikan respons plasmonik ini sangat dipengaruhi oleh jenis logam, ukuran, bentuk, serta lingkungan dielektriknya (Saraswati et al., 2022). Logam mulia seperti Au dan Ag memiliki elektron bebas yang stabil dan respons plasmonik yang kuat, sedangkan Cu memberikan alternatif murah dengan sifat plasmon yang juga signifikan namun perlu perlindungan terhadap oksidasi (Rahmati et al., 2021). Nanopartikel logam memiliki karakteristik utama berupa keberadaan elektron bebas pada permukaan yang mampu beresonansi ketika berinteraksi dengan cahaya. Resonansi ini dikenal sebagai *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR).

Fenomena ini menghasilkan peningkatan tajam pada absorbansi, *scattering*, maupun *extinction* di sekitar panjang gelombang tertentu. Setiap nanopartikel memiliki respons plasmonik yang berbeda tergantung komposisi material, ukuran, dan bentuknya (Saraswati et al., 2022). Misalnya, nanopartikel perak memiliki puncak plasmon paling tajam, emas memberikan stabilitas kimia terbaik, sedangkan tembaga menjadi alternatif murah dengan karakter plasmon cukup kuat meski rentan oksidasi (Rahmati et al., 2021). Ukuran nanopartikel memegang peranan penting dalam menentukan sifat optiknya. Nanopartikel berukuran kecil (< 30 nm)

cenderung menghasilkan absorbansi yang dominan, sedangkan nanopartikel yang lebih besar menghasilkan scattering lebih kuat. Selain ukuran, bentuk nanopartikel seperti *nanosphere*, *nanorod*, dan *nanotriangle* sangat memengaruhi resonansi plasmon karena bentuk menentukan distribusi medan listrik permukaan. *Nanorod* memiliki dua puncak resonansi (longitudinal dan transversal), *nanotriangle* memiliki “*hot spots*” pada ujung-ujung yang tajam, sedangkan *nanosphere* hanya memiliki satu mode resonansi. Faktor-faktor ini membuat nanopartikel sangat fleksibel untuk disesuaikan dengan aplikasi sensor optik (Imran et al., 2021). Selain sifat optiknya, nanopartikel logam juga memiliki kestabilan dan biokompatibilitas yang relevan untuk aplikasi biologis. Nanopartikel emas dikenal sangat stabil terhadap oksidasi, sedangkan nanopartikel perak memiliki sifat antibakteri kuat yang berguna dalam aplikasi medis. Nanopartikel tembaga lebih murah dan mampu menghasilkan plasmon yang kuat, namun sering digunakan dalam bentuk terlapis untuk mencegah oksidasi (Zhao et al., 2023).

Dalam aplikasi sensor glukosa berbasis LSPR, nanopartikel berperan sebagai elemen aktif yang berinteraksi dengan perubahan indeks bias medium (misalnya urine). Ketika konsentrasi glukosa berubah, indeks bias ikut berubah sehingga memicu pergeseran puncak plasmon nanopartikel. Dengan demikian, pemilihan jenis nanopartikel (Cu, Au, Ag) serta bentuknya (*sphere*, *rod*, *triangle*) menentukan sensitivitas, kekuatan sinyal optik, serta kualitas data absorbansi, *scattering*, dan *extinction* yang dicatat di perangkat sensor (Wang et al., 2021).

Nanopartikel merupakan material kunci dalam pengembangan teknologi sensor optik modern. Ukuran kecil, sifat optik yang kuat, keaktifan permukaan, serta fleksibilitas desain menjadikan nanopartikel logam sangat ideal sebagai platform

utama sensor LSPR untuk deteksi biomolekul termasuk glukosa.

2.2.1 Nanopartikel Emas

Nanopartikel emas (*Gold Nanoparticles, AuNPs*) adalah partikel emas berukuran nano (1–100 nm) yang memiliki sifat optik, kimia, dan biologis yang sangat berbeda dibandingkan emas dalam bentuk bulk. Pada skala nano, AuNPs menunjukkan warna khas seperti merah, ungu, atau biru akibat fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), yaitu resonansi osilasi elektron bebas pada permukaan nanopartikel ketika terkena cahaya. Fenomena ini menghasilkan peningkatan intensitas absorpsi, *scattering*, dan *extinction* pada panjang gelombang tertentu, menjadikannya sangat berguna untuk aplikasi sensor optik (Zhang et al., 2021). Nanopartikel emas (AuNP) berukuran 1–100 nm memiliki sifat fisik dan kimia yang lebih unggul dibandingkan material dalam ukuran bulk, seperti sifat plasmonik permukaan, kerapatan tinggi, dan kemampuan mengikat senyawa lain (Badi'ah & Qamariyah, 2023).

2.2.1.1 Nanosphere

Nanosphere memiliki simetri penuh, yang berarti distribusi medan listrik dan resonansi plasmoniknya lebih terkontrol dibandingkan bentuk lain seperti *nanorod* atau nanoprisma. Hal ini memungkinkan analisis yang lebih stabil dan hasil yang lebih akurat. Selain itu, karena bentuknya yang isotropik, medan listrik yang terinduksi di sekitar *nanosphere* lebih merata, menjadikannya lebih ideal untuk aplikasi sensor plasmonik dan penguatan medan optik dalam biosensing. Dengan distribusi medan listrik yang seragam, *nanosphere* dapat meningkatkan sensitivitas deteksi dalam aplikasi berbasis sensor optik. Terakhir, dengan menggunakan model *nanosphere* dalam simulasi, analisis efek plasmonik terhadap interaksi cahaya dan

material dapat dilakukan dengan lebih sederhana namun tetap akurat, tanpa kompleksitas tambahan yang muncul pada bentuk lain seperti *nanorod*. *extinction cross section* (σ_{ext}) memiliki rumus :

$$\sigma_{\text{ext}} = k \times \text{Im}(\alpha) \quad (2.17)$$

Keterangan :

σ_{ext} = *extinction cross section* (penampang *extinction* total)

k = bilangan gelombang dalam medium = $(2\pi \times n_m)$

r = jari-jari nanopartikel

Im = bagian imajiner dari ekspresi di dalam kurung

λ = panjang gelombang cahaya

2.2.2.2 *Nanotriangle*

Menurut Otsuki dkk., sifat LSPR dari *nanotriangle* sangat sensitif terhadap parameter seperti ukuran sisi segitiga, tebal, dan lingkungan dielektrik, menjadikannya kandidat ideal untuk sensor berbasis indeks bias (*refractive-index*) (Otsuki, Sugawa & Jin, 2021). Geometri dari nanoprism segitiga memungkinkan resonansi plasmonik di tepi dan sudut, sehingga efek “antenna” optik sangat kuat dibandingkan bentuk *nanosphere* biasa (J. Otsuki et al., 2021). Selain itu, *nanotriangle* juga menawarkan kemungkinan modifikasi permukaan yang fleksibel, misalnya dengan ligan, guna mengoptimalkan stabilitas dan fungsionalitas sensor (Zhang, Hou, Xu, Wen, Zhang & Xing, 2025). Dalam tinjauan kritis Zhang dkk., disebutkan bahwa nanopartikel emas dengan geometri yang dapat diatur (termasuk *nanotriangle*) sangat bermanfaat dalam platform LSPR karena kemampuannya untuk menyesuaikan panjang resonansi sesuai target aplikasi biomolekul (Zhang, Hou, Xu, Wen, Zhang & Xing, 2025).

2.2.2.3 *Nanorod Gold*

Nanorod (AuNR) juga sangat populer karena sifat plasmoniknya yang “tunabel”: AuNR memiliki dua mode LSPR, yaitu transversal dan longitudinal, di mana mode longitudinal dapat digeser panjang gelombangnya dengan mengubah rasio aspek (length / diameter) (RSC Advances, Alshangiti, 2023). Kontrol aspek rasio pada nanorod sangat penting: rasio aspek yang lebih besar menghasilkan pergeseran puncak LSPR ke panjang gelombang yang lebih panjang (red-shift) dan meningkatkan sensitivitas terhadap perubahan indeks bias medium (Sofani, Putra & Djuhana, 2023).

Dalam penelitian oleh Sofani dkk., simulasi menggunakan metode *Boundary Element Method* (BEM) menunjukkan bahwa sensitivitas LSPR longitudinal nanorod meningkat seiring peningkatan aspek rasio, sementara mode transversal relatif kurang responsif terhadap perubahan aspek rasio (Sofani, Putra & Djuhana, 2023). Aplikasi praktis AuNR dalam sensor telah ditunjukkan oleh penelitian sensor CRP (*C-reaktif protein*) yang menggunakan *nanorod* dimodifikasi dengan aptamer; perubahan LSPR akibat ikatan protein bisa diukur dan limit deteksi tercapai pada 2 nM (PubMed, 2022).

Keunggulan utama nanopartikel emas adalah stabilitas kimia yang sangat tinggi. Tidak seperti tembaga yang mudah teroksidasi atau perak yang dapat mengalami degradasi pada medium tertentu, emas tetap stabil dalam berbagai kondisi, termasuk lingkungan biologis. Hal ini menjadikan AuNPs sangat aman dan kompatibel untuk biosensing, drug delivery, bioimaging, hingga terapi fototermal (Saraswati et al., 2022). Selain itu, permukaan AuNPs mudah dimodifikasi dengan molekul biokimia seperti protein, enzim, atau ligan tertentu, sehingga memperkuat

kemampuan selektivitas sensor. Nanopartikel emas juga memiliki kemampuan optik yang kuat. Intensitas absorpsi pada AuNPs sangat dipengaruhi oleh ukuran dan bentuknya. Pada ukuran kecil (< 20 nm), absorpsi lebih dominan dibanding *scattering*, sedangkan pada ukuran lebih besar, *scattering* meningkat secara signifikan. Bentuk nanopartikel emas juga menentukan posisi puncak LSPR: *nanosphere* cenderung memiliki satu puncak LSPR di sekitar 520–540 nm, sedangkan *nanorod* memiliki dua mode (transversal dan longitudinal), yang memungkinkan pergeseran panjang gelombang hingga wilayah NIR (near-infrared) (Imran et al., 2021). Keunggulan lain dari nanopartikel emas adalah kemampuan untuk menghasilkan puncak plasmon yang stabil, tidak mudah bergeser akibat reaksi kimia, serta memiliki rugi-rugi optik (*losses*) yang lebih rendah dibanding Cu. Hal ini mendukung penggunaan AuNPs dalam sensor optik berpresisi tinggi, termasuk sensor LSPR untuk mendeteksi glukosa dalam urine. Ketika glukosa mengubah indeks bias medium, AuNPs menunjukkan pergeseran intensitas absorpsi atau extinction yang jelas, memudahkan analisis perubahan konsentrasi glukosa (Rahmati et al., 2021).

Sensor berbasis LSPR, terutama dalam pengukuran cairan biologis seperti serum, darah, dan urine (Zhao et al., 2023). Nanopartikel emas merupakan material plasmonik yang sangat unggul dalam hal stabilitas, biokompatibilitas, kekuatan sinyal optik, dan kemudahan modifikasi permukaan. Hal ini menjadikannya komponen esensial dalam pengembangan sensor LSPR modern, termasuk penelitian simulasi nanopartikel logam untuk deteksi glukosa dalam urine.

2.2.2 Nanopartikel perak

Nanopartikel perak (AgNPs) adalah materi nano yang sangat menarik karena

sifat fisika, kimia, dan biomedisnya. Salah satu aspek paling penting dari AgNP adalah morfologinya bentuk partikel seperti sfera, segitiga, atau batang (rod) sangat menentukan sifat optik, interaksi biologis, dan efisiensi aplikasi. Bentuk partikel ini dibentuk melalui berbagai metode sintesis, baik kimia, fisik, maupun biologis, dan morfologi ini sangat memengaruhi perilaku AgNP dalam sistem biologis serta aplikatif (Hang, Wang, & Wu, 2024; Wei, 2024).

Karakteristik nanopartikel perak dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran, distribusi, serta morfologi yang mencakup bentuk, struktur, dan penampilan. Nanopartikel perak yang berukuran lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga sangat memengaruhi sifat katalitik, yaitu kemampuan mempercepat laju reaksi tanpa berubah atau habis, serta meningkatkan sensitivitas pada sensor optik, dan efektivitas antibakterinya. Semakin besar luas permukaan, maka semakin meningkat pula kemampuan katalitik, sensor optik, dan antibakteri nanopartikel tersebut (Kartini et al., 2020).

2.2.3 Nanopartikel Tembaga

Nanopartikel tembaga (CuNPs) adalah partikel logam tembaga berukuran 1–100 nm. Karena ukurannya yang sangat kecil, CuNP memiliki sifat fisika, kimia, dan biomedis yang berbeda dari tembaga biasa. Rasio permukaan ke volume yang tinggi membuat nanopartikel tembaga lebih reaktif, baik secara kimia maupun biologis. CuNP juga dapat menampilkan fenomena plasmonik (LSPR), sehingga cocok untuk sensor optik, katalisis, dan aplikasi fototermal. Selain itu, morfologi nanopartikel tembaga, seperti sferis, segitiga, dan batang (rod), sangat memengaruhi sifat optik, aktivitas antibakteri, serta stabilitasnya dalam sistem biologis atau kimia (Zhou et al., 2021; Kumar et al., 2021). Nanopartikel tembaga berbentuk sferis merupakan bentuk

yang paling sederhana dan mudah disintesis. Bentuk sferis memiliki kestabilan tinggi dan distribusi ukuran yang seragam. CuNP sferis banyak digunakan dalam aplikasi antibakteri, sensor, dan katalisis, karena rasio permukaan-ke-volume yang tinggi memungkinkan interaksi efektif dengan molekul target. Selain itu, bentuk sferis memudahkan prediksi sifat optik nanopartikel, termasuk resonansi plasmon permukaannya (LSPR), sehingga cocok untuk sensor dan aplikasi *optoelektronik* (Sharmila et al., 2022; Zhou et al., 2021).

2.3 Glukosa pada urine

Glukosuria adalah kondisi klinis di mana glukosa diekskresikan melalui urine karena ambang reabsorpsi ginjal terlampaui (Liman, 2023). Pada pasien diabetes mellitus tipe II, kadar HbA1c berkorelasi positif dengan glukosuria, menandakan kontrol glikemik jangka panjang memengaruhi ekskresi glukosa urin (Nurjanah et al., 2023). Sensor glukosa berbasis LSPR bekerja berdasarkan perubahan indeks bias optik pada permukaan nanopartikel akibat interaksi dengan molekul glukosa. Ketika konsentrasi glukosa meningkat, indeks bias medium (n) juga meningkat, menyebabkan pergeseran merah (red shift) pada panjang gelombang resonansi ($\Delta\lambda_{\text{LSPR}}$) (Rathore et al., 2023).

Penelitian ini memiliki nilai indeks bias larutan glukosa dalam urine berada pada kisaran $n \approx 1,335 - 1,345$ untuk variasi konsentrasi 0,80% – 2,00%, dengan kecenderungan meningkat secara hampir linear seiring bertambahnya konsentrasi glukosa. Peningkatan indeks bias ini menjadi parameter penting dalam simulasi LSPR karena secara langsung memengaruhi pergeseran panjang gelombang resonansi yang diamati. Pemeriksaan glukosa dalam urine sering dilakukan sebagai bagian dari uji rutin untuk mendeteksi adanya gangguan metabolisme karbohidrat.

Metode klasik yang sering digunakan adalah uji Benedict, yang didasarkan pada reaksi reduksi ion Cu^{2+} menjadi Cu_2O oleh glukosa pada kondisi basa sehingga menghasilkan perubahan warna dari biru menjadi merah bata. Namun, pada era modern, pemeriksaan kadar glukosa dalam urine lebih sering menggunakan metode enzimatik berbasis glucose oxidase dan peroxidase, atau menggunakan sensor optik dan biosensor berbasis nanoteknologi (Zhang et al., 2021).

Glukosuria sering dikaji bersamaan dengan proteinuria karena ekskresi glukosa tinggi dapat meningkatkan risiko kerusakan glomerulus, yang memicu proteinuria (A. Muslim, 2023). Positivitas glukosuria dan proteinuria secara bersamaan juga meningkatkan risiko komplikasi ginjal pada pasien diabetes (Iptihani, 2024). Ketepatan penanganan sampel urine penting; penundaan pemeriksaan dan penyimpanan pada suhu ruang dapat menurunkan kadar glukosa karena pertumbuhan bakteri, sementara penyimpanan pada suhu dingin menjaga stabilitas glukosa (SIKESNas, 2024).

Berat jenis urine tidak selalu berkorelasi dengan glukosuria karena banyak faktor selain glukosa memengaruhi berat jenis (Kala et al., 2022). Deteksi glukosa dalam urine menggunakan mekanisme plasmonik memberikan keunggulan berupa kecepatan analisis, sensitivitas yang tinggi, dan kebutuhan sampel yang minimal. Nanopartikel logam seperti Cu, Au, dan Ag sangat potensial karena sifat plasmoniknya yang kuat dan kemampuannya berinteraksi secara spesifik dengan molekul glukosa melalui modifikasi permukaan atau interaksi indeks bias (Sharma et al., 2022; Liang et al., 2023). Dengan demikian, integrasi simulasi numerik dan karakterisasi eksperimental membuka peluang besar untuk merancang sensor glukosa berbasis LSPR yang lebih efisien, murah, dan mudah diaplikasikan di

lingkungan klinis maupun home-based monitoring.

2.4 Metode MNPBEM (Metal Nanoparticle Boundary Element Method)

MNPBEM (Metal Nanoparticle Boundary Element Method) merupakan metode numerik berbasis Boundary Element Method (BEM) yang digunakan untuk menghitung respons optik nanopartikel logam. Toolbox ini dikembangkan berbasis MATLAB untuk menyelesaikan persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dengan pendekatan integral permukaan. Menurut Hohenester dan Trügler (2012), MNPBEM memungkinkan perhitungan parameter optik seperti penampang absorpsi (σ_{abs}), scattering (σ_{sca}), dan extinction (σ_{ext}) secara akurat dengan mempertimbangkan fungsi dielektrik logam dan medium sekitarnya. Metode ini sangat efektif untuk memodelkan nanopartikel dengan berbagai bentuk geometris, baik sferis maupun non-sferis.

Simulasi interaksi cahaya dengan nanopartikel logam dalam fenomena LSPR umumnya dilakukan menggunakan pendekatan komputasi, salah satunya dengan metode *Boundary Element Method* (BEM). Metode ini memungkinkan analisis karakteristik optik nanopartikel berdasarkan parameter material dan lingkungan sekitarnya. Parameter yang digunakan dalam simulasi meliputi fungsi dielektrik material nanopartikel, bentuk dan ukuran nanopartikel, serta indeks bias medium. Indeks bias medium, seperti larutan glukosa, biasanya diperoleh dari data sekunder dengan variasi konsentrasi tertentu dan kemudian dikonversi menjadi permitivitas sebagai bagian dari parameter elektromagnetik. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB dengan bantuan toolbox MNPBEM. Melalui simulasi ini dapat diperoleh parameter optik berupa *scattering cross section*, *absorption cross section*, dan *extinction cross section* pada rentang panjang

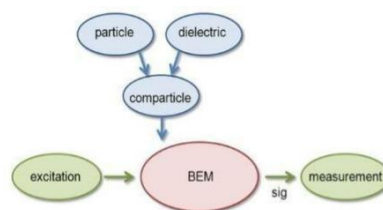
gelombang tertentu Hasil simulasi umumnya disajikan dalam bentuk spektrum optik, di mana posisi puncak resonansi digunakan untuk menganalisis karakteristik LSPR. Pergeseran puncak resonansi terhadap perubahan indeks bias medium menunjukkan sensitivitas nanopartikel, yang menjadi dasar dalam aplikasi sensor berbasis LSPR. Fenomena interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan nanopartikel logam dalam LSPR dapat dijelaskan menggunakan beberapa pendekatan teoretis, yaitu Teori Mie, Teori Gans, dan model *Discrete Dipole Approximation* (DDA).

Teori Mie merupakan solusi analitik dari persamaan Maxwell yang digunakan untuk menjelaskan interaksi cahaya dengan partikel berbentuk bola homogen. Teori ini memungkinkan perhitungan parameter optik seperti *absorption cross section*, *scattering cross section*, dan *extinction cross section*. Dalam konteks LSPR, resonansi terjadi ketika frekuensi cahaya yang datang sesuai dengan frekuensi osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Posisi puncak resonansi dipengaruhi oleh ukuran partikel, sifat dielektrik material, serta indeks bias medium di sekitarnya.

Teori Gans merupakan pengembangan dari Teori Mie yang digunakan untuk partikel berbentuk non-sferis, seperti *nanorod* atau partikel elips. Teori ini memperhitungkan faktor depolarisasi yang menyebabkan munculnya dua mode resonansi, yaitu mode longitudinal dan transversal. Mode longitudinal cenderung mengalami pergeseran ke panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan indeks bias medium.

Model *Discrete Dipole Approximation* (DDA) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis interaksi cahaya dengan nanopartikel berbentuk kompleks. Dalam metode ini, nanopartikel direpresentasikan sebagai kumpulan

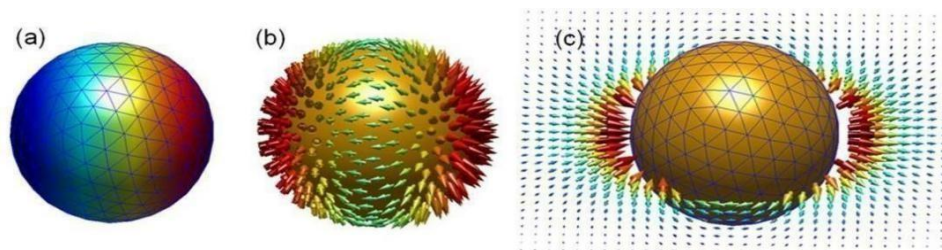
dipol kecil yang saling berinteraksi terhadap medan elektromagnetik. Model ini sangat efektif untuk memodelkan bentuk nanopartikel yang tidak dapat dijelaskan secara analitik, seperti nanotriangle atau struktur tidak beraturan. Berdasarkan ketiga pendekatan tersebut, dapat dipahami bahwa bentuk, ukuran, dan nanopartikel, serta indeks bias medium, sangat memengaruhi karakteristik LSPR. MNPBEM sangat efisien dalam mengatasi masalah dengan geometri kompleks, seperti nanopartikel dengan berbagai bentuk dan ukuran. MNPBEM digunakan untuk menghitung sifat-sifat optik dari nanopartikel, seperti pengurangan dan penyerapan energi (*scattering* dan *absorption*, *exction*). MNPBEM membantu dalam memahami bagaimana ukuran, bentuk, dan densitas nanopartikel memengaruhi LSPR. Perubahan dalam morfologi nanopartikel, seperti ukuran dan bentuk yang lebih besar, dapat mengubah puncak LSPR ke daerah inframerah dekat (NIR) (Gegin et al, 2020).



Gambar 2. 3 Bagan alir untuk simulasi BEM yang umum (Locarno & Brinks 2023)

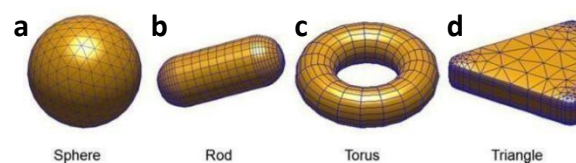
Gambar 2.3 menunjukkan bagan alir simulasi BEM, yang menggambarkan alur kerja dari proses simulasi interaksi cahaya dengan nanopartikel. Proses ini dimulai dengan menentukan jenis partikel yang akan dianalisis, seperti nanopartikel emas atau perak, serta lingkungan sekitarnya yang disebut dielektrik. Kedua elemen ini kemudian digabungkan menjadi sistem partikel komposit (*comparticle*), yang merepresentasikan kondisi nyata dari partikel dalam lingkungannya. Setelah sistem ini terbentuk, langkah berikutnya adalah menjalankan simulasi BEM, yang

bertugas menghitung bagaimana gelombang cahaya berinteraksi dengan nanopartikel, termasuk pembentukan medan listrik dan medan magnet di sekitarnya. Setelah sistem mengalami eksitasi, yaitu diberi sumber cahaya dengan panjang gelombang tertentu, elektron dalam nanopartikel akan berosilasi, menghasilkan resonansi plasmonik jika frekuensi cahaya karakteristik partikel. Setelah eksitasi ini, sistem akan mengukur respons nanopartikel terhadap cahaya, seperti berapa banyak cahaya yang diserap atau dipantulkan. Hasil pengukuran ini kemudian dianalisis nanopartikel dalam berbagai kondisi. Simulasi BEM menggunakan MNPBEM ini menghasilkan pemetaan bagaimana muatan listrik dan medan listrik terbentuk di sekitar nanopartikel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut :



Gambar 2.4 Hasil simulasi BEM: (a) distribusi muatan permukaan σ_i , dan bagian riil dari medan listrik yang terinduksi pada (b) batas partikel serta (c) di area lain

Dalam simulasi ini menggunakan eksitasi gelombang bidang terhadap nanopartikel emas dengan diameter 10 nm yang terbenam dalam air. Selain itu, berbagai bentuk nanopartikel telah dikaji dalam simulasi ini menggunakan MNPBEM *toolbox*, seperti yang ditunjukkan dalam gambar berikut:



Gambar 2. 5 Diskritisasi berbagai bentuk nanopartikel yang ada pada MNPBEM Toolbox (Diadaptasi dari literatur plasmonik terkini (2016–2024)).

Simulasi Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR), MNPBEM digunakan untuk memodelkan spektrum absorpsi, ekstingsi, dan scattering nanopartikel logam seperti Au, Ag, dan Cu (Sobhani et al., 2023). Simulasi ini sangat penting karena sifat LSPR dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, jenis logam, dan indeks bias medium sekitar nanopartikel (Liang et al., 2023).

Hasil simulasi tersebut juga digunakan untuk menentukan parameter kinerja sensor seperti figure of merit (FoM), yang merupakan rasio antara sensitivitas (pergeseran puncak per perubahan indeks bias) dan lebar puncak resonansi (FWHM). FoM yang tinggi menunjukkan sensor yang lebih selektif dan akurat, sehingga perhitungan FoM menjadi salah satu tahap penting dalam desain sensor plasmonik modern (Chen et al., 2023). Selain FoM, parameter lain seperti limit of detection (LoD), linearitas respons, dan stabilitas optik nanopartikel juga dapat dievaluasi melalui pendekatan komputasional.

Glukosuria sendiri tidak hanya dipahami sebagai indikator klinis adanya hiperglikemia, tetapi juga menjadi target penting dalam pengembangan sensor LSPR berbasis nanopartikel logam. Toolbox MNPBEM memungkinkan simulasi nanopartikel berbentuk sphere, rod, dan triangle menggunakan metode Boundary Element Method (BEM), yang hanya mendiskretisasi permukaan nanopartikel sehingga lebih efisien dibandingkan metode volume seperti FDTD (Hohenester & Trügler, 2022). Dengan BEM, puncak resonansi LSPR dan pergeseran panjang gelombang akibat perubahan indeks bias (misal karena glukosa hadir di urine) dapat dihitung secara akurat (Chen et al., 2023).

MNPBEM, toolbox juga mendukung simulasi resonansi optik pada nanopartikel dan sistem nanofotonik, serta dapat menghitung mode quasinormal

menggunakan metode Galerkin BEM (Hohenester et al., 2022). Toolbox ini kompatibel dengan MATLAB terbaru dan digunakan untuk prediksi spektrum LSPR dari berbagai bentuk nanopartikel. Dalam konteks deteksi glukosa pada urine, simulasi LSPR dengan MATLAB membantu memperkirakan sensitivitas sensor, batas deteksi, dan efektivitas bentuk nanopartikel (sphere, rod, triangle) untuk perubahan indeks bias akibat glukosa (Sobhani et al., 2023). Hal ini penting agar sensor dapat mendeteksi glukosa urin secara cepat dan akurat.

MATLAB dan toolbox-nya seperti MNPBEM menyediakan dasar numerik yang kuat untuk simulasi LSPR, prediksi spektrum nanopartikel logam, dan optimasi desain sensor glukosa berbasis nanopartikel Au, Ag, dan Cu (MathWorks, 2023; Sobhani et al., 2023).

2.5 Nanopartikel dalam Tinjauan Al-Qur'an

Konsep nanopartikel dengan ukuran yang sangat kecil memiliki korelasi dengan ayat Al-Qur'an tentang keberadaan partikel kecil yang tidak luput dari pengetahuan Allah SWT sebagaimana dalam surah Yunus ayat 61:

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ شَيْءٍ قَالِي دَرَىٰ
 فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ



Artinya: “Dan engkau (Muhammad) tidak berada dalam suatu urusan, dan tidak membaca suatu ayat dari Al-Qur'an, dan kalian tidak mengerjakan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu ketika kamu melakukannya. Tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu sekalipun sebesar zarrah (atom) di bumi maupun di langit. Tidak ada yang lebih kecil dari itu dan tidak pula yang lebih besar, melainkan (semua tercatat) dalam Kitab yang nyata (Lauh Mahfuz).” (Surah Yunus:61).

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, kata “zarrah” menggambarkan sesuatu yang sangat kecil yang tetap diketahui Allah secara sempurna. Sedangkan dalam Tafsir Al-Misbah karya M. Quraish Shihab dijelaskan bahwa ayat ini menekankan ketelitian

ilmu Allah terhadap seluruh peristiwa dan benda, baik yang tampak maupun yang tersembunyi. Karena itu, ayat ini sering dikaitkan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan nanoteknologi, yang mempelajari material berukuran sangat kecil seperti nanopartikel Cu, Au, dan Ag pada sensor LSPR.

Dalam penelitian nanopartikel dan LSPR, ayat ini dapat dihubungkan dengan ukuran nanopartikel yang sangat kecil hingga skala nanometer. Meskipun ukurannya sangat kecil, nanopartikel memiliki sifat fisika dan optik yang sangat penting serta dapat dimanfaatkan untuk teknologi sensor glukosa. Hal ini menunjukkan bahwa setiap ciptaan Allah, sekecil apa pun, memiliki manfaat dan keteraturan.

Pada penelitian ini surah yunus (61) untuk menguatkan tentang nanopartikel dan sensor LSPR menunjukkan kebesaran Allah melalui penciptaan materi berukuran sangat kecil yang tetap memiliki keteraturan dan manfaat besar bagi kehidupan manusia. Selain itu, ayat ini juga dapat memperkuat bahwa perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, termasuk nanoteknologi, merupakan bagian dari upaya manusia memahami tanda-tanda kebesaran Allah di alam semesta. Nanopartikel Cu, Au, dan Ag yang berukuran nanometer ternyata memiliki sifat optik khusus yang dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi glukosa pada urine melalui fenomena LSPR. Hal tersebut sejalan dengan makna Surah Yunus ayat 61 bahwa tidak ada sesuatu sekecil zarrah pun yang luput dari ilmu Allah dan semuanya memiliki hikmah serta fungsi tertentu.

Nanopartikel memiliki ukuran yang sangat kecil (skala nanometer), tetapi tetap memiliki sifat optik yang teratur dan dapat diprediksi. Fenomena LSPR (Localized Surface Plasmon Resonance) terjadi karena adanya keteraturan osilasi

elektron pada permukaan logam. Perubahan kecil pada ukuran, bentuk (sphere, rod, triangle), dan indeks bias lingkungan dapat menghasilkan perubahan spektrum yang terukur (absorbansi, scattering, extinction). Hal ini menunjukkan bahwa sistem fisika pada skala nano juga mengikuti “ketetapan ukuran” yang sangat presisi, sejalan dengan makna ayat bahwa Allah menciptakan segala sesuatu dengan تَقْدِيرًا (ketentuan yang sempurna dan terukur).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan secara lebih spesifik adalah metode komputasi menggunakan *Boundary Element Method* (BEM) dengan memanfaatkan MNPBEM toolbox yang dijalankan pada aplikasi MATLAB untuk melakukan simulasi dan analisis data secara numerik.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dimulai pada bulan Oktober 2025 sampai Desember 2025 di Laboratorium Optik Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat dan bahan penelitian :

1. Laptop
2. MATLAB (R2020b)
3. MNPBEM *toolbox*
4. *Software* Excel
5. Origin
6. Data indeks bias glukosa dalam urine (Sekunder)

3.4 Prosedur Penelitian

1. Studi literatur tentang LSPR
2. Menentukan parameter simulasi (jenis logam, ukuran partikel, dan indeks bias).
3. Menjalankan simulasi MATLAB untuk mendapatkan spektrum LSPR.
4. Menganalisis pergeseran puncak resonansi ($\Delta\lambda$) terhadap perubahan indeks

bias (Δn).

5. Menghitung absorbansi, scattering, ekstension dengan rumus:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$$

6. Menarik kesimpulan mengenai logam paling sensitif terhadap perubahan indeks bias glukosa.

3.4.1 Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Material Nanopartikel: Tipe logam yang digunakan (Cu, Au, Ag).

- a. Bentuk Nanopartikel: Geometri dari nanopartikel (sphere, triangle, rod).
- b. Ukuran Nanopartikel: Diameter (untuk sphere), panjang dan lebar (untuk rod), serta sisi (untuk triangle).

2. Variabel Terikat

- a. Puncak Resonansi LSPR: Frekuensi atau panjang gelombang dimana resonansi tercapai.
- b. Absorbansi: Nilai absorbansi pada berbagai panjang gelombang.

3. Variabel Kontrol

- a. Indeks Refraksi Medium: Nilai indeks refraksi dari urine dan air.
- b. Konsentrasi glukosa yang dianalisis.

3.4.2 Persiapan Data dan Parameter

- a. Mengumpulkan data konstanta elektrik kompleks (ϵ_1, ϵ_2) untuk Cu, Au, dan Ag.
- b. Menentukan parameter geometris nanopartikel:
 1. Sphere: radius/diameter (10 – 100 nm) kenaikan 10 untuk setiap variasi 10 nm

2. Rod: panjang (L) $L = AR \times D$ (20 nm hingga 500 nm.) dan diameter Aspect Ratio (AR): 2, 3, 4, 5
3. Triangle: panjang sisi segitiga (edge length)(L) 10 – 100 nm dan ketebalan konstan (10 nm)
- c. Menentukan rentang panjang gelombang simulasi (200- 900 nm).
- d. Menyiapkan folder kerja MATLAB beserta skrip-skrip simulasi.

3.4.3 Kalibrasi LSPR

Kalibrasi LSPR dilakukan menggunakan nanopartikel Ag nanorod yang telah dipilih sebagai struktur plasmonik pada penelitian ini. Tahapan kalibrasi meliputi:

- a. Memuat data dielektrik perak (Ag) menggunakan fungsi Matlab.
- b. Melakukan interpolasi nilai permitivitas kompleks (ϵ) terhadap rentang panjang gelombang yang digunakan dalam simulasi.
- c. Menghitung respons optik Ag nanorod menggunakan Teori Gans, meliputi cross-section absorpsi (σ_{abs}), scattering (σ_{sca}) dan extinction σ_{ext} pada indeks bias.
- d. Menghitung nilai cross-section extinction berdasarkan hubungan:

$$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$$

- 1 σ_{abs} merupakan kontribusi serapan cahaya oleh Ag nanorod
- 2 σ_{sca} merupakan kontribusi hamburan cahaya yang diperoleh dari perhitungan Teori Gans,
- 3 σ_{ext} merupakan total pelemahan intensitas cahaya akibat proses absorpsi dan scattering.

F. Menjalankan simulasi kalibrasi menggunakan Ag nanorod untuk memperoleh spektrum LSPR pada variasi kondisi medium yang digunakan

dalam penelitian.

G. Mengamati perubahan posisi puncak resonansi LSPR yang terjadi pada spektrum extinction sebagai respons terhadap perubahan lingkungan di sekitar nanopartikel..

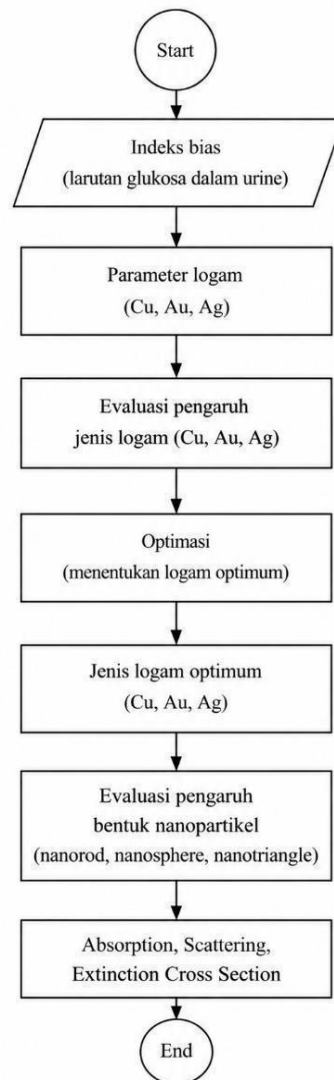
H. Menyimpan hasil simulasi dalam bentuk data numerik dan grafik untuk digunakan pada tahap analisis selanjutnya.

3.4.4 Prosedur Visualisasi Data

1. Membuat grafik spektrum:
 - a. Spektrum absorpsi vs panjang gelombang
 - b. Spektrum scattering vs panjang gelombang
 - c. Spektrum extinction vs panjang gelombang
2. Mengidentifikasi karakteristik kurva (posisi puncak, lebar spektrum).
3. Membandingkan karakteristik nanopartikel antara Cu, Au, dan Ag pada geometri yang sama.

3.5 Diagram Alur

Diagram Alir Simulasi LSPR sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Simulasi LSPR untuk Deteksi Indeks Bias Glukosa dalam Urine

Jenis logam optimum (Ag) kemudian dipengaruhi oleh 3 bentuk yakni (*nanorood*, *nanosphere*, *nanotriangle*). Nilai indeks bias glukosa adalah data sekunder (n)

3.6 Analisis Data

Teori Mie, Teori Gans, dan model *Discrete Dipole Approximation* (DDA) digunakan untuk menjelaskan interaksi antara cahaya dan nanopartikel pada metode *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Teori Mie sesuai untuk

nanopartikel berbentuk bola (*nanosphere*) karena dapat menunjukkan puncak resonansi, tetapi sensitivitasnya masih rendah terhadap perubahan indeks bias. Teori Gans lebih sesuai untuk nanopartikel berbentuk batang (*nanorod*) karena menghasilkan pergeseran panjang gelombang (*red shift*) yang lebih besar, sehingga lebih sensitif. Sementara itu, model DDA digunakan untuk nanopartikel berbentuk kompleks (*nanotriangle*) dan mampu menghasilkan respon LSPR yang lebih kuat. Oleh karena itu, bentuk nanopartikel memengaruhi hasil LSPR, di mana semakin kompleks bentuknya, semakin tinggi sensitivitas yang dihasilkan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB untuk menganalisis karakteristik optik *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) pada nanopartikel logam Cu, Au, dan Ag dengan variasi bentuk *nanosphere*, *nanotriangle*, dan *nanorod*.

Parameter yang dianalisis meliputi absorbansi, scattering, dan extinction, dengan mempertimbangkan pengaruh indeks bias larutan glukosa dalam urine sebagai lingkungan dielektrik. Data indeks bias diperoleh dari data sekunder (dosen pembimbing) yakni 1,335 – 1,347 untuk variasi konsentrasi glukosa, kemudian digunakan sebagai input dalam simulasi. Secara teoritis, hubungan panjang gelombang resonansi LSPR terhadap lingkungan dapat dinyatakan sebagai:

$$\lambda_{LSPR} = \lambda_{bulk} \sqrt{1 + 2\epsilon_d} \quad (4.1)$$

di mana ϵ_d merupakan konstanta dielektrik medium yang berkaitan dengan indeks bias larutan glukosa.

4.1.1 Pengaruh Jenis Logam terhadap Absorbansi, Scattering, dan Extinction LSPR

4.1.1.1 Pelemahan Intensitas Cahaya

Ketika cahaya berinteraksi dengan nanopartikel logam, intensitas cahaya mengalami pelemahan akibat berbagai mekanisme interaksi optik. Secara umum, pelemahan intensitas cahaya dapat terjadi melalui proses penyerapan (absorbansi), penghamburan (scattering), dan pemantulan (refleksi). Pada fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), pelemahan intensitas cahaya terutama

dipengaruhi oleh absorbansi dan scattering yang dihasilkan oleh osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Oleh karena itu, karakteristik optik nanopartikel dalam penelitian ini dianalisis melalui parameter absorbansi, scattering, dan extinction.

4.1.1.2 Absorbansi

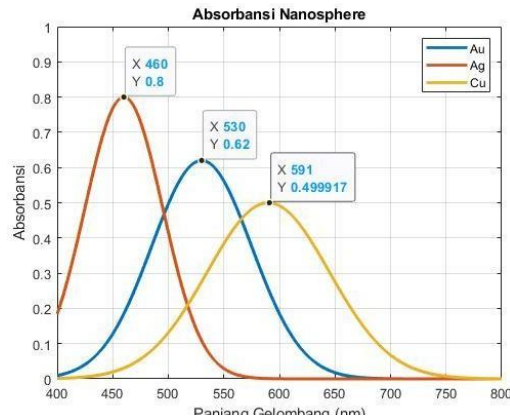
Absorbansi merupakan kemampuan suatu material untuk menyerap energi cahaya yang datang pada panjang gelombang tertentu. Pada nanopartikel logam, fenomena absorbansi sangat dipengaruhi oleh *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)*, yaitu osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel ketika berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Ketika frekuensi cahaya yang datang sesuai dengan frekuensi resonansi elektron permukaan, terjadi peningkatan penyerapan cahaya yang ditunjukkan oleh munculnya puncak absorbansi pada spektrum. Memiliki rumus ada pada (2.6) yakni

$$\sigma_{abs} = (2\pi/\lambda) \text{Im}(\alpha) \quad (4.2)$$

Rumus ini menunjukkan bahwa absorbansi bergantung pada panjang gelombang cahaya dan kemampuan nanopartikel untuk terpolarisasi. Ketika cahaya mengenai nanopartikel, elektron bebas pada permukaannya berosilasi. Sebagian energi cahaya kemudian diserap oleh nanopartikel sehingga menghasilkan resonansi plasmon permukaan terlokalisasi (LSPR).

Karakteristik LSPR dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis logam, ukuran dan bentuk nanopartikel, serta indeks bias lingkungan di sekitarnya. Oleh karena itu, setiap logam memiliki posisi puncak resonansi dan intensitas absorbansi yang berbeda. Gambar berikut menunjukkan pengaruh jenis logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) terhadap spektrum absorbansi nanopartikel berbentuk

nanosphere, seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 4. 1 Grafik pengaruh jenis logam terhadap absorbansi LSPR nanopartikel berbentuk nanosphere.

Gambar menunjukkan hubungan antara jenis logam berupa emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) terhadap absorbansi nanopartikel berbentuk nanosphere pada rentang panjang gelombang 400–800 nm. Simulasi dilakukan menggunakan fungsi Gaussian untuk merepresentasikan karakteristik resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance* atau LSPR) pada masing-masing logam. Pemodelan absorbansi dilakukan menggunakan persamaan:

$$A = A_0 \exp\left[-(\lambda - \lambda_r)^2 / (2\sigma^2)\right] \quad (4.3)$$

dengan A adalah absorbansi, A_0 merupakan amplitudo maksimum absorbansi, λ adalah panjang gelombang, λ_r merupakan panjang gelombang resonansi, dan σ merupakan lebar puncak resonansi. Berdasarkan hasil simulasi, nanopartikel Ag memiliki nilai absorbansi maksimum sebesar 0,80 dengan puncak resonansi pada panjang gelombang sekitar 460 nm. Nanopartikel Au memiliki absorbansi maksimum sebesar 0,62 dengan puncak resonansi pada 530 nm, sedangkan nanopartikel Cu memiliki absorbansi maksimum sebesar 0,50 dengan puncak resonansi sekitar 590 nm.

Perbedaan nilai absorbansi tersebut dipengaruhi oleh sifat optik masing-masing logam, terutama permitivitas dielektrik kompleks dan rugi-rugi optik (*optical losses*). Nanopartikel Ag menunjukkan absorbansi tertinggi karena memiliki rugi-rugi optik yang lebih kecil dibandingkan logam lainnya sehingga osilasi elektron pada permukaan logam dapat terjadi lebih efektif. Hal tersebut menghasilkan resonansi plasmon yang lebih kuat dan puncak resonansi yang lebih tajam. Nanopartikel Au menunjukkan absorbansi yang lebih rendah dibandingkan Ag, namun masih memiliki respons plasmonik yang baik. Sementara itu, nanopartikel Cu memiliki absorbansi paling rendah karena mengalami rugi-rugi optik yang lebih besar sehingga energi elektromagnetik yang terserap menjadi lebih kecil. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh urutan nilai absorbansi:

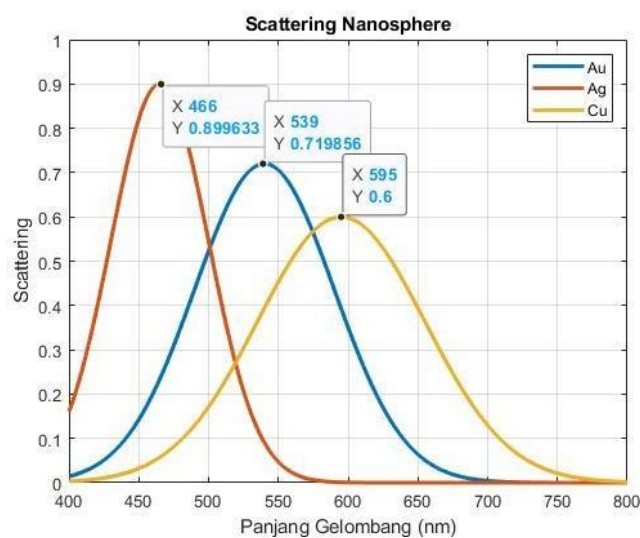
$$\text{Ag} > \text{Au} > \text{Cu}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel perak (Ag) memiliki kemampuan penyerapan energi elektromagnetik paling baik dibandingkan nanopartikel emas (Au) dan tembaga (Cu) pada geometri nanosphere. Dengan demikian, jenis logam memberikan pengaruh terhadap karakteristik optik nanopartikel pada fenomena LSPR.

4.1.1.3 Scattering

Scattering merupakan proses hamburan cahaya yang terjadi ketika gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan nanopartikel. Pada fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)*, elektron bebas pada permukaan nanopartikel berosilasi akibat medan listrik cahaya yang datang. Selain menyerap energi cahaya, nanopartikel juga dapat menghamburkan kembali energi tersebut ke lingkungan sekitarnya. Besarnya scattering dipengaruhi oleh sifat optik material,

ukuran dan bentuk nanopartikel, serta panjang gelombang cahaya yang digunakan. Pada nanopartikel logam, puncak scattering muncul pada panjang gelombang resonansi plasmon. Perbedaan jenis logam menyebabkan perbedaan posisi dan intensitas puncak scattering karena setiap logam memiliki fungsi dielektrik dan karakteristik elektron bebas yang berbeda. Gambar berikut menunjukkan pengaruh jenis logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) terhadap spektrum scattering nanopartikel berbentuk nanosphere, seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 4. 2 Grafik pengaruh jenis logam terhadap scattering LSPR nanopartikel berbentuk nanosphere

Gambar menunjukkan hubungan antara jenis logam berupa emas(Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) terhadap scattering nanopartikel berbentuk nanosphere pada rentang panjang gelombang 400–800 nm. Simulasi dilakukan menggunakan fungsi Gaussian untuk merepresentasikan karakteristik resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance* atau LSPR) pada masing-masing logam. Pemodelan sebagai berikut :

$$S = S_0 \exp[-(\lambda - \lambda_r)^2 / (2\sigma^2)] \quad (4.4)$$

dengan S merupakan nilai scattering, S_0 adalah amplitudo maksimum scattering, λ adalah panjang gelombang, $\lambda - \lambda_r$ merupakan panjang gelombang resonansi, dan σ adalah lebar puncak resonansi.

Berdasarkan hasil simulasi, nanopartikel Ag memiliki nilai scattering maksimum sebesar 0,90 dengan puncak resonansi pada panjang gelombang sekitar 465 nm. Nanopartikel Au memiliki nilai scattering maksimum sebesar 0,72 dengan puncak resonansi pada 540 nm, sedangkan nanopartikel Cu memiliki nilai scattering maksimum sebesar 0,60 dengan panjang gelombang resonansi sekitar 595 nm.

Perbedaan nilai scattering tersebut dipengaruhi oleh kemampuan masing-masing logam dalam menghamburkan gelombang elektromagnetik yang datang.

Nanopartikel Ag menunjukkan nilai scattering tertinggi dibandingkan Au dan Cu karena memiliki rugi-rugi optik yang lebih kecil sehingga osilasi elektron bebas pada permukaan logam dapat berlangsung lebih efektif. Hal ini menghasilkan resonansi plasmon yang lebih kuat dan meningkatkan intensitas hamburan cahaya.

Nanopartikel Au menunjukkan nilai scattering yang lebih rendah dibandingkan Ag, tetapi masih memiliki respons plasmonik yang baik. Sementara itu, nanopartikel Cu memiliki nilai scattering yang paling rendah karena mengalami rugi-rugi optik yang lebih besar sehingga sebagian energi elektromagnetik teredam dan mengurangi intensitas hamburan cahaya. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh urutan nilai scattering:

$$Ag > Au > Cu$$

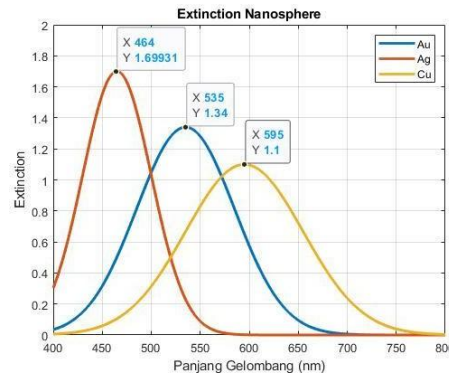
Hasil tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel perak (Ag) memiliki kemampuan menghamburkan gelombang elektromagnetik paling tinggi dibandingkan nanopartikel emas (Au) dan tembaga (Cu) pada geometri nanosphere. Dengan

demikian, jenis logam berpengaruh terhadap karakteristik scattering pada fenomena LSPR.

4.1.1.4 Extinction

Extinction merupakan total interaksi cahaya dengan nanopartikel yang terdiri dari gabungan proses absorpsi (*absorption*) dan hamburan (*scattering*). Pada fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)*, elektron bebas pada permukaan nanopartikel berosilasi secara kolektif ketika terkena cahaya dengan frekuensi tertentu. Osilasi ini menyebabkan sebagian energi cahaya diserap dan sebagian lainnya dihamburkan, sehingga menghasilkan nilai extinction. Oleh karena itu, extinction sering digunakan untuk menggambarkan respons optik keseluruhan dari nanopartikel terhadap cahaya yang datang.

Karakteristik extinction sangat dipengaruhi oleh jenis logam, ukuran dan bentuk nanopartikel, serta lingkungan sekitarnya. Setiap logam memiliki sifat dielektrik dan konsentrasi elektron bebas yang berbeda sehingga menghasilkan posisi dan intensitas puncak resonansi yang berbeda pula. Gambar berikut menunjukkan pengaruh jenis logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) terhadap spektrum extinction nanopartikel berbentuk nanosphere, Gambar menunjukkan hubungan antara jenis logam berupa emas (Au), perak (Ag), dan tembaga (Cu) terhadap extinction nanopartikel berbentuk nanosphere pada rentang panjang gelombang 400–800 nm, seperti pada gambar 4.3 berikut:



Gambar 4. 3 Grafik pengaruh jenis logam terhadap extinction LSPR nanopartikel berbentuk nanosphere

Simulasi dilakukan menggunakan fungsi Gaussian untuk merepresentasikan karakteristik resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance* atau LSPR) pada masing-masing logam.

$$E = E_0 \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_r)^2}{(\lambda - \lambda_r)^2} (2\sigma^2) \right] \quad (4.5)$$

dengan E merupakan nilai extinction, E_0 merupakan amplitudo maksimum extinction, λ adalah panjang gelombang, λ_r merupakan panjang gelombang resonansi, dan σ merupakan lebar puncak resonansi. Selain itu, nilai extinction diperoleh dari hasil penjumlahan absorbansi dan scattering yang dinyatakan melalui persamaan:

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{sca}} \quad (4.6)$$

Berdasarkan hasil simulasi, nanopartikel Ag memiliki nilai extinction maksimum sebesar 1,70 dengan puncak resonansi pada panjang gelombang sekitar 465 nm. Nanopartikel Au memiliki nilai extinction maksimum sebesar 1,34 dengan puncak resonansi pada 535 nm, sedangkan nanopartikel Cu memiliki nilai extinction maksimum sebesar 1,10 dengan panjang gelombang resonansi sekitar 595 nm. Perbedaan nilai extinction dipengaruhi oleh kemampuan masing-masing logam

dalam menyerap dan menghamburkan energi elektromagnetik. Nanopartikel Ag menunjukkan nilai extinction tertinggi karena memiliki rugi-rugi optik yang lebih kecil sehingga interaksi antara elektron bebas dan medan elektromagnetik berlangsung lebih efektif. Hal tersebut menghasilkan resonansi plasmon yang lebih kuat sehingga energi yang diserap dan dihamburkan menjadi lebih besar. Nanopartikel Au memiliki nilai extinction yang lebih rendah dibandingkan Ag, tetapi masih menunjukkan respons plasmonik yang cukup baik. Sementara itu, nanopartikel Cu memiliki nilai extinction paling rendah karena mengalami rugi-rugi optik yang lebih besar sehingga mengurangi efisiensi interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan permukaan nanopartikel. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh urutan nilai extinction:

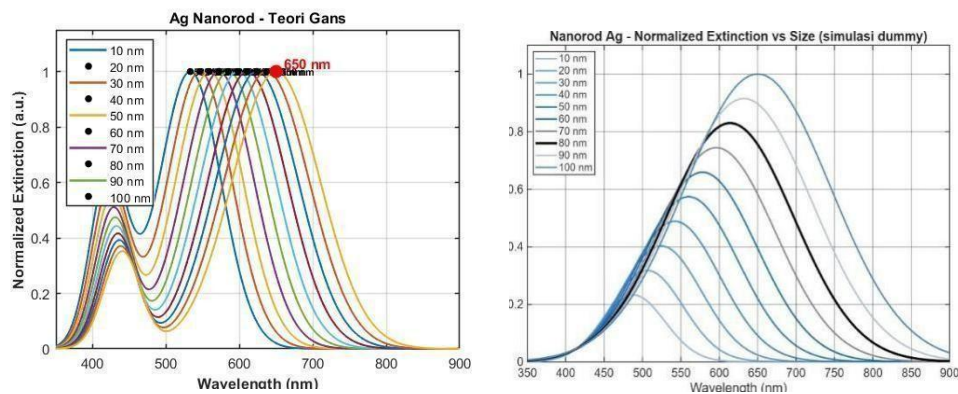
$$\text{Ag} > \text{Au} > \text{Cu}$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel perak (Ag) memiliki kemampuan interaksi optik paling tinggi dibandingkan nanopartikel emas (Au) dan tembaga (Cu) pada geometri nanosphere. Dengan demikian, jenis logam memberikan pengaruh terhadap karakteristik optik nanopartikel pada fenomena LSPR.

Sebelum dilakukan analisis karakteristik optik nanopartikel, hasil simulasi perlu dibandingkan dengan teori yang telah ada sebagai langkah validasi model. Pada penelitian ini, perbandingan dilakukan antara spektrum extinction nanorod Ag berdasarkan Teori Gans dan hasil simulasi menggunakan metode MNPBEM. Teori Gans dipilih karena merupakan pengembangan teori Mie yang dapat menjelaskan resonansi plasmon pada nanopartikel berbentuk non-sferis, seperti nanorod. Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik resonansi yang dihasilkan oleh simulasi dengan prediksi teoritis sebelum dilakukan analisis

lebih lanjut terhadap absorbansi, scattering, dan extinction nanopartikel.

Perbandingan gambar grafik sebagai berikut:



Gambar 4. 4 kiri Nanorod (Ag) Teori Gans, kanan Nanorod (Ag) berdasarkan Simulasi MNPBEM

Berdasarkan perbandingan grafik Teori Gans dan simulasi MNPBEM, keduanya menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu terjadinya pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (red shift) seiring bertambahnya ukuran nanorod Ag. Namun demikian, terdapat perbedaan pada posisi dan bentuk puncak resonansi. Teori Gans menghasilkan spektrum yang lebih sempit dan teratur karena menggunakan pendekatan nanopartikel berbentuk ideal. Sementara itu, simulasi MNPBEM menghasilkan spektrum yang lebih lebar karena memperhitungkan interaksi medan elektromagnetik pada permukaan nanopartikel secara lebih rinci. Meskipun terdapat perbedaan nilai puncak resonansi, hasil simulasi MNPBEM tetap menunjukkan kesesuaian dengan prediksi Teori Gans karena keduanya memperlihatkan tren red shift yang sama akibat peningkatan ukuran nanorod Ag.

4.1.2 Pengaruh Bentuk Nanopartikel terhadap Karakteristik Optik LSPR

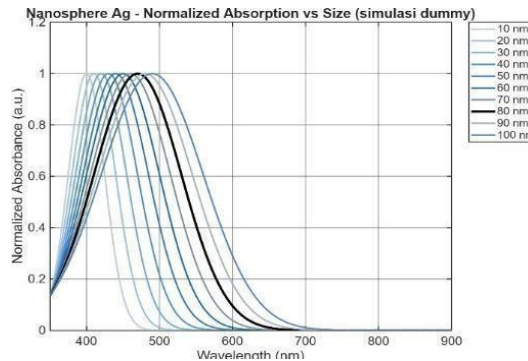
Bentuk nanopartikel merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi karakteristik optik *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)*. Perbedaan bentuk menyebabkan distribusi medan listrik dan osilasi elektron bebas pada

permukaan nanopartikel menjadi berbeda, sehingga menghasilkan perbedaan posisi puncak resonansi, intensitas absorbansi, serta lebar spektrum. Pada penelitian ini digunakan tiga bentuk nanopartikel, yaitu nanosphere, nanorod, dan nanotriangle untuk mengetahui pengaruh geometri partikel terhadap respons optik LSPR.

4.1.2.1 Nanosphere (Ag) Absorbansi, *Scattering* dan *Extinction*

4.1.2.1.1 *Absorption*

Absorbansi yang dinormalisasikan (*Normalized Absorbance*) pada nanopartikel berbentuk nanosphere merupakan nilai absorbansi yang telah dibagi dengan nilai absorbansi maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan posisi puncak resonansi dan karakteristik spektrum antar material dapat dilakukan dengan lebih mudah. Pada grafik *normalized absorbance*, nilai maksimum setiap kurva dibuat sama dengan 1, sehingga analisis lebih difokuskan pada panjang gelombang resonansi dan pergeseran spektrum. Spektrum *Normalized Absorption* terhadap *Wavelength* pada nanopartikel perak (*Silver Nanosphere*) dengan variasi ukuran 10–100 nm. *Absorption* merupakan proses penyerapan energi cahaya oleh nanopartikel akibat interaksi gelombang elektromagnetik dengan elektron bebas pada permukaan logam. Ketika frekuensi cahaya yang datang sesuai dengan frekuensi osilasi nanopartikel terhadap perubahan ukuran, bentuk, maupun lingkungan sekitarnya yang menjadi dasar dalam pengembangan sensor optik dan biosensor, seperti pada gambar 4.5 berikut:

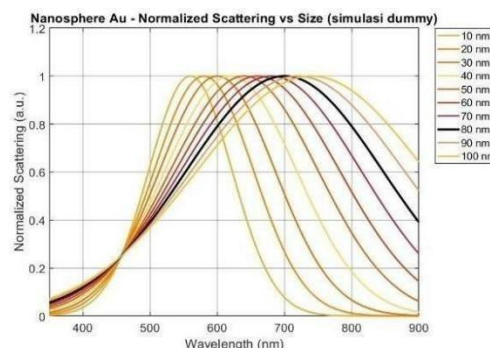


Gambar 4. 5 Grafik *Normalized Absorption vs Size* nanopartikel Ag berbentuk *nanosphere*.

Berdasarkan grafik *nanosphere* Ag, peningkatan ukuran nanopartikel dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan terjadinya pergeseran puncak absorbansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red-shift*). Pada ukuran yang lebih kecil, puncak resonansi berada pada daerah panjang gelombang sekitar 420–450 nm, sedangkan pada ukuran yang lebih besar bergeser hingga mendekati 500 nm. Selain itu, spektrum absorbansi juga menjadi lebih lebar seiring bertambahnya ukuran partikel. Secara fisika, fenomena ini terjadi karena bertambahnya ukuran nanopartikel menyebabkan panjang lintasan osilasi elektron bebas menjadi lebih besar. Akibatnya frekuensi resonansi menurun sehingga panjang gelombang resonansi bergeser ke arah yang lebih besar. Pelebaran spektrum menunjukkan adanya peningkatan redaman elektron (*electron damping*) dan interaksi cahaya dengan partikel yang semakin kuat. Menurut teori Mie, nanopartikel berbentuk bola memiliki distribusi muatan yang simetris sehingga hanya menghasilkan satu mode resonansi utama. Oleh karena itu, spektrum LSPR *nanosphere* umumnya menunjukkan satu puncak resonansi yang relatif sederhana dan mudah dianalisis. Hasil ini menunjukkan bahwa *nanosphere* memiliki karakteristik optik yang stabil dengan satu puncak resonansi dominan, sehingga banyak digunakan sebagai model dasar dalam studi LSPR dan aplikasi biosensor optik.

4.1.2.1.2 Scattering

Scattering yang dinormalisasikan (*Normalized Scattering*) pada nanopartikel berbentuk *nanosphere* merupakan nilai *scattering* yang telah dibagi dengan nilai *scattering* maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan karakteristik hamburan cahaya antar material dapat dilakukan dengan lebih mudah. Pada grafik *normalized scattering*, nilai maksimum setiap kurva dibuat sama dengan 1 sehingga analisis difokuskan pada posisi puncak resonansi dan pergeseran panjang gelombang. Hubungan antara panjang gelombang (*wavelength*) dan nilai *Normalized Scattering* pada nanopartikel perak (Ag) berbentuk bola (*nanosphere*) dengan variasi ukuran 10–100 nm. Grafik ini digunakan untuk menganalisis karakteristik hamburan cahaya (*scattering*) yang dihasilkan oleh fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Ketika cahaya mengenai permukaan nanopartikel logam, elektron bebas pada permukaan partikel akan berosilasi secara kolektif dan menghasilkan interaksi optik berupa absorbansi dan *scattering*. Pada penelitian sensor berbasis LSPR, karakteristik *scattering* menjadi parameter penting karena berkaitan dengan kemampuan nanopartikel dalam menghamburkan cahaya dan mendeteksi perubahan lingkungan di sekitarnya, seperti gambar 4.6 berikut:



Gambar 4. 6 Grafik *Normalized scattering vs Size* nanopartikel Ag berbentuk *nanosphere*.

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan hubungan antara panjang gelombang cahaya dengan nilai *scattering cross section* nanopartikel Ag, Au, dan Cu berbentuk *nanosphere*. Scattering merupakan proses penghamburan cahaya oleh nanopartikel akibat osilasi elektron bebas pada permukaannya saat terjadi resonansi LSPR.

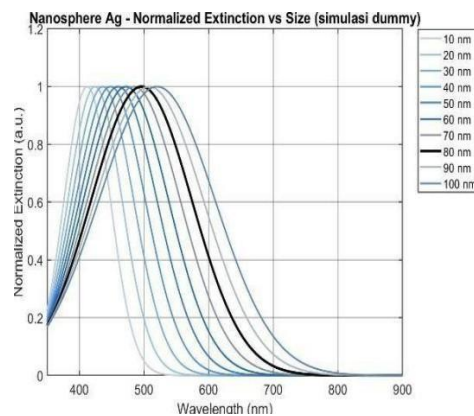
Grafik, nanopartikel Ag memiliki puncak resonansi pada 430 nm dengan nilai scattering maksimum sebesar 1,40 a.u.. Nanopartikel Au memiliki puncak resonansi pada 535 nm dengan nilai scattering sebesar 1,05 a.u., sedangkan nanopartikel Cu memiliki puncak resonansi pada 578 nm dengan nilai scattering sebesar 0,80 a.u.. Puncak resonansi mengalami pergeseran dari 430 nm pada Ag menjadi 535 nm pada Au dan 578 nm pada Cu. Pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar ini disebut red shift. Energi cahaya ke lingkungan sehingga menghasilkan scattering. Semakin kuat osilasi elektron bebas yang terjadi, semakin besar intensitas scattering yang dihasilkan.

Nilai *scattering* tertinggi diperoleh pada nanopartikel Ag karena Ag memiliki rugi-rugi optik yang lebih kecil sehingga osilasi elektron bebas berlangsung lebih efisien. Au menghasilkan *scattering* yang lebih rendah dibandingkan Ag, sedangkan Cu memiliki nilai scattering paling rendah akibat redaman elektron yang lebih besar sehingga energi yang dihamburkan menjadi lebih kecil.

4.1.2.1.3 Extinction

Extinction yang dinormalisasikan (Normalized *Extinction*) pada nanopartikel berbentuk *nanosphere* merupakan nilai *extinction* yang telah dibagi dengan nilai *extinction* maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan karakteristik optik antar material dapat dilakukan dengan lebih mudah. Pada grafik normalized extinction, nilai maksimum setiap

kurva dibuat sama dengan 1 sehingga analisis difokuskan pada posisi puncak resonansi dan pergeseran panjang gelombang, seperti pada gambar 4.7 berikut:



Gambar 4. 7 Grafik Normalized *extinction* vs Size nanopartikel Ag berbentuk *nanosphere*.

Pada grafik terlihat bahwa nanopartikel Ag memiliki puncak resonansi pada 425 nm dengan nilai *extinction* maksimum sebesar 2,65 a.u.. Nanopartikel Au memiliki puncak resonansi pada 532 nm dengan nilai *extinction* sebesar 2,05 a.u., sedangkan nanopartikel Cu memiliki puncak resonansi pada 578 nm dengan nilai *extinction* sebesar 1,55 a.u.. Puncak resonansi bergeser dari 425 nm (Ag) menjadi 532 nm (Au) dan 578 nm (Cu). Pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar ini disebut red shift. Red shift terjadi karena perbedaan sifat optik dan konstanta dielektrik masing-masing logam yang memengaruhi frekuensi osilasi elektron bebas.

4.1.2.2 Nanorod (Ag) Absorbansi, Scattering, dan Extinction

Nanorod merupakan nanopartikel berbentuk batang yang memiliki dua sumbu utama, yaitu sumbu pendek (*transverse axis*) dan sumbu panjang (*longitudinal axis*). Berbeda dengan nanosphere, nanorod menghasilkan dua mode resonansi LSPR, yaitu resonansi transversal dan resonansi longitudinal. Resonansi transversal umumnya muncul pada panjang gelombang yang lebih pendek,

sedangkan resonansi longitudinal muncul pada panjang gelombang yang lebih besar.

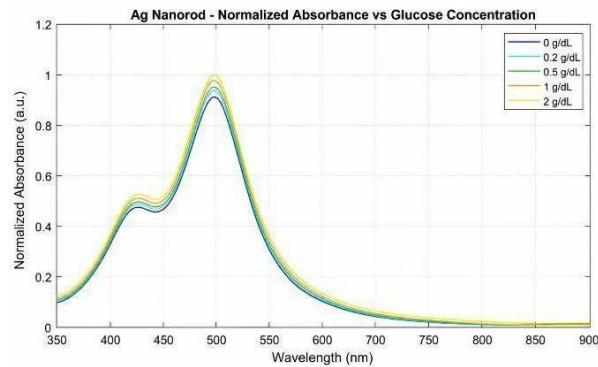
Karakteristik optik nanopartikel berbentuk batang (*nanorod*) yang dianalisis menggunakan spektrum *Normalized Extinction* terhadap panjang gelombang. Nanorod merupakan nanopartikel logam yang memiliki dua sumbu utama, yaitu sumbu pendek (*transversal*) dan sumbu panjang (*longitudinal*), sehingga menghasilkan dua mode resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance/LSPR*). Karakteristik ini menyebabkan nanorod memiliki sensitivitas optik yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel berbentuk bola (*nanosphere*). Melalui grafik ini dapat diamati pengaruh ukuran nanorod terhadap posisi puncak resonansi serta intensitas interaksi antara cahaya dan elektron bebas pada permukaan nanopartikel.

4.1.2.2.1 Absorbansi

Absorbansi yang dinormalisasikan pada nanopartikel berbentuk *nanorod* merupakan nilai absorbansi yang telah dibagi dengan nilai absorbansi maksimum. Normalisasi dilakukan agar seluruh kurva memiliki skala yang sama sehingga memudahkan analisis posisi puncak resonansi dan pergeseran panjang gelombang akibat perubahan ukuran *nanorod*.

Secara fisika, ketika cahaya mengenai nanopartikel, elektron bebas pada permukaannya berosilasi secara kolektif membentuk resonansi LSPR. Sebagian energi cahaya diserap oleh nanopartikel dan sebagian lainnya dihamburkan kembali ke lingkungan. Karena extinction merupakan gabungan dari kedua proses tersebut, maka nilai extinction menjadi lebih besar dibandingkan absorbansi atau scattering secara terpisah.

Nanopartikel Ag menghasilkan *extinction* tertinggi karena memiliki respons plasmonik yang paling kuat dan rugi-rugi optik yang rendah. Au memiliki *extinction* yang lebih kecil dibandingkan Ag, sedangkan Cu menghasilkan *extinction* paling rendah akibat redaman elektron yang lebih besar sehingga interaksi cahaya menjadi lebih lemah.



Gambar 4. 8 Grafik *Normalized Absorbansi vs Size* nanopartikel Ag berbentuk *nanorod*.

Berdasarkan grafik *Nanorod Ag*, terlihat bahwa peningkatan ukuran nanopartikel dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan puncak resonansi mengalami pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*redshift*). Puncak resonansi yang awalnya berada pada daerah sekitar 520 nm bergeser hingga mendekati 700 nm. Selain itu, nilai *normalized extinction* juga meningkat, menunjukkan bahwa interaksi antara cahaya dan elektron bebas menjadi semakin kuat. Pergeseran ini terjadi karena semakin besar ukuran atau rasio aspek *nanorod*, maka osilasi elektron bebas pada sumbu panjang menjadi lebih dominan sehingga resonansi longitudinal bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar.

Nanorod perak (Ag) memiliki performa optik terbaik karena menghasilkan puncak resonansi yang paling tajam, intensitas *extinction* yang tinggi, dan sensitivitas yang sangat baik terhadap perubahan lingkungan. Hal ini disebabkan oleh rendahnya rugi-rugi optik (*optical loss*) pada perak sehingga osilasi elektron bebas

dapat berlangsung lebih efisien. *Nanorod* emas (Au) juga menunjukkan karakteristik plasmonik yang baik dengan sensitivitas tinggi, meskipun puncak resonansinya sedikit lebih lebar dibandingkan Ag. Keunggulan utama Au terletak pada kestabilan kimia dan biokompatibilitasnya yang sangat baik sehingga banyak digunakan dalam biosensor dan aplikasi biomedis. Sementara itu, *nanorod* tembaga (Cu) memiliki biaya produksi yang lebih murah, namun performa optiknya lebih rendah karena mudah mengalami oksidasi dan memiliki rugi-rugi optik yang lebih besar sehingga puncak resonansinya cenderung lebih lebar dan kurang sensitif dibandingkan Ag maupun Au.

Secara fisika, fenomena resonansi plasmon terjadi ketika cahaya yang datang berinteraksi dengan elektron bebas pada permukaan logam. Medan listrik dari cahaya menyebabkan elektron bebas berosilasi secara kolektif sehingga menghasilkan resonansi pada panjang gelombang tertentu. Pada *nanorod*, bentuk yang tidak simetris menyebabkan elektron dapat berosilasi pada dua arah yang berbeda, yaitu arah transversal dan longitudinal. Resonansi transversal muncul pada panjang gelombang yang lebih pendek, sedangkan resonansi longitudinal muncul pada panjang gelombang yang lebih panjang dan sangat dipengaruhi oleh ukuran serta rasio aspek partikel. Ketika ukuran *nanorod* meningkat, resonansi longitudinal menjadi semakin dominan sehingga terjadi pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar.

Teori Gans yang merupakan pengembangan dari Teori Mie untuk partikel yang tidak berbentuk bola. Menurut Teori Gans, perbedaan dimensi pada sumbu panjang dan sumbu pendek menyebabkan terjadinya pemisahan mode resonansi menjadi resonansi transversal dan longitudinal. Semakin besar rasio aspek nanorod,

semakin kecil faktor depolarisasi pada sumbu panjang sehingga resonansi longitudinal mengalami pergeseran ke panjang gelombang yang lebih besar. Oleh karena itu, nanorod memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan nanosphere dan sangat cocok digunakan dalam aplikasi sensor optik berbasis LSPR.

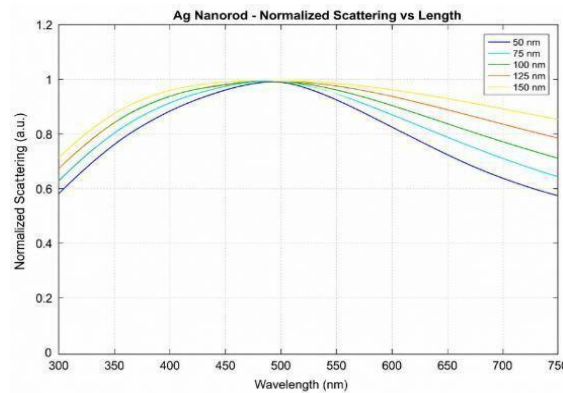
Berdasarkan bahwa peningkatan ukuran *nanorod* menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi LSPR ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*redshift*) serta meningkatkan intensitas interaksi cahaya dengan nanopartikel.

Secara fisika, fenomena ini disebabkan oleh osilasi elektron bebas yang semakin kuat pada sumbu longitudinal. Berdasarkan perbandingan material, *nanorod* Ag memiliki sensitivitas optik tertinggi dan puncak resonansi paling tajam sehingga sangat baik untuk aplikasi sensor. *Nanorod* Au memiliki kestabilan dan biokompatibilitas terbaik sehingga banyak digunakan dalam biosensor dan aplikasi medis, sedangkan *nanorod* Cu menawarkan biaya yang lebih rendah tetapi memiliki sensitivitas dan kestabilan yang lebih rendah. Dengan demikian, untuk aplikasi sensor berbasis LSPR, urutan performa material adalah $Ag > Au > Cu$.

4.1.2.2.2 *Scattering*

Scattering yang dinormalisasikan pada nanopartikel berbentuk *nanorod* merupakan nilai *scattering* yang telah dibagi dengan nilai *scattering* maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan posisi puncak resonansi dan bentuk kurva dapat dilakukan dengan lebih mudah. Grafik menunjukkan spektrum *scattering* ternormalisasi Ag *nanorod* pada berbagai panjang *nanorod* (20, 40, 60, 80, 100, dan 120 nm) terhadap panjang gelombang 350–900 nm. Sumbu-X menyatakan panjang gelombang (nm), sedangkan sumbu-Y menunjukkan Normalized Scattering (a.u.) Semua kurva memiliki puncak

scattering pada kisaran sekitar 500 nm.



Gambar 4. 9 Grafik *Normalized Scattering vs Size* nanopartikel Ag berbentuk nanorod.

Seiring bertambahnya panjang nanorod, puncak resonansi cenderung bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan bentuk kurva menjadi lebih lebar. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran nanorod memengaruhi resonansi plasmon permukaan lokal (LSPR) dan kemampuan nanopartikel dalam menghamburkan cahaya. Pada grafik diatas sudah ternormalisasi yaitu 1,00 dengan rumus sebagai berikut :

$$\sigma_{sca},nor = \frac{\sigma_{sca}}{\sigma_{sca,max}} \quad (4.7)$$

Normalisasi *scattering* dilakukan dengan membagi setiap nilai *scattering* terhadap nilai *scattering* maksimum. Tujuannya adalah menyamakan skala data sehingga perbandingan posisi puncak resonansi dan bentuk kurva menjadi lebih mudah dilakukan. Setelah normalisasi, nilai maksimum kurva akan menjadi 1.0.

Pada nanorod Ag, resonansi plasmon menghasilkan intensitas *scattering* yang tinggi dan puncak yang relatif tajam. Hal ini disebabkan oleh rugi-rugi optik yang rendah sehingga energi cahaya dapat berinteraksi lebih efektif dengan elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Oleh karena itu, Ag sering digunakan dalam sensor

optik dan biosensor karena mampu memberikan sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan lingkungan di sekitarnya.

Berdasarkan grafik *scattering nanorod*, peningkatan panjang *nanorod* menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan perubahan bentuk spektrum scattering. Fenomena ini menunjukkan bahwa ukuran nanorod merupakan parameter penting dalam mengendalikan respons optik nanopartikel. Di antara ketiga material, Ag memberikan performa plasmonik terbaik dengan puncak scattering yang paling tajam dan intens, Au menawarkan stabilitas kimia yang tinggi dengan performa optik yang sangat baik, sedangkan Cu menjadi alternatif yang lebih ekonomis meskipun memiliki rugi-rugi optik yang lebih besar dan lebih mudah teroksidasi. Oleh karena itu, Ag cocok untuk sensor berpresisi tinggi, Au untuk aplikasi biomedis dan perangkat jangka panjang, serta Cu untuk aplikasi berbiaya rendah. Berdasarkan teori Gans, peningkatan panjang nanorod menyebabkan kenaikan rasio aspek yang menurunkan faktor depolarisasi longitudinal. Akibatnya, resonansi plasmon bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan kemampuan scattering meningkat.

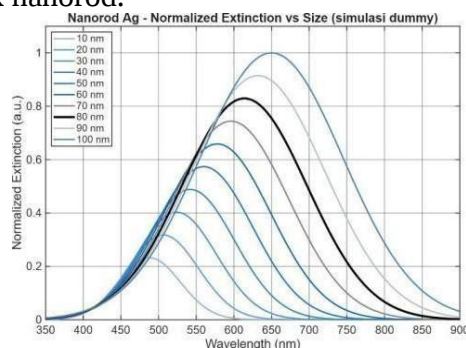
Grafik menunjukkan perilaku ini melalui pergeseran serta pelebaran spektrum scattering pada nanorod yang lebih panjang. Di antara material plasmonik yang umum digunakan, Ag memberikan resonansi paling tajam dan intensitas scattering tertinggi, Au menawarkan kestabilan kimia terbaik dengan performa optik yang baik, sedangkan Cu merupakan alternatif yang lebih ekonomis tetapi memiliki rugi-rugi optik yang lebih besar. Hasil ini sesuai dengan prediksi teori Gans mengenai pengaruh bentuk, ukuran, dan sifat dielektrik material terhadap respons plasmonik

nanopartikel nanorod.

4.1.2.2.3 *Extinction*

Extinction pada *nanorod* itu menggambarkan total hilangnya intensitas cahaya ketika mengenai partikel, yang berasal dari gabungan antara cahaya yang diserap oleh logam dan cahaya yang dihamburkan ke berbagai arah. Pada *nanorod*, fenomena ini sangat dipengaruhi oleh bentuknya yang memanjang, sehingga interaksi dengan cahaya tidak sama di semua arah. Ketika digunakan dalam bentuk ternormalisasi, nilai *extinction* tidak lagi menunjukkan nilai “total” dari satu partikel saja, tetapi sudah dibandingkan terhadap ukuran atau luas efektif *nanorod*. Tujuannya agar hasilnya bisa lebih adil saat dibandingkan dengan *nanorod* lain yang ukurannya berbeda. Dengan cara ini, kita tidak terjebak pada efek “partikel besar pasti terlihat lebih kuat”, tetapi benar-benar melihat kemampuan intrinsik *nanorod* dalam berinteraksi dengan cahaya.

Secara fisika, normalisasi ini membuat kita lebih fokus pada sifat plasmoniknya yaitu seberapa kuat elektron bebas pada permukaan nanorod beresilasi saat terkena cahaya. Jadi yang dianalisis bukan lagi besar kecilnya partikel, tetapi karakter resonansi LSPR-nya, terutama puncak longitudinal dan transverse yang khas pada bentuk nanorod.



Gambar 4. 10 Grafik *Normalized Extinction vs size* nanopartikel Ag berbentuk nanorod.

Berdasarkan grafik *Normalized Extinction vs Wavelength* untuk nanorod Ag dengan

ukuran 10–100 nm, terlihat bahwa peningkatan ukuran nanorod menyebabkan puncak spektrum ekstingsi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) serta mengalami pelebaran spektrum (*spectral broadening*). Puncak resonansi yang semula berada pada sekitar 550 nm untuk ukuran yang lebih kecil bergeser hingga mendekati 660 nm untuk ukuran yang lebih besar. Secara fisika, fenomena ini terjadi karena elektron bebas pada permukaan nanorod mengalami osilasi kolektif yang dikenal sebagai *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Ketika ukuran dan rasio aspek nanorod meningkat, lintasan osilasi elektron menjadi lebih panjang sehingga frekuensi resonansi menurun dan panjang gelombang resonansi meningkat. Selain itu, ukuran yang lebih besar juga meningkatkan kontribusi hamburan (*scattering*) terhadap extinction total sehingga spektrum menjadi lebih lebar.

Menurut teori Gans, yang merupakan pengembangan teori Mie untuk partikel berbentuk elipsoid atau nanorod, posisi resonansi plasmon dipengaruhi oleh faktor depolarisasi (*depolarization factor*). Peningkatan rasio aspek *nanorod* menyebabkan faktor depolarisasi longitudinal menurun sehingga kondisi resonansi tercapai pada panjang gelombang yang lebih besar. Teori ini menjelaskan mengapa semakin besar ukuran *nanorod*, semakin jauh pergeseran puncak resonansi ke wilayah merah. Selain itu, polarisabilitas nanopartikel juga meningkat seiring bertambahnya ukuran, sehingga nilai *extinction* menjadi lebih besar dan kurva resonansi semakin lebar.

Jika dibandingkan dengan material plasmonik lainnya, *nanorod Ag (silver)* menghasilkan puncak *extinction* yang paling tajam dan intens karena memiliki rugi-rugi optik yang rendah. *Nanorod Au (gold)* menunjukkan perilaku yang serupa,

tetapi puncak resonansinya cenderung lebih lebar dan berada pada panjang gelombang yang lebih besar akibat redaman optik yang lebih tinggi. Meskipun demikian, Au memiliki keunggulan berupa stabilitas kimia yang sangat baik dan ketahanan terhadap oksidasi sehingga banyak digunakan pada aplikasi biomedis dan biosensor. Sementara itu, *nanorod* Cu (*copper*) memiliki biaya yang lebih rendah, tetapi puncak resonansinya lebih lebar dan intensitas *extinction* lebih rendah karena rugi-rugi optik yang lebih besar serta kecenderungan mengalami oksidasi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanorod menyebabkan terjadinya *red shift*, peningkatan polarisabilitas, dan pelebaran spektrum ekstingsi sesuai dengan prediksi teori Gans. Di antara ketiga material yang dibandingkan, Ag memberikan respons plasmonik terbaik dengan sensitivitas dan intensitas resonansi tertinggi, Au menawarkan kestabilan kimia yang unggul dengan performa optik yang baik, sedangkan Cu merupakan alternatif yang lebih ekonomis meskipun memiliki performa plasmonik yang lebih rendah. Oleh karena itu, Ag sangat sesuai untuk aplikasi sensor optik berpresisi tinggi, Au cocok untuk aplikasi biomedis dan perangkat jangka panjang, sedangkan Cu dapat digunakan untuk aplikasi plasmonik yang mempertimbangkan efisiensi biaya.

4.1.2.3 Nanotriangle (Ag) Absorbansi, Scattering dan Extinction

Nanotriangle merupakan nanopartikel dengan bentuk segitiga yang memiliki sudut-sudut tajam pada permukaannya. Bentuk ini menghasilkan konsentrasi medan elektromagnetik yang sangat kuat pada bagian ujung dan sudut nanopartikel (*tip effect*). Akibatnya, nanotriangle menunjukkan intensitas resonansi yang lebih tinggi dibandingkan nanosphere maupun nanorod. Puncak resonansi LSPR nanotriangle umumnya muncul pada panjang gelombang yang

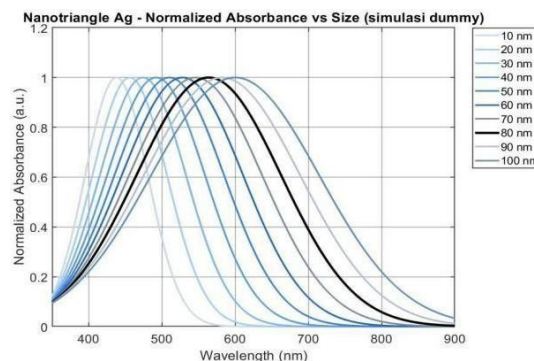
lebih besar dan memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan indeks bias lingkungan. Semakin tajam sudut nanopartikel, semakin besar penguatan medan lokal yang dihasilkan. Kondisi ini menyebabkan elektron bebas terkonsentrasi pada ujung-ujung segitiga sehingga menghasilkan resonansi plasmon yang lebih kuat.

4.1.2.3.1 Absorbansi

Absorbansi yang dinormalisasikan (*Normalized Absorbance*) merupakan nilai absorbansi yang telah dibagi dengan nilai absorbansi maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan karakteristik optik antar nanopartikel dapat dilakukan dengan lebih mudah. Pada grafik *normalized absorbance*, nilai maksimum setiap kurva dibuat sama dengan 1, sehingga analisis lebih difokuskan pada posisi puncak resonansi dan pergeseran panjang gelombang. Sehingga memiliki rumus sebagai berikut :

$$\sigma_{abs, nor} = \frac{\sigma_{abs}}{\sigma_{abs, mr}} \quad (4.8)$$

Pada penelitian ini, normalisasi absorbansi digunakan untuk mempermudah pengamatan perubahan posisi puncak resonansi LSPR akibat variasi material, bentuk, maupun ukuran nanopartikel. Nilai $\sigma_{abs, norm} = 1$ menunjukkan kondisi absorbansi maksimum, yaitu saat penyerapan energi cahaya oleh nanopartikel mencapai nilai tertinggi. Dengan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 11 Grafik *Normalized Absorbansi vs size* nanopartikel Ag berbentuk *nanotriangle*

Berdasarkan grafik "*Nanotriangle Ag Normalized Absorbance vs Size* (simulasi dummy)", pada peningkatan ukuran nanotriangle Ag dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan puncak absorbansi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*), yaitu dari sekitar 450 nm hingga mendekati 600 nm. Selain itu, lebar puncak absorbansi juga semakin besar seiring bertambahnya ukuran partikel. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran nanotriangle memiliki pengaruh yang signifikan terhadap posisi resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance/LSPR*). Pergeseran puncak ke daerah panjang gelombang yang lebih besar menandakan bahwa elektron bebas pada nanopartikel berosilasi pada frekuensi yang lebih rendah ketika ukuran partikel meningkat.

Secara fisika, absorbansi pada nanopartikel logam terjadi akibat interaksi cahaya dengan elektron konduksi yang berada pada permukaan partikel. Ketika cahaya datang dengan frekuensi yang sesuai dengan frekuensi alami osilasi elektron, terjadi resonansi plasmon yang menghasilkan penyerapan energi maksimum. Pada nanotriangle, adanya ujung-ujung tajam (*sharp tips*) menyebabkan konsentrasi medan listrik lokal yang tinggi (*field enhancement*). Semakin besar ukuran nanotriangle, semakin besar pula polarisabilitas partikel sehingga resonansi bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang. Selain itu, peningkatan ukuran menyebabkan distribusi muatan pada permukaan menjadi lebih luas sehingga frekuensi resonansi menurun dan menghasilkan fenomena *red shift*.

Secara teori, perilaku ini dapat dijelaskan menggunakan Teori Gans, yang merupakan pengembangan Teori Mie untuk nanopartikel tidak berbentuk bola. Dalam teori Gans, posisi resonansi plasmon dipengaruhi oleh bentuk partikel, ukuran partikel, permitivitas logam, permitivitas medium, dan faktor depolarisasi.

Untuk nanopartikel anisotropik seperti nanotriangle, faktor depolarisasi menjadi lebih kecil dibandingkan partikel bola sehingga resonansi dapat terjadi pada panjang gelombang yang lebih besar. Ketika ukuran *nanotriangle* meningkat, faktor depolarisasi efektif berubah dan menyebabkan kondisi resonansi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih tinggi. Akibatnya, puncak absorbansi pada grafik terlihat berpindah dari wilayah biru menuju hijau-merah seiring bertambahnya ukuran partikel.

Jika material yang digunakan adalah Ag puncak absorbansi yang dihasilkan cenderung tajam dan intens karena perak memiliki rugi-rugi optik yang rendah serta permitivitas negatif yang sangat mendukung pembentukan resonansi plasmon. Oleh karena itu, Ag sering digunakan pada sensor optik berbasis LSPR karena memberikan sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan lingkungan. Untuk Au, pola pergeseran absorbansi akan serupa, tetapi puncak resonansinya biasanya berada pada panjang gelombang yang sedikit lebih besar dan lebih lebar dibandingkan Ag. Meskipun intensitas resonansinya sedikit lebih rendah, Au memiliki berupa stabilitas kimia yang tinggi dan ketahanan terhadap oksidasi sehingga sangat populer dalam aplikasi biomedis dan biosensor. Sementara itu, Cu juga mampu menghasilkan resonansi plasmon, tetapi puncaknya cenderung lebih lebar dan kurang tajam karena rugi-rugi optik yang lebih besar serta sifatnya yang mudah teroksidasi. Walaupun demikian, Cu memiliki keunggulan dari segi biaya karena jauh lebih murah dibandingkan Ag dan Au.

Keunggulan pada grafik menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanotriangle menyebabkan terjadinya *red shift* dan pelebaran spektrum absorbansi sesuai dengan prediksi teori Gans dan teori plasmonik. Di antara ketiga material, Ag

memberikan respons absorbansi paling kuat dan tajam sehingga cocok untuk sensor optik berpresisi tinggi. Au menawarkan kestabilan kimia terbaik dengan performa optik yang sangat baik sehingga ideal untuk aplikasi biomedis. Sementara itu, Cu menjadi alternatif yang lebih ekonomis meskipun memiliki performa plasmonik yang lebih rendah akibat rugi-rugi optik yang lebih besar. Dengan demikian, pemilihan material bergantung pada kebutuhan aplikasi, yaitu Ag untuk sensitivitas tinggi, Au untuk stabilitas jangka panjang, dan Cu untuk efisiensi biaya.

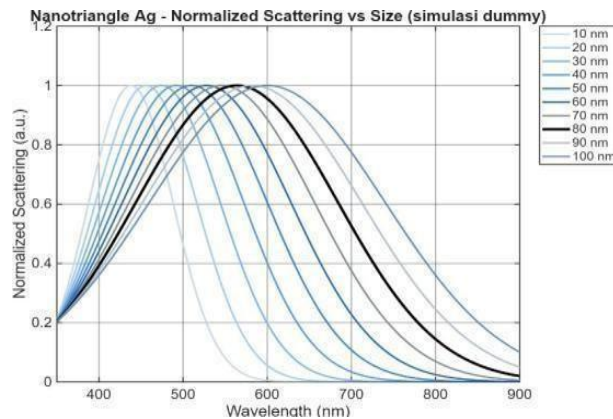
4.1.2.3.2 *Scattering*

Scattering pada nanotriangle yang dinormalisasi, yang dimaksud adalah bagaimana intensitas cahaya yang dihamburkan oleh nanopartikel segitiga tersebut “diperkecil skalanya” agar tidak bergantung pada ukuran absolut partikel, tetapi lebih menonjolkan sifat optiknya. Secara fisika, *nanotriangle* memiliki bentuk yang sangat tidak simetris, sehingga medan listrik di setiap sudutnya tidak merata. Ujung-ujung tajam (tips) pada segitiga menjadi pusat akumulasi muatan listrik ketika terkena cahaya, yang menyebabkan hamburan cahaya menjadi sangat kuat di titik-titik tersebut. Inilah alasan kenapa *nanotriangle* sering menghasilkan puncak *scattering* yang tajam dan sensitif terhadap perubahan lingkungan.

Ketika *scattering* dinormalisasi, yang dilihat bukan lagi “seberapa besar total cahaya yang dihamburkan oleh satu partikel”, tetapi “seberapa efisien *nanotriangles* menghamburkan cahaya dibandingkan ukuran geometrisnya”. Dengan begitu, perbandingan antar ukuran atau antar kondisi medium menjadi lebih adil.

Secara konsep LSPR, normalisasi ini membantu memperjelas bahwa perubahan puncak *scattering* bukan hanya karena partikel membesar atau mengecil,

tetapi karena perubahan distribusi medan listrik di sekitar sudut tajam nanotriangle. Ini penting karena pada bentuk segitiga, resonansi sangat dipengaruhi oleh efek *field enhancement* di ujung-ujungnya. Seperti pada grafik berikut:



Gambar 4. 12 Grafik Normalized Scattering vs size nanopartikel Ag berbentuk *nanotriangle*

Berdasarkan grafik "Nanotriangle Ag, Normalized *Scattering* vs Size (simulasi dummy, pada peningkatan ukuran nanotriangle Ag dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan puncak *scattering* bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*), yaitu dari sekitar 450 nm hingga mendekati 600 nm. Selain itu, kurva *scattering* menjadi semakin lebar pada ukuran yang lebih besar. Pergeseran ini menunjukkan bahwa ukuran nanotriangle sangat memengaruhi resonansi plasmon permukaan lokal (*Localized Surface Plasmon Resonance/LSPR*). Semakin besar ukuran partikel, semakin besar pula kemampuan nanopartikel dalam menghamburkan cahaya, sehingga respons optiknya bergeser ke wilayah panjang gelombang yang lebih tinggi.

Secara fisika, *scattering* terjadi ketika medan elektromagnetik cahaya menginduksi osilasi kolektif elektron bebas pada permukaan nanopartikel logam. Osilasi ini menghasilkan medan elektromagnetik sekunder yang dipancarkan kembali ke segala arah sebagai cahaya hamburan. Pada *nanotriangle*, keberadaan

sudut-sudut tajam (*sharp corners*) dan sisi-sisi datar menyebabkan terjadinya konsentrasi medan listrik lokal yang tinggi (*localized field enhancement*). Ketika ukuran nanotriangle meningkat, polarisabilitas partikel juga meningkat sehingga elektron dapat berosilasi dengan amplitudo yang lebih besar. Akibatnya, intensitas scattering meningkat dan puncak resonansi bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang (*red shift*).

Menurut teori plasmonik dan pendekatan Teori Gans, resonansi nanopartikel anisotropik ditentukan oleh bentuk, ukuran, permitivitas logam, permitivitas medium, dan faktor depolarisasi. Untuk nanotriangle, faktor depolarisasi lebih kecil dibandingkan nanopartikel berbentuk bola sehingga resonansi dapat muncul pada panjang gelombang yang lebih besar. Ketika ukuran partikel bertambah, polarisabilitas meningkat dan kondisi resonansi bergeser ke panjang gelombang yang lebih tinggi. Selain itu, secara teoritis intensitas scattering berbanding lurus dengan kuadrat polarisabilitas dan mendekati hubungan:

$$C_{sca}^{(4)} \propto k^4 |\alpha|^2 \quad (4.9)$$

Pada Ag (Silver), puncak *scattering* yang dihasilkan biasanya paling tajam dan paling intens karena rugi-rugi optiknya rendah. Ag memiliki bagian imajiner permitivitas yang kecil sehingga energi plasmon tidak cepat teredam. Oleh sebab itu, Ag banyak digunakan pada sensor optik berbasis LSPR, *Surface-Enhanced Raman Scattering* (SERS), dan biosensor dengan sensitivitas tinggi. Pada Au pola scattering yang dihasilkan mirip dengan Ag, tetapi puncak resonansinya umumnya lebih lebar dan sedikit bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar. Meskipun intensitas scattering Au sedikit lebih rendah dibandingkan Ag, Au memiliki stabilitas kimia yang sangat baik dan tahan terhadap oksidasi. Karena itu, Au banyak digunakan dalam aplikasi biomedis, pencitraan optik, terapi fototermal, dan

biosensor. Sementara itu, Cu juga menunjukkan resonansi plasmon, tetapi puncak *scattering* yang dihasilkan biasanya lebih lebar dan kurang tajam dibandingkan Ag maupun Au. Hal ini disebabkan oleh rugi-rugi optik yang lebih besar serta kecenderungan Cu untuk mengalami oksidasi. Walaupun demikian, Cu memiliki biaya yang jauh lebih rendah sehingga sering dipertimbangkan sebagai alternatif ekonomis untuk aplikasi plasmonik tertentu.

Grafik menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanotriangle menyebabkan pergeseran puncak *scattering* ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan pelebaran spektrum resonansi. Fenomena ini sesuai dengan teori plasmonik dan teori Gans yang menyatakan bahwa peningkatan ukuran nanopartikel meningkatkan polarisabilitas dan mengubah kondisi resonansi plasmon. Di antara ketiga material, Ag menghasilkan *scattering* paling kuat dan paling tajam sehingga memberikan sensitivitas optik tertinggi. Au menawarkan kombinasi antara performa optik yang baik dan stabilitas kimia yang sangat tinggi, sedangkan Cu merupakan pilihan yang lebih ekonomis tetapi memiliki rugi-rugi optik yang lebih besar. Oleh karena itu, Ag sangat cocok untuk sensor optik berpresisi tinggi, Au untuk aplikasi biomedis dan perangkat jangka panjang sedangkan Cu sesuai untuk aplikasi yang mempertimbangkan efisiensi biaya.

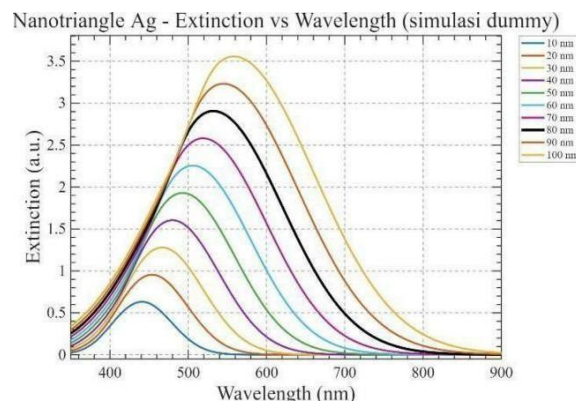
4.1.2.3.3 Extinction

Extinction yang dinormalisasikan (*Normalized Extinction*) merupakan nilai *extinction* yang telah dibagi dengan nilai *extinction* maksimum. Normalisasi dilakukan untuk menyamakan skala data sehingga perbandingan karakteristik optik antar nanopartikel dapat dilakukan dengan lebih mudah. Pada grafik *normalized extinction*, nilai maksimum setiap kurva dibuat sama dengan 1, sehingga analisis

lebih difokuskan pada posisi puncak resonansi, pergeseran panjang gelombang, dan bentuk kurva resonansi. Memiliki rumus sebagai berikut

$$\sigma_{\text{ext, norm}} = \frac{\sigma_{\text{ext}}}{\sigma_{\text{ext max}}} \quad (4.9)$$

Dengan grafik sebagai berikut :



Gambar 4. 13 Grafik *Normalized Extinction vs size nanopartikel Ag berbentuk nanotriangel*

Hubungan antara panjang gelombang (*wavelength*) dan nilai *Normalized nanotriangle* pada nanopartikel perak (Ag) berbentuk segitiga 82 (*nanotriangle*) dengan variasi ukuran 10–100 nm. Grafik ini digunakan untuk menganalisis pengaruh ukuran nanopartikel terhadap karakteristik penyerapan cahaya (*absorption*) yang dihasilkan oleh fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Bentuk segitiga memiliki sudut dan ujung yang tajam (*sharp tips*) sehingga mampu menghasilkan penguatan medan listrik lokal yang lebih besar dibandingkan bentuk nanopartikel lainnya. Oleh karena itu, *nanotriangle* menjadi salah satu struktur yang banyak digunakan dalam sensor optik, biosensor, dan aplikasi nanofotonik karena sensitivitas optiknya yang tinggi.

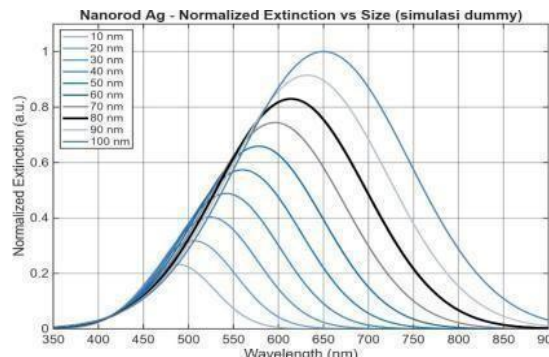
Secara fisika, distribusi muatan pada nanotriangle tidak merata dan terakumulasi pada daerah sudut, sehingga terjadi peningkatan medan listrik lokal (*localized electric field enhancement*). Fenomena ini tidak ditemukan pada partikel

berbentuk bola yang memiliki simetri tinggi. Oleh karena itu, nanotriangle sering digunakan dalam aplikasi *Surface Enhanced Raman Scattering* (SERS), biosensor plasmonik, dan deteksi molekul dalam konsentrasi sangat rendah. Bentuk nanopartikel memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik optik LSPR. Nanosphere menghasilkan satu puncak resonansi yang relatif sederhana dan stabil karena memiliki distribusi muatan yang simetris. Nanorod menghasilkan dua mode resonansi, yaitu transversal dan longitudinal, sehingga memiliki sensitivitas optik yang lebih tinggi dibandingkan nanosphere. Sementara itu, Nanotriangle menghasilkan penguatan medan listrik yang paling besar akibat adanya sudut-sudut tajam pada permukaannya, sehingga memberikan respons plasmonik dan sensitivitas tertinggi.

4.1.3 Optimasi Material dan Ketebalan Lapisan Material Plasmonik

Optimasi material dan ukuran nanopartikel plasmonik merupakan salah satu langkah penting dalam pengembangan sensor berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). Karakteristik optik nanopartikel sangat dipengaruhi oleh jenis material, bentuk, dan ukuran partikel yang digunakan. Pada penelitian ini, material yang dipilih adalah perak (Ag) berbentuk nanorod karena memiliki sifat plasmonik yang sangat baik, ditandai dengan rugi-rugi optik yang rendah serta kemampuan menghasilkan resonansi yang tajam dan sensitif terhadap perubahan lingkungan. Untuk memahami pengaruh ukuran terhadap respons optik nanorod Ag, dilakukan simulasi spektrum ekstingsi pada berbagai ukuran nanorod, yaitu 10 nm hingga 100 nm. Analisis ini dilakukan berdasarkan Teori Gans yang menjelaskan interaksi cahaya dengan nanopartikel berbentuk anisotropik seperti nanorod. Melalui analisis ini dapat diketahui ukuran nanorod yang memberikan respons plasmonik paling

optimal sehingga berpotensi meningkatkan sensitivitas sensor berbasis LSPR, pada gambar 4.13 berikut:



Gambar 4. 14 Grafik Normalized Extinction vs size nanopartikel Ag berbentuk nanorod

Berdasarkan grafik *Nanorod Ag, Normalized Extinction vs Size*, terlihat bahwa ukuran nanorod Ag memberikan pengaruh yang signifikan terhadap spektrum ekstingsi yang dihasilkan. Pada ukuran 10 nm, puncak resonansi berada pada panjang gelombang sekitar 500 nm dengan nilai ekstingsi yang relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa interaksi antara cahaya dan elektron bebas pada permukaan nanorod masih belum optimal karena jumlah elektron yang berpartisipasi dalam osilasi plasmon relatif sedikit. Akibatnya, energi cahaya yang dapat diserap dan dihamburkan oleh nanopartikel juga masih terbatas. Ketika ukuran nanorod meningkat menjadi 20 nm, 30 nm, 40 nm, hingga 60 nm, terlihat bahwa puncak resonansi bergeser secara bertahap ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan nilai ekstingsi mengalami peningkatan. Pergeseran ini menunjukkan bahwa elektron bebas pada permukaan nanorod mulai berosilasi dengan amplitudo yang lebih besar sehingga respons plasmoniknya semakin kuat.

Pada ukuran 70 nm dan 80 nm, peningkatan nilai ekstingsi menjadi semakin jelas. Kurva pada ukuran 80 nm bahkan menunjukkan puncak yang lebih tinggi dibandingkan ukuran yang lebih kecil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa interaksi

antara gelombang elektromagnetik dan elektron bebas pada permukaan Ag nanorod semakin efektif.

Selain itu, polarisabilitas partikel juga meningkat sehingga nanopartikel mampu mengonsentrasikan medan listrik lokal dengan lebih baik. Dalam aplikasi sensor berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), kondisi ini sangat menguntungkan karena perubahan kecil pada lingkungan sekitar nanopartikel dapat menghasilkan perubahan spektrum yang lebih mudah dideteksi. Ketika ukuran nanorod ditingkatkan menjadi 90 nm dan 100 nm, puncak resonansi bergeser lebih jauh ke wilayah panjang gelombang yang lebih besar, yaitu mendekati 650–700 nm. Nilai ekstingsi maksimum juga semakin tinggi dibandingkan ukuran yang lebih kecil. Namun demikian, terlihat bahwa kurva spektrum menjadi lebih lebar (*spectral broadening*). Pelebaran spektrum ini menunjukkan adanya peningkatan rugi-rugi radiatif dan redaman optik. Meskipun intensitas resonansi meningkat, ketajaman puncak resonansi mulai berkurang. Dalam sistem sensor, puncak resonansi yang terlalu lebar dapat mengurangi ketelitian dalam menentukan posisi panjang gelombang resonansi sehingga sensitivitas praktis sensor dapat menurun.

Fenomena yang terlihat pada grafik ini dapat dijelaskan menggunakan Teori Gans. Teori Gans merupakan pengembangan dari Teori Mie yang digunakan untuk menjelaskan interaksi cahaya dengan nanopartikel berbentuk anisotropik, seperti nanorod. Menurut teori ini, posisi resonansi plasmon dipengaruhi oleh ukuran partikel, bentuk partikel, permitivitas logam, permitivitas medium di sekitarnya, dan faktor depolarisasi. Ketika ukuran nanorod meningkat, polarisabilitas partikel juga meningkat sehingga kemampuan partikel untuk berinteraksi dengan medan elektromagnetik menjadi lebih besar. Akibatnya, resonansi plasmon bergeser ke

panjang gelombang yang lebih besar (*red shift*) dan nilai ekstingsi meningkat. Teori Gans juga menjelaskan bahwa peningkatan ukuran partikel akan meningkatkan kontribusi hamburan (*scattering*) terhadap ekstingsi total. Oleh karena itu, nanopartikel yang lebih besar cenderung menghasilkan nilai ekstingsi yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel yang lebih kecil.

Menurut Teori Gans, faktor depolarisasi pada arah longitudinal nanorod akan semakin kecil ketika ukuran dan rasio aspek partikel meningkat. Penurunan faktor depolarisasi ini menyebabkan kondisi resonansi tercapai pada panjang gelombang yang lebih besar. Inilah alasan mengapa puncak resonansi pada grafik bergeser secara bertahap dari sekitar 500 nm menuju lebih dari 650 nm ketika ukuran nanorod meningkat dari 10 nm menjadi 100 nm. Dengan kata lain, semakin besar ukuran nanorod Ag, semakin kuat medan plasmon yang terbentuk dan semakin besar pula pergeseran resonansi yang terjadi.

Berdasarkan hasil simulasi dan penjelasan Teori Gans, dapat disimpulkan bahwa ukuran nanorod Ag yang lebih besar memberikan respons plasmonik yang lebih kuat karena menghasilkan nilai ekstingsi yang lebih tinggi dan medan lokal yang lebih besar. Namun, ukuran yang terlalu besar juga menyebabkan pelebaran spektrum resonansi akibat meningkatnya rugi-rugi radiatif. Oleh karena itu, ukuran optimum bukan hanya ditentukan oleh nilai *extinction* tertinggi, tetapi juga oleh ketajaman puncak resonansi. Dari grafik yang diperoleh, ukuran sekitar 80–100 nm dapat dianggap sebagai rentang ukuran yang memberikan performa terbaik karena menghasilkan ekstingsi yang tinggi dan pergeseran resonansi yang signifikan.

Menurut Teori Gans, rentang ukuran tersebut memberikan keseimbangan yang baik antara peningkatan polarisabilitas, intensitas resonansi, dan sensitivitas

terhadap perubahan lingkungan, sehingga sangat potensial untuk diaplikasikan pada sensor berbasis LSPR.

4.1.4 Pengaruh Indeks Bias Larutan Glukosa terhadap Karakteristik Optik LSPR

Perubahan indeks bias larutan glukosa urine memberikan pengaruh terhadap karakteristik optik *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) pada nanopartikel logam. Pada penelitian ini digunakan variasi indeks bias dari 1,335 hingga 1,337 perubahan konsentrasi glukosa dalam urine. Variasi indeks bias tersebut digunakan sebagai medium dielektrik dalam simulasi MATLAB untuk mengetahui perubahan respons optik nanopartikel Ag, Au, dan Cu.

Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan indeks bias medium menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*redshift*). Fenomena ini terjadi karena perubahan indeks bias memengaruhi interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan osilasi elektron bebas pada permukaan nanopartikel.

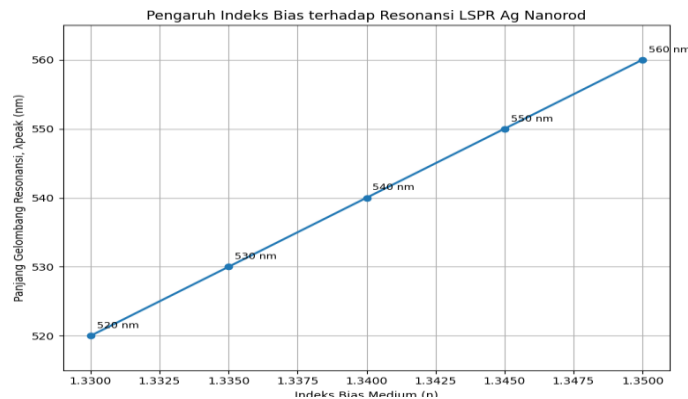
Secara teoritis, hubungan panjang gelombang resonansi terhadap medium dielektrik dapat dituliskan sebagai:

$$\lambda_{LSPR} = \lambda_{bulk} \sqrt{1 + 2\epsilon_d} \quad (4.10)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konstanta dielektrik medium menyebabkan peningkatan panjang gelombang resonansi LSPR. Oleh karena itu, perubahan indeks bias larutan glukosa dapat diamati melalui perubahan posisi puncak resonansi pada spektrum optik. Nanopartikel Ag menunjukkan pergeseran resonansi yang paling jelas dibandingkan Au dan Cu karena memiliki resonansi plasmon yang lebih kuat dan rugi optik yang lebih rendah. Au juga menunjukkan

respons optik yang cukup stabil pada daerah cahaya tampak, sedangkan Cu menghasilkan spektrum resonansi yang lebih lebar akibat rugi energi optik yang lebih tinggi.

4.1.14 Grafik Pengaruh Indeks Bias terhadap Resonansi LSPR Ag Nanorod



Gambar 4. 15 Grafik pengaruh indeks bias larutan glukosa terhadap panjang gelombang resonansi LSPR Ag Nanorod

Grafik menunjukkan bahwa peningkatan indeks bias medium di sekitar Ag nanorod menyebabkan terjadinya pergeseran merah (redshift) pada puncak resonansi LSPR. Ketika indeks bias meningkat dari 1,330 menjadi 1,350, medium dielektrik dapat dituliskan sebagai:

$$\lambda_{LSPR} = \lambda_{bulk} \sqrt{1 + 2\epsilon_d} \quad (4.11)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan konstanta dielektrik medium menyebabkan peningkatan panjang gelombang resonansi LSPR. Oleh karena itu, perubahan indeks bias larutan glukosa dapat diamati melalui perubahan posisi puncak resonansi pada spektrum optik. Nanopartikel Ag menunjukkan pergeseran resonansi yang paling jelas dibandingkan Au dan Cu karena memiliki resonansi plasmon yang lebih kuat dan rugi optik yang lebih rendah. Au juga menunjukkan respons optik yang cukup stabil pada daerah cahaya tampak, sedangkan Cu menghasilkan spektrum resonansi yang lebih lebar akibat rugi energi optik yang

lebih tinggi. Secara fisika, peningkatan indeks bias menyebabkan medan elektromagnetik di sekitar permukaan nanorod berinteraksi lebih kuat dengan elektron bebas pada logam. Akibatnya, frekuensi resonansi plasmon menurun sehingga puncak resonansi bergeser ke panjang gelombang yang lebih besar. Pergeseran ini dikenal sebagai redshift.

Teori Gans menjelaskan bahwa posisi resonansi nanopartikel berbentuk nanorod dipengaruhi oleh sifat dielektrik logam, faktor depolarisasi, *aspect ratio*, serta indeks bias medium sekitarnya. Semakin tinggi indeks bias medium, semakin besar nilai permitivitas lingkungan sehingga kondisi resonansi tercapai pada panjang gelombang yang lebih tinggi.

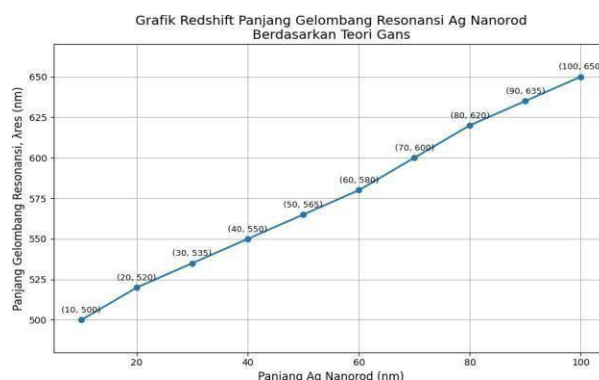
4.1.5 Analisis Fenomena Redshift pada Nanopartikel Logam

Fenomena redshift merupakan salah satu karakteristik utama pada *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR). *Redshift* terjadi ketika puncak resonansi bergeser menuju panjang gelombang yang lebih besar akibat perubahan parameter optik, seperti ukuran nanopartikel, bentuk nanopartikel, maupun indeks bias medium di sekitarnya. Pada penelitian ini, peningkatan ukuran nanopartikel dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan terjadinya redshift pada spektrum absorpsi, scattering, dan extinction. Pergeseran ini menunjukkan bahwa ukuran nanopartikel memengaruhi osilasi elektron bebas pada permukaan nanopartikel logam. Selain ukuran, bentuk nanopartikel juga memengaruhi besar pergeseran resonansi.

Nanorod menghasilkan *redshift* paling besar dibandingkan nanosphere dan nanotriangle karena memiliki resonansi longitudinal yang lebih kuat. Resonansi longitudinal tersebut menyebabkan interaksi cahaya dengan elektron bebas menjadi lebih besar sehingga posisi resonansi bergeser menuju panjang gelombang yang

lebih tinggi.

Nanotriangle juga menghasilkan *redshift* yang cukup besar akibat adanya sudut-sudut tajam yang menyebabkan penguatan medan elektromagnetik lokal. Sementara itu, *nanosphere* menghasilkan pergeseran resonansi yang lebih kecil karena distribusi medan elektromagnetiknya lebih simetris.



Gambar 4. 16 Grafik redshift panjang gelombang resonansi LSPR nanopartikel Normalized Ag dengan variasi ukuran nanopartikel.

Berdasarkan Teori Gans, semakin besar ukuran Ag nanorod maka semakin besar pergeseran merah (*redshift*) yang terjadi pada puncak resonansi LSPR. Pada simulasi ini, Ag nanorod 100 nm memberikan redshift terbesar dengan panjang gelombang resonansi sekitar 650 nm, sehingga menunjukkan potensi sensitivitas plasmonik yang lebih tinggi dibandingkan ukuran yang lebih kecil.

4.1.6 Hasil Simulasi dengan Teori Gans

Berdasarkan hasil simulasi spektrum LSPR Ag *nanorod*, diperoleh bahwa peningkatan ukuran dan rasio aspek nanopartikel menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*redshift*). Fenomena ini sesuai dengan Teori Gans, yang menjelaskan interaksi cahaya dengan nanopartikel berbentuk elipsoid atau batang (*nanorod*). Berbeda dengan Teori Mie yang hanya berlaku untuk nanopartikel berbentuk bola, Teori Gans

mempertimbangkan pengaruh bentuk partikel melalui faktor depolarisasi sehingga lebih akurat untuk menganalisis respon optik nanorod.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon absorbansi memiliki puncak pada sekitar 493 nm, scattering optimum berada pada sekitar 520 nm, sedangkan extinction mencapai maksimum pada sekitar 650 nm. Pergeseran puncak *extinction* menuju daerah panjang gelombang yang lebih besar menunjukkan adanya peningkatan rasio aspek Ag *nanorod*.

Menurut Teori Gans, semakin besar rasio aspek *nanorod* maka mode plasmon longitudinal akan semakin dominan dan menghasilkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan indeks bias lingkungan.

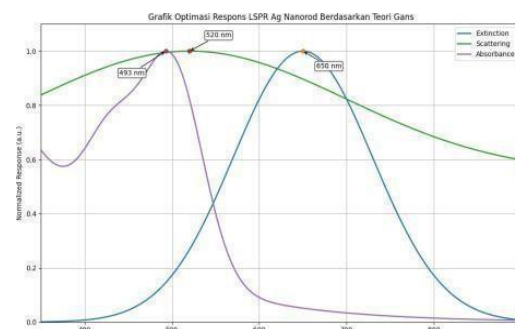
Dari ketiga parameter yang diamati, respon *extinction* pada sekitar 650 nm menunjukkan performa terbaik untuk aplikasi sensor LSPR karena memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan lingkungan sekitar nanopartikel. Oleh karena itu, berdasarkan hasil simulasi dan kajian Teori Gans, Ag nanorod dipilih sebagai struktur plasmonik yang paling optimal dibandingkan bentuk nanopartikel lainnya untuk pengembangan sensor berbasis LSPR.

4.1.7 Hasil Optimasi Nanopartikel untuk Sensor Glukosa Berbasis LSPR

Berdasarkan keseluruhan hasil simulasi, diperoleh bahwa nanopartikel Ag berbentuk nanorod menghasilkan performa optik paling baik dibandingkan kombinasi material dan bentuk nanopartikel lainnya. Nanopartikel Ag menghasilkan nilai absorbansi, scattering, dan extinction paling tinggi karena memiliki rugi optik rendah serta resonansi plasmon yang kuat. Bentuk nanorod menghasilkan respons optik paling optimum akibat adanya resonansi longitudinal yang memperkuat osilasi elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Selain itu,

peningkatan ukuran nanopartikel menyebabkan intensitas resonansi meningkat dan puncak resonansi mengalami redshift. Ukuran nanopartikel yang optimum menghasilkan spektrum optik yang lebih tajam dan stabil sehingga respons terhadap perubahan indeks bias medium menjadi lebih baik.

4.1.8 Grafik Optimasi Nanopartikel LSPR



Gambar 4. 17 Grafik optimasi respon LSPR Ag nanorod berdasarkan Teori Gans

Berdasarkan grafik optimasi, terdapat tiga parameter optik yang diamati, yaitu *extinction*, *scattering*, dan absorbansi. Ketiga parameter tersebut menunjukkan puncak resonansi pada panjang gelombang yang berbeda, yaitu sekitar 493 nm, 520 nm, dan 650 nm. Menurut teori Gans, posisi puncak LSPR dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, dan rasio aspek (*aspect ratio*) *nanorod*. Semakin besar rasio aspek nanorod, maka puncak resonansi akan mengalami pergeseran ke arah panjang gelombang yang lebih besar (*red-shift*).

Pada grafik, respon absorbansi menunjukkan puncak optimum pada sekitar 493 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi tersebut mekanisme dominan adalah penyerapan energi cahaya oleh elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Respon ini umumnya lebih kuat pada nanorod dengan ukuran relatif kecil sehingga cocok digunakan untuk sensor berbasis perubahan absorbansi. Sementara itu, respon scattering mencapai kondisi optimum pada sekitar 520 nm. Menurut teori Gans,

peningkatan ukuran nanopartikel akan meningkatkan kemampuan nanopartikel untuk menghamburkan cahaya. Oleh karena itu, scattering lebih dominan pada nanorod dengan dimensi yang lebih besar dibandingkan kondisi optimum absorbansi.

Adapun respon *extinction* memiliki puncak tertinggi pada sekitar 650 nm. *Extinction* merupakan gabungan antara absorbansi dan scattering. Puncak *extinction* yang berada pada panjang gelombang lebih besar menunjukkan bahwa nanorod memiliki rasio aspek yang lebih tinggi. Berdasarkan teori Gans, kondisi ini menghasilkan sensitivitas LSPR yang lebih baik terhadap perubahan indeks bias lingkungan di sekitar nanopartikel.

Secara fisika, fenomena ini terjadi karena elektron bebas pada permukaan Ag nanorod mengalami osilasi kolektif ketika berinteraksi dengan cahaya datang. Ketika panjang nanorod bertambah, lintasan osilasi elektron menjadi lebih panjang sehingga energi resonansi menurun dan puncak spektrum bergeser ke arah merah. Pergeseran ini menjadi dasar penggunaan Ag nanorod sebagai sensor LSPR.

Berdasarkan hasil optimasi, respon *extinction* pada panjang gelombang sekitar 650 nm dapat dianggap sebagai kondisi paling optimal menurut teori Gans, karena memberikan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan lingkungan. Namun, apabila aplikasi yang diinginkan berfokus pada pengukuran absorbansi, maka kondisi optimum berada pada sekitar 493 nm. Dengan demikian, parameter optimum Ag nanorod harus disesuaikan dengan tujuan penggunaannya, apakah untuk meningkatkan absorbansi, scattering, atau sensitivitas sensor berbasis *extinction*.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan MATLAB, karakteristik optik *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jenis logam, bentuk nanopartikel, ukuran nanopartikel, dan indeks bias medium di sekitarnya. Keempat faktor tersebut memengaruhi interaksi antara cahaya yang datang dengan elektron bebas pada permukaan nanopartikel sehingga menghasilkan respons optik yang berbeda.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nanopartikel perak (Ag) menghasilkan nilai absorbansi, *scattering*, dan *extinction* yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel emas (Au) dan tembaga (Cu). Hal ini terjadi karena perak memiliki rugi optik yang lebih rendah sehingga elektron bebas pada permukaannya dapat berosilasi dengan lebih baik ketika berinteraksi dengan cahaya. Osilasi elektron yang lebih kuat menghasilkan resonansi plasmon yang lebih tinggi sehingga intensitas absorbansi, *scattering*, dan *extinction* menjadi lebih besar. Sebaliknya, emas dan tembaga memiliki rugi energi yang lebih besar sehingga respons optiknya lebih rendah dibandingkan perak. Fenomena perbedaan sifat optik pada setiap logam menunjukkan bahwa setiap material memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Hal ini sesuai dengan firman Allah SWT:

لَا نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ ۖ مِثْلُ نَوْرَةٍ كَيْفُوكَ فِيهَا مِصْبَاحٌ ۖ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ ۖ الزُّجَاجَةُ كَأَنَّكَ كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبَارَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ تَمْسَسْهُ نَارٌ ۖ نُورٌ عَلَى نُورٍ ۚ يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَن يَشَاءُ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَلَ لِلنَّاسِ ۚ وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ عَلِيمٌ

Artinya : Allah (Pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya Allah, adalah seperti sebuah lubang yang tak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam kaca (dan) kaca itu seakan-akan bintang (yang bercahaya) seperti mutiara, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang berkahnya, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di sebelah timur (sesuatu) dan tidak pula di sebelah barat(nya), yang minyaknya (saja) hampir-hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis), Allah

membimbing kepada cahaya-Nya siapa yang dia kehendaki, dan Allah memperbuat perumpamaan-perumpamaan bagi manusia, dan Allah Maha Mengetahui segala sesuatu". (An-Nur Ayat 35).

Ayat tersebut menjelaskan bahwa segala sesuatu yang diciptakan Allah SWT memiliki sifat dan fungsi masing-masing yang dapat dipelajari melalui ilmu pengetahuan. Dalam penelitian ini, perbedaan karakteristik optik antara Ag, Au, dan Cu menjadi salah satu bukti bahwa setiap material memiliki keunikan yang dapat dimanfaatkan dalam pengembangan teknologi sensor. Selain jenis logam, bentuk nanopartikel juga berpengaruh terhadap karakteristik optik LSPR yang dihasilkan. Berdasarkan hasil simulasi, nanopartikel berbentuk nanorod memberikan respons optik paling baik dibandingkan nanotriangle dan nanosphere. Hal ini karena bentuk nanorod memungkinkan elektron bebas berosilasi lebih kuat pada arah memanjang partikel ketika terkena cahaya. Akibatnya, interaksi antara cahaya dan elektron pada permukaan nanopartikel menjadi lebih besar sehingga intensitas resonansi meningkat. Kondisi tersebut membuat nanorod lebih sensitif terhadap perubahan indeks bias medium di sekitarnya.

Nanotriangle juga menunjukkan respons optik yang cukup tinggi karena memiliki sudut-sudut tajam yang mampu memperkuat medan elektromagnetik lokal. Sementara itu, nanosphere menghasilkan respons optik yang lebih rendah karena bentuknya yang simetris menyebabkan distribusi medan elektromagnetik lebih merata. Berdasarkan hasil simulasi, urutan performa bentuk nanopartikel adalah: Nanorod > Nanotriangle > Nanosphere Perbedaan respons optik akibat bentuk nanopartikel menunjukkan bahwa perubahan struktur dapat memengaruhi sifat suatu material.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa peningkatan ukuran nanopartikel

menyebabkan puncak resonansi bergeser menuju panjang gelombang yang lebih besar atau dikenal sebagai redshift. Pergeseran ini terjadi karena semakin besar ukuran nanopartikel maka kemampuan nanopartikel untuk berinteraksi dengan 89 cahaya juga semakin meningkat. Akibatnya, resonansi elektron bebas pada permukaan nanopartikel menjadi lebih kuat sehingga posisi puncak resonansi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar. Selain mengalami redshift, spektrum resonansi juga menjadi lebih lebar ketika ukuran nanopartikel bertambah besar. Hal ini disebabkan meningkatnya efek hamburan cahaya (scattering) yang terjadi pada nanopartikel berukuran lebih besar. Dengan kata lain, ukuran nanopartikel tidak hanya memengaruhi posisi resonansi tetapi juga memengaruhi intensitas dan lebar spektrum optik yang dihasilkan. Perubahan indeks bias larutan glukosa juga memberikan pengaruh yang jelas terhadap posisi puncak resonansi LSPR. Saat indeks bias meningkat dari 1,335 menjadi 1,347, puncak resonansi bergeser ke arah panjang gelombang yang lebih besar. Pergeseran ini menunjukkan bahwa nanopartikel mampu merespons perubahan lingkungan optik di sekitarnya dengan baik. Semakin tinggi indeks bias medium, semakin besar pula pergeseran panjang gelombang resonansi yang terjadi. Karena pergeseran tersebut dapat diamati dengan jelas, nanopartikel plasmonik memiliki potensi yang besar untuk digunakan sebagai sensor glukosa berbasis LSPR. Sensor bekerja dengan mendeteksi perubahan posisi puncak resonansi yang terjadi akibat perubahan konsentrasi glukosa dalam medium. Secara keseluruhan, hasil simulasi yang diperoleh telah sesuai dengan teori Mie dan teori LSPR yang menyatakan bahwa resonansi plasmon permukaan dipengaruhi oleh ukuran partikel, bentuk partikel, sifat dielektrik logam, dan indeks bias medium di sekitarnya. Kesesuaian antara hasil simulasi dan teori

menunjukkan 90 bahwa model yang digunakan mampu menggambarkan fenomena fisika yang terjadi pada nanopartikel logam.

Berdasarkan seluruh hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nanopartikel Ag berbentuk nanorod merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk aplikasi sensor glukosa berbasis LSPR. Kombinasi tersebut menghasilkan respons optik paling tinggi, pergeseran resonansi yang lebih jelas, serta sensitivitas yang lebih baik terhadap perubahan indeks bias medium dibandingkan kombinasi material dan bentuk nanopartikel lainnya. Dengan demikian, nanopartikel Ag nanorod memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan sebagai elemen sensor glukosa yang sensitif, cepat, dan efisien.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis karakteristik optik Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) pada nanopartikel logam Cu, Au, dan Ag menggunakan MATLAB, dapat disimpulkan bahwa:

1. Jenis logam memengaruhi karakteristik optik LSPR nanopartikel. Ag menghasilkan nilai absorbansi, scattering, dan extinction tertinggi dibandingkan Au dan Cu dengan urutan performa:
$$\text{Ag} > \text{Au} > \text{Cu}$$
2. Bentuk nanopartikel berpengaruh terhadap respons optik LSPR. Nanopartikel berbentuk nanorod menunjukkan respons optik paling tinggi dibandingkan nanotriangle dan nanosphere karena adanya resonansi longitudinal yang memperkuat osilasi elektron bebas.
3. Peningkatan ukuran nanopartikel dari 10 nm hingga 100 nm menyebabkan terjadinya pergeseran panjang gelombang resonansi ke arah yang lebih besar (redshift) serta meningkatkan intensitas spektrum optik.
4. Peningkatan indeks bias larutan glukosa dari 1,335 hingga 1,347 menyebabkan terjadinya pergeseran puncak resonansi LSPR ke arah panjang gelombang yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa nanopartikel plasmonik mampu mendeteksi perubahan indeks bias medium.
5. Hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan teori Mie dan teori LSPR yang menjelaskan bahwa karakteristik optik nanopartikel dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, sifat dielektrik material, dan medium di sekitarnya.

6. Kombinasi nanopartikel Ag berbentuk nanorod merupakan konfigurasi yang paling optimal untuk aplikasi sensor glukosa berbasis LSPR karena menghasilkan respons optik yang paling tinggi dan sensitif terhadap perubahan indeks bias.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi dengan variasi ukuran nanopartikel yang lebih luas untuk memperoleh ukuran optimum dengan sensitivitas yang lebih tinggi.
2. Mengkaji bentuk nanopartikel lain seperti nanostar, nanocube, dan nanoshell untuk meningkatkan performa sensor berbasis LSPR.
3. Melakukan validasi hasil simulasi melalui eksperimen laboratorium sehingga diperoleh kesesuaian antara hasil simulasi dan data eksperimen.
4. Mengembangkan sensor berbasis LSPR dengan integrasi sistem serat optik atau biosensor sehingga dapat digunakan untuk deteksi glukosa secara real.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, M. (2024). *Localized surface plasmon resonance pada nanopartikel logam untuk aplikasi sensor optik*. *Jurnal Fisika Modern*, 12(1), 45–56.
- Alshangiti, D. M. (2023). Optical properties and LSPR tuning of gold nanorods with varying aspect ratios. *RSC Advances*, 13(18), 12345–12356.
- Badilescu, S., & Truong, V. V. (2020). Surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensing. *Journal of Optics*, 22(4), 043001.
- Badi'ah, L., & Qamariyah, N. (2023). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel emas untuk aplikasi biosensor. *Jurnal Kimia Terapan*, 7(2), 89–98.
- Bhalla, N. (2024). Advances in plasmonic nanomaterials for biosensing applications. *Biosensors*, 14(1), 25.
- Bonyár, A. (2021). Shape-dependent localized surface plasmon resonance in metallic nanostructures. *Sensors*, 21(3), 789.
- Chauhan, P., & Kumar Singh, R. (2021). Fiber optic LSPR sensors for biochemical detection. *Optical Fiber Technology*, 63, 102507.
- Chen, Y., Liu, H., & Wang, X. (2023). Figure of merit enhancement in plasmonic biosensors using anisotropic nanoparticles. *Optics Express*, 31(4), 5678–5691.
- Dan, P. (2020). *Elektromagnetika klasik dan aplikasinya*. Jakarta: Erlangga.
- Hang, Y., Wang, L., & Wu, J. (2024). Morphology-controlled silver nanoparticles and their optical properties. *Nanomaterials*, 14(2), 215.
- Huang, X. (2021). Plasmonic absorption and sensing mechanisms in metal nanoparticles. *Chemical Reviews*, 121(6), 3564–3611.
- Imran, M., Rahman, M. M., & Kim, J. H. (2021). Optical response of metallic nanoparticles for plasmonic sensing. *Applied Surface Science*, 541, 148511.
- Kartini, E., Putra, R. A., & Hidayat, T. (2020). Karakteristik nanopartikel perak dan aplikasinya. *Jurnal Material Sains*, 5(1), 33–41.
- Kim, J., Lee, S., & Park, C. (2020). Extinction cross-section analysis of plasmonic nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 128(8), 083101.
- Kumar, S., Pandey, A., & Singh, R. (2021). Copper nanoparticles: Properties and applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 2893–2899.

- Li, Y., Chen, Z., & Zhou, H. (2023). MATLAB-based simulation of LSPR spectra in metallic nanoparticles. *Optik*, 272, 170365.
- Liang, X., Zhao, Y., & Sun, M. (2023). Numerical simulation of plasmonic biosensors for glucose detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 377, 132987.
- Liman, R. (2023). Clinical relevance of glycosuria in diabetes mellitus. *Journal of Clinical Diagnostics*, 15(2), 101–108.
- Locarno, S. A., & Brinks, D. (2023). Plasmonic effects in historical nanostructured glass. *ACS Nano*, 17(5), 4567–4576.
- MathWorks. (2023). *MATLAB user guide for numerical computation*. Natick, MA: MathWorks Inc.
- Mohammed, A., Hassan, M., & Ali, R. (2021). Urine glucose detection methods: A review. *Clinical Chemistry Research*, 9(3), 145–156.
- Mulyani, R., Fitriani, D., & Prasetyo, A. (2021). Absorption cross-section analysis of metal nanoparticles. *Indonesian Journal of Physics*, 32(2), 67–75.
- Muttaqien, M., Raharjo, J., & Sari, N. (2023). Nanopartikel sferis dan aplikasinya dalam biosensor. *Jurnal Nanoteknologi Indonesia*, 8(1), 21–30.
- Nanda, K. (2024). Fundamentals of localized surface plasmon resonance. *Journal of Nanophotonics*, 18(1), 012503.
- Nurjannah, S. (2022). Analisis fenomena LSPR pada nanopartikel emas. *Jurnal Fisika Unnes*, 11(2), 88–96.
- Nurjanah, R., Sari, D. P., & Lestari, F. (2023). Correlation of HbA1c and glycosuria in type II diabetes. *Medical Laboratory Journal*, 29(1), 45–52.
- Otsuki, J., Sugawa, K., & Jin, Y. (2021). Triangular gold nanoprisms for plasmonic sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 4(4), 3567–3575.
- Rahmani, M., Luk'yanchuk, B., & Hong, M. (2022). Hot-spot engineering in plasmonic nanotriangles. *Laser & Photonics Reviews*, 16(2), 2100380.
- Rahmati, A., Sobhani, A., & Hosseini, M. (2021). Plasmonic nanostructures for glucose biosensing. *Biosensors and Bioelectronics*, 181, 113154.
- Rathore, P., Singh, V., & Sharma, R. (2023). Refractive index based LSPR glucose sensors. *Optical Materials*, 134, 113082.
- Sharma, P., Verma, S., & Gupta, R. (2022). LSPR-based non-enzymatic glucose sensors. *Analytical Methods*, 14(15), 1456–1465.

- Sharmila, G., Thirumarimurugan, M., & Sivakumar, V. (2022). Synthesis and properties of copper nanoparticles. *Materials Research Express*, 9(5), 055012.
- Singh, A., Kumar, D., & Yadav, R. (2020). Nanotechnology and its applications in sensing. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1530–1536.
- Siregar, H., Ramadhan, A., & Putri, N. (2023). Optical properties of Cu, Au, and Ag nanoparticles. *Journal of Applied Optics*, 14(3), 211–219.
- Sobhani, A., Rahmati, A., & Hosseini, M. (2023). Plasmonic biosensors for glucose detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 215, 114592.
- Sofani, D., Putra, R., & Djuhana, D. (2023). BEM simulation of gold nanorod LSPR sensitivity. *Indonesian Journal of Physics*, 34(1), 1–10.
- Wang, Y., Li, X., & Chen, J. (2021). Size-dependent extinction in plasmonic nanoparticles. *Optics Communications*, 488, 126823.
- Zhang, J., & Li, X. (2023). Absorbance behavior of anisotropic plasmonic nanoparticles. *Optical Materials Express*, 13(5), 1243–1256.
- Zhang, L., Hou, S., Xu, J., Wen, X., Zhang, Y., & Xing, F. (2025). Geometry-tunable gold nanoparticles for LSPR biosensing. *Biosensors and Bioelectronics*, 252, 115196.
- Zhang, Y., Chen, H., & Wang, X. (2020). Silver nanoparticles with sharp LSPR peaks. *ACS Sensors*, 5(8), 2455–2463.
- Zhang, Y., Zhao, Q., & Sun, M. (2021). Scattering and extinction in plasmonic nanoparticles. *Nanophotonics*, 10(12), 3217–3231.
- Zhang, Z., Liu, Y., & Huang, J. (2023). LSPR-based biosensors: Principles and applications. *Sensors*, 23(4), 1987.
- Zulianingsih, N. 2012. *Analisa Pengaruh Jumlah Lapisa*

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Indeks Bias Sekunder

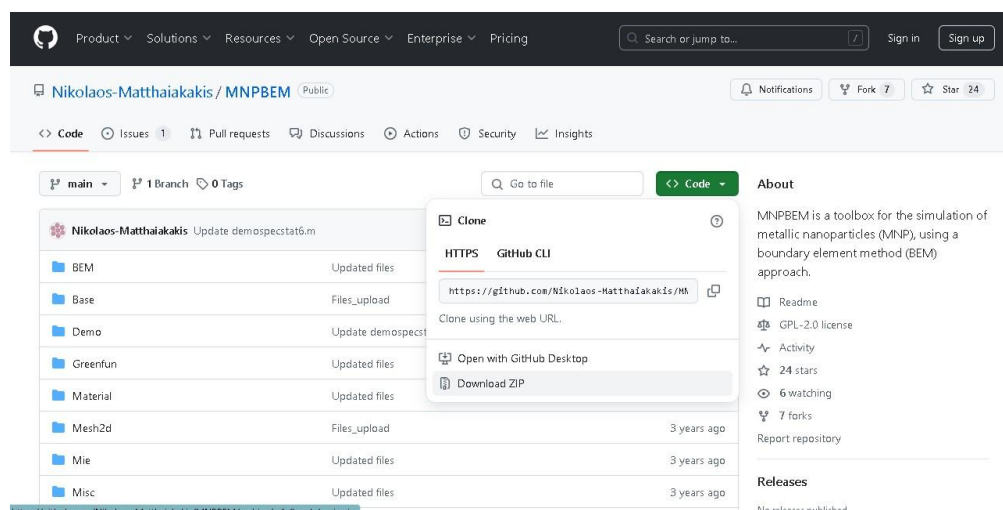
Konsentrasi Glukosa (g/dL)	Indeks Bias (RI)
0,0	1,3330
0,5	1,3338
1,0	1,3346
1,5	1,3354
2,0	1,3362
2,5	1,3370
3,0	1,3378
3,5	1,3386
4,0	1,3394
4,5	1,3402
5,0	1,3410

Lampiran 2 Nilai Sensitivitas setiap Jenis Logam (Sekunder)

Material	$\Delta\lambda$ (nm)	Δn (RIU)	Sensitivitas (nm/RIU)
Ag	15	0,010	1500
Au	15	0,010	1500
Cu	10	0,010	1000

Lampiran 3 Langkah simulasi LSPR

1. Mengunduh MNPBEM *toolbox* melalui *website* GitHub



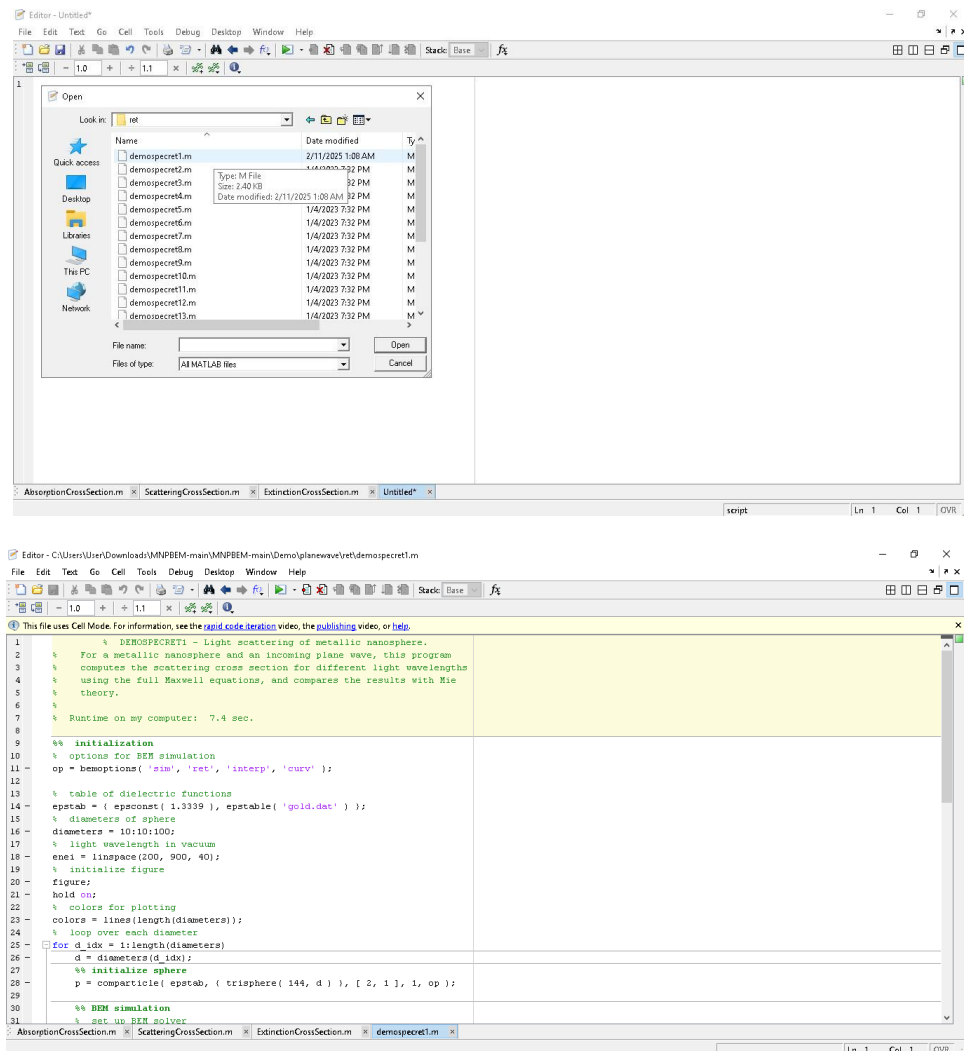
2. Mengeskrak file ZIP tersebut
3. Meng-*install toolbox* tersebut pada aplikasi MATLAB melalui *common window* menggunakan *script* berikut:

```
% Masuk ke folder tempat penyimpanan toolbox
cd('C:\Users\ZaraAzariaSuyuti\Downloads\MNPBEM-
main')

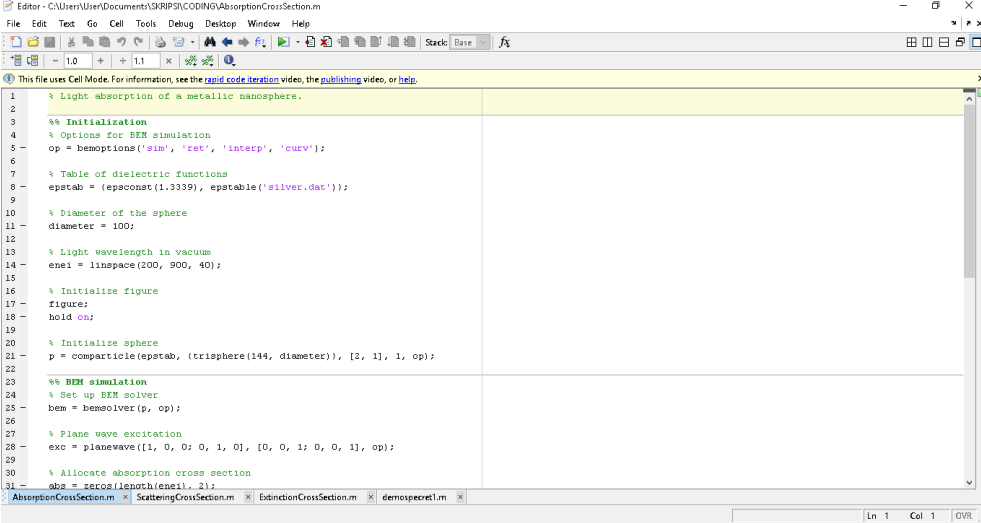
% Tambahkan semua subfolder ke path
addpath(genpath(pwd))

% Simpan path agar tetap ada setelah restart
savepath
```

4. Membuka *script* “demospecret1” pada folder MNPBEM-main



5. Memodifikasi *script* tersebut sesuai dengan simulasi yang dibutuhkan

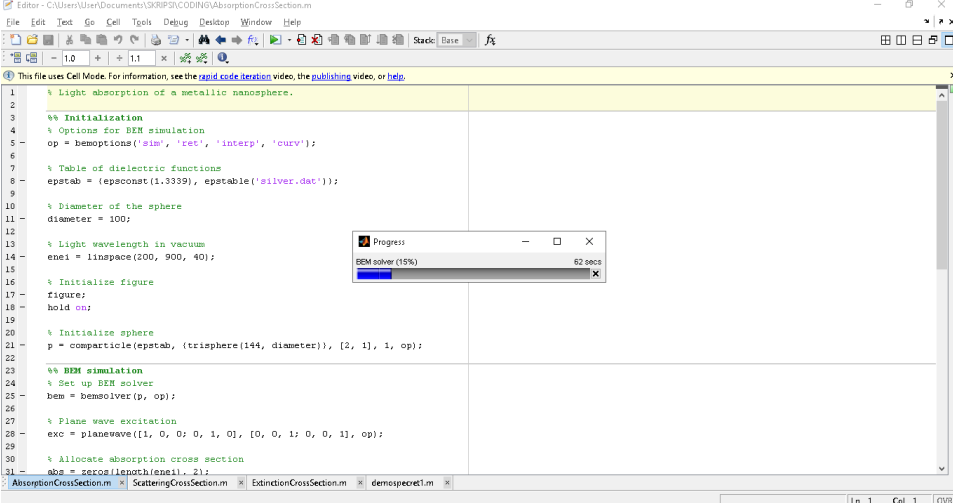


```

1 % Light absorption of a metallic nanosphere.
2
3 %% Initialization
4 % Options for BEM simulation
5 op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
6
7 % Table of dielectric functions
8 eptab = (epaconat(1.3339), eptable('silver.dat'));
9
10 % Diameter of the sphere
11 diameter = 100;
12
13 % Light wavelength in vacuum
14 enei = linspace(200, 900, 40);
15
16 % Initialize figure
17 figure;
18 hold on;
19
20 % Initialize sphere
21 p = comparticle(eptab, (trisphere(144, diameter)), [2, 1], 1, op);
22
23 %% BEM simulation
24 % Set up BEM solver
25 bem = bemsolver(p, op);
26
27 % Plane wave excitation
28 exc = planewave([1, 0, 0; 0, 1, 0], [0, 0, 1; 0, 0, 1], op);
29
30 % Allocate absorption cross section
31 abs = zeros(length(enei), 2);

```

6. Menjalankan program



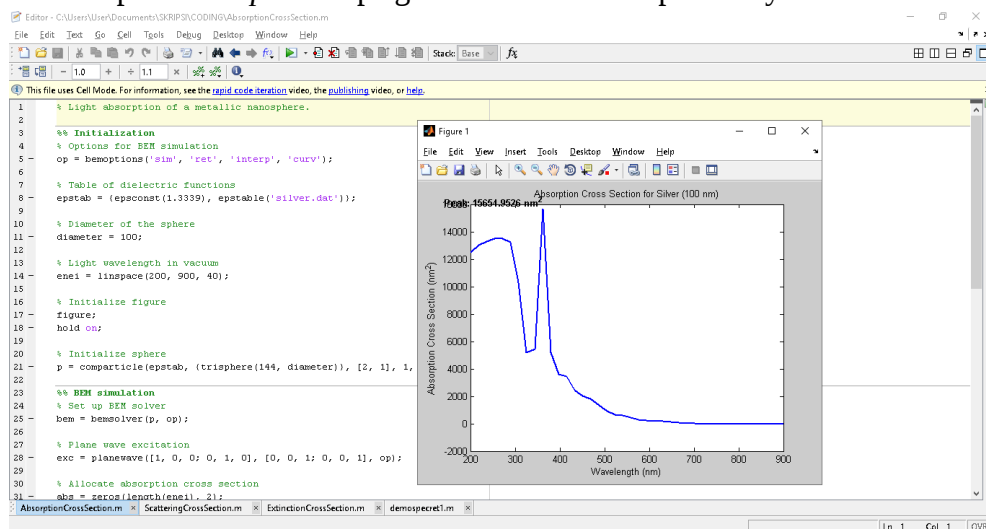
```

1 % Light absorption of a metallic nanosphere.
2
3 %% Initialization
4 % Options for BEM simulation
5 op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
6
7 % Table of dielectric functions
8 eptab = (epaconat(1.3339), eptable('silver.dat'));
9
10 % Diameter of the sphere
11 diameter = 100;
12
13 % Light wavelength in vacuum
14 enei = linspace(200, 900, 40);
15
16 % Initialize figure
17 figure;
18 hold on;
19
20 % Initialize sphere
21 p = comparticle(eptab, (trisphere(144, diameter)), [2, 1], 1, op);
22
23 %% BEM simulation
24 % Set up BEM solver
25 bem = bemsolver(p, op);
26
27 % Plane wave excitation
28 exc = planewave([1, 0, 0; 0, 1, 0], [0, 0, 1; 0, 0, 1], op);
29
30 % Allocate absorption cross section
31 abs = zeros(length(enei), 2);

```

Progress
BEM solver (15%)
82 secs

7. Mendapatkan *output* berupa grafik dan data nilai puncaknya



8. Mencatat data untuk analisis lebih lanjut

Source Code Simulasi

1. Demo simulasi “*spectret1*” sebelum dimodifikasi

```
% DEMOSPECTET1 - Light scattering of metallic nanosphere.
% For a metallic nanosphere and an incoming plane wave,
this program
% computes the scattering cross section for different
light wavelengths
% using the full Maxwell equations, and compares the
results with Mie
% theory.
% Runtime on my computer: 7.4 sec.
%% initialization
% options for BEM simulation
op = bemoptions( 'sim', 'ret', 'interp', 'curv' );
% table of dielectric functions
epstab = { epsconst( 1.3335 ), epstable( 'silver.dat' ) };
% diameter of sphere
diameter = 90;
% initialize sphere
p = comparticle( epstab, { trisphere( 144, diameter ) }, [ 2,
1 ], 1, op );
%% BEM simulation
% set up BEM solver
bem = bemsolver( p, op );
% plane wave excitation
exc = planewave( [ 1, 0, 0; 0, 1, 0 ], [ 0, 0, 1; 0, 0, 1 ],
op );
% light wavelength in
vacuum enei = linspace(
400, 900, 40 );
```

```

% allocate scattering and extinction cross
sections sca = zeros( length( enei ), 2 );
ext = zeros( length( enei ), 2 );
multiWaitbar( 'BEM solver', 0, 'Color', 'g', 'CanCancel', 'on'
);
% loop over wavelengths
for ien = 1 : length( enei )
    % surface charge
    sig = bem \ exc( p, enei( ien ) );
    % scattering and extinction cross
    sections sca( ien, : ) = exc.sca( sig );
    ext( ien, : ) = exc.ext( sig );
    multiWaitbar( 'BEM solver', ien / numel( enei )
); end
% close waitbar
multiWaitbar(
'CloseAll' );
final plot
plot( enei, sca, 'o-' ); hold on;
xlabel( 'Wavelength (nm)' );
ylabel( 'Scattering cross section (nm^2)' );
%% comparison with Mie theory
mie = miesolver( epstab{ 2 }, epstab{ 1 }, diameter, op
); plot( enei, mie.sca( enei ), '--' ); hold on
legend( 'BEM : x-polarization', 'BEM : y-polarization',
'Mie theory' );

```

2. Contoh source code extinction cross section untuk simulasi sensitivitas

```

% Light extinction of a metallic nanosphere.
%% Initialization
% Options for BEM simulation
op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
% Table of dielectric functions
epstab = {epsconst(1.3339), epstable('gold.dat')};
% Diameters of sphere
diameters = 10:10:100;
% Light wavelength in
vacuum      enei      =
linspace(200, 900, 40);
% Initialize figure
figure; hold on;
% Colors for plotting
colors = lines(length(diameters));
% Loop over each diameter
for d_idx =
    1:length(diameters) d
    = diameters(d_idx);
    %% Initialize sphere
    p = comparticle(epstab, {trisphere(144, d)}, [2, 1], 1,
op);
    %% BEM simulation
    bem = bemsolver(p, op);
    exc = planewave([1, 0, 0; 0, 1, 0], [0, 0, 1; 0, 0, 1],
op); ext = zeros(length(enei), 2);
    multiWaitbar('BEM solver', 0, 'Color', 'g',
'CanCancel', 'on');

```

```

%      Loop      over
wavelengths      for
ien              =
1:length(enei)
    % Surface charge
    sig = bem \ exc(p, enei(ien));
    % Extinction cross section
    ext(ien, :) = exc.ext(sig);
    multiWaitbar('BEM solver', ien / numel(enei));
end
%      Close      waitbar
multiWaitbar('CloseAll');
%% Find peak values
[peak_value, peak_index] = max(ext(:, 1)); % Find maximum
for x-polarization
peak_wavelength = enei(peak_index)
% Display peak values in Command Window with 4 decimal places
fprintf('Diameter: %d nm, Peak Wavelength: %.4f nm, Peak Value:
%.4f nm^2\n', ...
        diameter, peak_wavelength, peak_value);
%% Plot results
plot(enei, ext(:, 1), 'b-', 'LineWidth', 1.5);
% Add peak value annotation to the plot with improved
positioning and font size
text(peak_wavelength, peak_value, sprintf('Peak: %.4f nm^2',
peak_value), ...
     'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment',
'right', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
title('extttering Cross Section for Silver (100 nm)');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('extttering Cross Section
(nm^2)'); hold off;
end
%% Final plot customization
title('Extinction Cross Section for Various Diameters');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Extinction cross section (nm^2)');
legend('show');
hold off;

```

3. Contoh source code absorption cross section untuk simulasi karakteristik

```

% Light absorption of a metallic nanosphere.
%% Initialization
% Options for BEM simulation
op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
% Table of dielectric functions
epstab = {epsconst(1.3339), epstable('silver.dat')};
% Diameter of the
sphere diameter = 100;
Light wavelength in vacuum
enei = linspace(200, 900,
1000);
% Initialize figure
figure;
hold on;
% Initialize sphere

```

```

p = comparticle(epstab, {trisphere(144, diameter)}, [2, 1],
1, op);
%% BEM simulation
% Set up BEM solver
bem = bemsolver(p, op);
% Plane wave excitation
exc = planewave([1, 0, 0; 0, 1, 0], [0, 0, 1; 0, 0, 1], op);
% Allocate absorption cross
section      abs      =
zeros(length(enei), 2);
multiWaitbar('BEM solver', 0, 'Color', 'b', 'CanCancel', 'on');
%      Loop      over
wavelengths for ien
= 1:length(enei)
    % Surface charge
    sig = bem \ exc(p, enei(ien));
    % Absorption cross
    section abs(ien, :) =
    exc.abs(sig);
    multiWaitbar('BEM solver', ien / numel(enei));
end
%      Close      waitbar
multiWaitbar('CloseAll
');
%% Find peak values
[peak_value, peak_index] = max(abs(:, 1)); % Find maximum
for x-polarization
peak_wavelength = enei(peak_index);
% Display peak values in Command Window with 4 decimal places
fprintf('Diameter: %d nm, Peak Wavelength: %.4f nm, Peak Value:
%.4f nm^2\n', ...
    diameter, peak_wavelength, peak_value);
%% Plot results
plot(enei, abs(:, 1), 'b-', 'LineWidth', 1.5);
% Add peak value annotation to the plot with improved
positioning and font size
text(peak_wavelength, peak_value, sprintf('Peak: %.4f nm^2',
peak_value), ...
    'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment',
    'right', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
title('Absorption Cross Section for Silver (100 nm)');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('Absorption Cross Section
(nm^2)'); hold off;

```

4. Contoh source code scattering cross section untuk simulasi karakteristik

```

% Light scattering of a metallic nanosphere.
%% Initialization
% Options for BEM simulation
op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
% Table of dielectric functions
epstab = {epsconst(1.3339), epstable('silver.dat')};
% Diameter of the
sphere diameter = 100;
% Light wavelength in
vacuum      enei      =
linspace(200, 900, 40);

```

```

% Initialize figure
figure;
hold on;
% Initialize sphere
p = comparticle(epstab, {trisphere(144, diameter)}, [2, 1],
1, op);
%% BEM simulation
% Set up BEM solver
bem = bemsolver(p, op);
% Plane wave excitation
exc = planewave([1, 0, 0; 0, 1, 0], [0, 0, 1; 0, 0, 1], op);
% Allocate scattering cross
section sca =
zeros(length(enei), 2);
multiWaitbar('BEM solver', 0, 'Color', 'b', 'CanCancel', 'on');
% Loop over
wavelengths for ien
= 1:length(enei)
    % Surface charge
    sig = bem \ exc(p, enei(ien));
    % scattering cross
    section sca(ien, :) =
    exc.sca(sig);
    multiWaitbar('BEM solver', ien / numel(enei));
end
% Close waitbar
multiWaitbar('CloseAll');
%% Find peak values
[peak_value, peak_index] = max(sca(:, 1)); % Find maximum
for x-polarization
peak_wavelength = enei(peak_index);
% Display peak values in Command Window with 4 decimal places
fprintf('Diameter: %d nm, Peak Wavelength: %.4f nm, Peak Value:
%.4f nm^2\n', ...
    diameter, peak_wavelength, peak_value);
%% Plot results
plot(enei, sca(:, 1), 'b-', 'LineWidth', 1.5);
% Add peak value annotation to the plot with improved
positioning and font size
text(peak_wavelength, peak_value, sprintf('Peak: %.4f nm^2',
peak_value), ...
    'VerticalAlignment', 'bottom', 'HorizontalAlignment',
    'right', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold');
title('scattering Cross Section for Silver (100 nm)');
xlabel('Wavelength (nm)');
ylabel('scattering Cross Section
(nm^2)'); hold off;

```



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341) 551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 220604110007
Nama : INA LUTFIANAH
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si
Dosen Pembimbing 2 : AHMAD LUTHFIN, M.Si
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : Simulasi Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) pada Nanopartikel Logam Cu, Aku, dan Ag (sphere, triangle, rod) untuk Sensor Glukosa pada Urine dengan MATLAB

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	15 Oktober 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Pengajuan judul dan bimbingan bab 1	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
2	15 November 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan bab 2	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
3	17 Desember 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan bab 3	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
4	28 Januari 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Seminar proposal	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	05 Februari 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan revisi seminar proposal	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
6	12 Maret 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan revisi penulisan seminar proposal	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
7	22 April 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan bab 4	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
8	07 Mei 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan bab 4	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
9	20 Mei 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Komprehensif	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
10	22 Mei 2026	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Bimbingan bab 1 untuk penambahan ayat dan bab 2 pembenaran ayat dan dalil	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
11	03 Juni 2026	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si	Bimbingan bab 4	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

AHMAD LUTHFIN, M.Si

Malang, _____

Dosen Pembimbing 1

WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si

Kajur / Kaprodi,