

**DETEKSI GELATIN SAPI DAN BABI DENGAN NANOSPHERE Au
(EMAS) DAN Ag (PERAK) BERBASIS LOCALIZED SURFACE PLASMON
RESONANCE (LSPR) MENGGUNAKAN METALLIC NANOPARTICLES
BOUNDARY ELEMENT METHOD (MNPBEM)**

SKRIPSI

Oleh:

ZARA AZARIA SUYUTI
NIM. 210604110071



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**DETEKSI GELATIN SAPI DAN BABI DENGAN *NANOSPHERE* Au
(EMAS) DAN Ag (PERAK) BERBASIS *LOCALIZED SURFACE PLASMON
RESONANCE* (LSPR) MENGGUNAKAN *METALLIC NANOPARTICLES
BOUNDARY ELEMENT METHOD* (MNPBEM)**

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:

**ZARA AZARIA SUYUTI
NIM. 210604110071**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

DETEKSI GELATIN SAPI DAN BABI DENGAN *NANOSPHERE* Au (EMAS)
DAN Ag (PERAK) BERBASIS *LOCALIZED SURFACE PLASMON*
RESONANCE (LSPR) MENGGUNAKAN *METALLIC NANOPARTICLES*
BOUNDARY ELEMENT METHOD (MNPBEM)

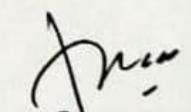
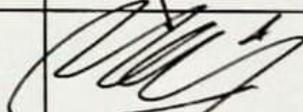
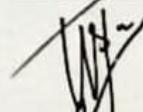
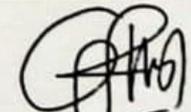
SKRIPSI

Oleh:

ZARA AZARIA SUYUTI

NIM. 210604110071

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal 20 Maret 2025

| | | |
|--------------------|---|---|
| Penguji Utama | : Farid Samsu Hananto, S.Si, M.T. NIP. 19740513 200312 1 001 |  |
| Ketua Penguji | : Rusli, M.Si. NIP. 19880715 202012 1 003 |  |
| Sekretaris Penguji | : Wiwis Sasmitaninghidayah M.Si. NIP. 19870215 2023 212 031 |  |
| Anggota Penguji | : Dr. Erna Hastuti, M.Si. NIP. 19811119 200801 2 009 |  |

Mengetahui,
Ketua Program Studi


Dr. Imam Tazi, M.Si

NIP. 19740730 200312 1 002

HALAMAN PENGESAHAN

DETEKSI GELATIN SAPI DAN BABI DENGAN *NANOSPHERE Au (EMAS)*
DAN *Ag (PERAK)* BERBASIS *LOCALIZED SURFACE PLASMON*
RESONANCE (LSPR) MENGGUNAKAN *METALLIC NANOPARTICLES*
BOUNDARY ELEMENT METHOD (MNPBEM)

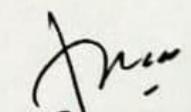
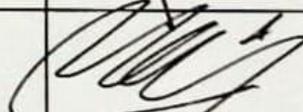
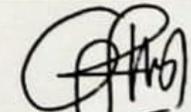
SKRIPSI

Oleh:

ZARA AZARIA SUYUTI

NIM. 210604110071

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal 20 Maret 2025

| | | |
|--------------------|---|---|
| Penguji Utama | : Farid Samsu Hananto, S.Si, M.T. NIP. 19740513 200312 1 001 |  |
| Ketua Penguji | : Rusli, M.Si. NIP. 19880715 202012 1 003 |  |
| Sekretaris Penguji | : Wiwis Sasmitaninghidayah M.Si. NIP. 19870215 2023 212 031 |  |
| Anggota Penguji | : Dr. Erna Hastuti, M.Si. NIP. 19811119 200801 2 009 |  |

Mengetahui,
Ketua Program Studi


Dr. Imgn Tazi, M.Si

NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ZARA AZARIA SUYUTI

NIM : 210604110071

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Deteksi Gelatin Sapi dan Babi dengan *Nanosphere Au* (Emas) dan Ag (Perak) Berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) Menggunakan *Metallic Nanoparticles Boundary Element Method* (MNPBEM)

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 serta disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggungjawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 5 Maret 2025
Yang Membuat Pernyataan



Zara Azaria Suyuti
NIM. 210604110071

MOTTO

"Start where you are, do what you can. Perfection isn't the goal—progress is."

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur hanya milik Allah *Subhanahu wa Ta'ala*, yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta kekuatan dalam setiap langkah hingga skripsi ini dapat terselesaikan. Sholawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam*, sang suri teladan bagi seluruh umat manusia.

Skripsi ini penulis persembahkan dengan penuh rasa hormat dan terima kasih kepada:

1. Orang tua tercinta, yang dengan kasih sayang, doa, serta pengorbanannya selalu menjadi alasan terbesar di setiap usaha dalam proses yang dilalui.
2. Keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, serta doa yang tulus dalam setiap proses.
3. Segenap dosen Fisika yang dengan kesabaran dan keikhlasan telah memberikan ilmu, bimbingan, serta arahan.
4. Sahabat dan teman seperjuangan, yang selalu ada, menjadi tempat berbagi cerita, saling mendukung, dan menguatkan dalam setiap tantangan akademik.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala*, yang telah memberikan rahmat, hidayah, dan kekuatan, sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam*, yang telah menjadi teladan hidup bagi umat manusia.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Program Studi Fisika. Proses penyusunan skripsi ini tidak mudah, penuh dengan tantangan, revisi, serta usaha yang menguras waktu dan tenaga. Namun, penulis sangat bersyukur karena banyak memperoleh dukungan, bimbingan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah *Subhanahu wa Ta'ala*, yang telah memberikan kekuatan, kesempatan, dan kemampuan dalam menyelesaikan tugas ini.
2. Bapak Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA. selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Ibu Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Ibu Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si. selaku dosen wali sekaligus dosen pembimbing yang telah banyak mengarahkan serta memberi motivasi sejak

- semester 1. Terimakasih karena telah memberikan peran ibu di lingkungan perkuliahan.
6. Ibu Dr. Erna Hastuti, M.Si. selaku dosen pembimbing integrasi yang telah membimbing penulis dalam banyak hal, tidak terbatas perihal materi integrasi saja. Terimakasih karena penulis telah mendapat banyak ilmu dan bekal untuk jenjang selanjutnya.
 7. Bapak Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T. dan Bapak Rusli, M.Si. selaku dosen penguji, serta Bapak Dr. Eng. Wildan Panji Tresna, M.T. Terimakasih untuk setiap saran yang telah diberikan, sehingga skripsi ini dapat disusun dengan baik.
 8. Bapak Dr. H. Agus Mulyono, M.Kes. dan Ibu dr. Avin Ainur Fitriyaningsih yang telah memberikan banyak bimbingan terkait tugas akhir, serta segenap dosen, laboran, dan admin Program Studi Fisika yang telah memberikan wawasan yang berguna sebagai modal dan bekal bagi penulis.
 9. Kedua orang tua penulis, Ayah Muchamad Suyuti dan Ibu Mutmainnah, yang telah memberikan dukungan moral, materi, dan doa yang tak terhingga. Segala pencapaian penulis tidak luput dari doa tersebut. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dapat dibanggakan.
 10. Kakak penulis, Baitul Rochmah Elmaila Suyuti, dan adik penulis, Ahsan Zayyan Suyuti, serta keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan penuh dalam setiap proses.
 11. Rekan riset penulis, Aprilina Eka Sari, Renita Elok Pebriyanti, Khairut Tamimi, dan Akiful Khoir yang telah membantu penulis dalam mempelajari segala hal yang berkaitan dengan penelitian penulis.

12. Sahabat penulis, Amelya Tanjung Risgunawati, Ratna Rahayu, Dewi Putri Silvia Wahyuni, Naila Putri Yuaninda, Adelia Farah Kamila, Jihan Halilatus Sakinah, Ilma Nur Faida, Faiqotur Rizqiyah, dan Ersya Helena yang senantiasa menjadi tempat bertukar cerita serta memberikan energi positif di setiap keadaan. Terimakasih karena telah meringankan beban penulis di masa penyusunan skripsi ini.
13. Teman-teman KKM Desa Tumpukrenteng terutama kelompok 180 “Anandita Nawasena” dan Rumah 2 yang telah membantu penulis dalam membentuk karakter yang lebih baik, teman-teman bbi mmi yang selalu kebersamai penulis sejak kecil, teman-teman Kost Pak Barizi angkatan 2021 yang kebersamai penulis dalam mengerjakan revisi, adik-adik praktikan Jurusan Fisika, Kimia, dan Fakultas Teknik yang memberikan energi positif dalam masa penelitian, serta teman-teman Jurusan Fisika baik kakak tingkat, satu angkatan, maupun adik tingkat. Terimakasih karena telah kebersamai penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
14. Kucing dan bebek penulis, meskipun tidak selalu hadir secara langsung, tetap membantu dalam melewati proses skripsi ini dengan lebih tenang. Terimakasih karena telah membantu meringankan beban penulis selama masa perkuliahan.
15. Orang-orang yang telah membuat penulis merasa tidak nyaman dalam lingkungan perkuliahan sehingga memotivasi penulis untuk segera menyelesaikan pendidikan dan dapat beralih ke lingkungan baru.
16. Serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah berkontribusi dalam kelancaran dan keberhasilan penelitian ini.

17. Sebagai bagian akhir dari ungkapan terima kasih ini, penulis juga ingin memberikan apresiasi kepada Zara Azaria Suyuti karena telah bersabar dan berusaha keras untuk tidak menyerah. Penulis paham akan semua kendala dan kesulitan yang telah dilalui, serta merasa sangat bangga dan akan terus mendukung segala keputusan yang ingin diambil.

Malang, 5 Februari 2025
Penulis,

Zara Azaria Suyuti

DAFTAR ISI

| | |
|--|--------------|
| COVER | i |
| HALAMAN JUDUL | ii |
| HALAMAN PERSETUJUAN | iii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iv |
| PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN | v |
| MOTTO | vi |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | vii |
| KATA PENGANTAR | viii |
| DAFTAR ISI | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xviii |
| ABSTRAK | xix |
| ABSTRACT | xx |
| مستخلص البحث..... | xxi |

BAB I PENDAHULUAN

| | |
|------------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 4 |
| 1.3 Tujuan..... | 4 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 5 |
| 1.5 Batasan Penelitian..... | 5 |

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

| | |
|--|----|
| 2.1 Gelatin | 6 |
| 2.1.1 Sifat Fisik-Kimia Gelatin | 7 |
| 2.1.2 Struktur Kimia Gelatin | 8 |
| 2.1.3 Karakteristik Gelatin Sapi | 10 |
| 2.1.4 Karakteristik Gelatin Babi..... | 11 |
| 2.2 Nanopartikel..... | 11 |
| 2.2.1 Nanopartikel Emas | 12 |
| 2.2.2 Nanopartikel Perak | 14 |
| 2.2.3 Interaksi Nanopartikel dengan Biomolekul | 15 |
| 2.2.4 <i>Nanosphere</i> Logam | 17 |

| | |
|--|----|
| 2.2.5 Nanopartikel dalam Tinjauan Al-Qur'an | 18 |
| 2.3 <i>Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)</i> | 19 |
| 2.3.1 Teori Mawxell..... | 25 |
| 2.3.2 Teori Drude Elektron..... | 37 |
| 2.3.3 Mie Theory..... | 45 |
| 2.3.4 Aplikasi LSPR dalam Biosensor | 46 |
| 2.3.5 Refraktometer..... | 47 |
| 2.4 <i>Metallic Nanoparticles Boundary Element Method (MNPBEM)</i> | 48 |
| 2.4.1 <i>Boundary Element Method (BEM)</i> | 48 |
| 2.4.2 MNPBEM | 49 |

BAB III METODE PENELITIAN

| | |
|---------------------------------------|----|
| 3.1 Jenis Penelitian..... | 56 |
| 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian | 56 |
| 3.3 Alat dan Bahan..... | 56 |
| 3.3.1 Alat..... | 56 |
| 3.3.2 Bahan | 57 |
| 3.4 Diagram Alir Penelitian | 58 |
| 3.5 Prosedur Penelitian..... | 59 |
| 3.5.1 Pengumpulan Data | 59 |
| 3.5.2 Pengukuran Indeks Bias | 60 |
| 3.5.3 Simulasi..... | 60 |
| 3.6 Pengambilan Data | 61 |
| 3.7 Analisis Data | 64 |

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

| | |
|--|----|
| 4.1 Pengujian Indeks Bias | 65 |
| 4.1.1 Pengukuran Konsentrasi Gelatin | 66 |
| 4.1.2 Pengukuran Indeks Bias | 67 |
| 4.2 Komparasi Hasil Simulasi dengan Perhitungan Analitik <i>Mie Theory</i> | 71 |
| 4.3 Pengujian Sensitivitas <i>Nanosphere</i> Emas dan Perak | 74 |
| 4.4 Pengujian Karakteristik <i>Absorption Cross Section</i> dan <i>Scattering Cross Section</i> .. | 85 |
| 4.4.1 Pengujian Karakteristik <i>Absorption Cross Section</i> | 85 |
| 4.4.2 Pengujian Karakteristik <i>Scattering Cross Section</i> | 90 |
| 4.4.3 Perbandingan Karakteristik <i>Absorption Cross Section</i> dan <i>Scattering Cross Section</i> Gelatin Sapi dan Babi | 95 |
| 4.5 Pembahasan..... | 97 |
| 4.5.1 Pengujian Indeks Bias Gelatin..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| 4.5.2 Pengujian Sensitivitas <i>Nanosphere</i> Emas dan Perak | 98 |
| 4.5.2 Pengujian Karakteristik <i>Absorption Cross Section</i> dan <i>Scattering Cross Section</i> | 101 |
| 4.6 Integrasi Penelitian dengan Al-Qur'an | 102 |
| BAB V PENUTUP | |
| 5.1 Kesimpulan | 106 |
| 5.2 Saran | 107 |
| DAFTAR PUSTAKA | 109 |
| LAMPIRAN | 116 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Representasi umum dari asam amino (Aji, 2024) | 8 |
| Gambar 2.2 | Konjugasi AuNP dan AgNP dengan biomolekul (biokonjugat) melalui interaksi elektrostatis dan kovalen (Fazrin, 2020) | 16 |
| Gambar 2.3 | (a) dan (b) menunjukkan The Lycurgus Cup, artefak Romawi abad ke-4 yang menunjukkan perubahan warna akibat interaksi cahaya dengan nanopartikel emas dan perak dalam kaca dikroik. (c) menunjukkan larutan emas koloid dari eksperimen Michael Faraday, yang menunjukkan warna merah khas akibat efek plasmonik dari nanopartikel emas (Locarno & Brinks, 2023) | 21 |
| Gambar 2.4 | Representasi <i>Localized Surface Plasmon</i> (LSP) pada nanopartikel dan peristiwa pengikatan nanopartikel dalam spektrum absorpsi (Aji, 2024) | 24 |
| Gambar 2.5 | Gelombang radiasi elektromagnetik yang merambat secara transversal di ruang dan waktu terdiri dari vektor medan listrik (E) dan medan magnet (H) yang saling tegak lurus satu sama lain (Shrestha & Shrestha, 2023)..... | 26 |
| Gambar 2.6 | Ilustrasi Teori Drude Elektron (Djuhana, 2020)..... | 38 |
| Gambar 2.7 | Bagan alir untuk simulasi BEM yang umum..... | 50 |
| Gambar 2.8 | 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 (pada file demo demofieldstat.m untuk detailnya), menggunakan eksitasi gelombang bidang terhadap nanopartikel emas dengan diameter 10 nm yang terbenam dalam air | 51 |
| Gambar 2.9 | Diskritisasi berbagai bentuk nanopartikel yang ada pada MNPBEM toolbox..... | 53 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir pengukuran indeks bias | 58 |
| Gambar 3.2 | Diagram alir simulasi..... | 59 |
| Gambar 4.1 | Hasil simulasi <i>extinction cross section</i> pada nanopartikel emas diameter 10 nm di medium udara (a) Mie Theory, b.) Mie Theory Vs BEM solver menggunakan 144 <i>vertices</i> , c.) Mie Theory Vs BEM solver menggunakan 256 <i>vertices</i> , dan d.) Mie Theory Vs BEM solver menggunakan 576 <i>vertices</i> | 72 |
| Gambar 4.2 | Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin sapi dengan konsentrasi 0,80% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak | 75 |
| Gambar 4.3 | Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin sapi dengan konsentrasi 2,00% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak | 76 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Gambar 4.4 | Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin babi dengan konsentrasi 0,80% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak | 77 |
| Gambar 4.5 | Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin babi dengan konsentrasi 2,00% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak | 77 |
| Gambar 4.6 | Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi udara pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak | 78 |
| Gambar 4.7 | Plot grafik <i>absorption cross section</i> hasil simulasi LSPR dari gelatin sapi dengan konsentrasi v(a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00% | 87 |
| Gambar 4.8 | Plot grafik <i>absorption cross section</i> hasil simulasi LSPR dari gelatin babi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00% | 90 |
| Gambar 4.9 | Plot grafik <i>scattering cross section</i> hasil simulasi LSPR dari gelatin sapi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00% | 92 |
| Gambar 4.10 | Plot grafik <i>scattering cross section</i> hasil simulasi LSPR dari gelatin babi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00% | 95 |
| Gambar 4.11 | Grafik perbandingan karakteristik <i>absorption cross section</i> antara gelatin sapi dan babi | 96 |
| Gambar 4.12 | Grafik perbandingan karakteristik <i>scattering cross section</i> antara gelatin sapi dan babi | 96 |
| Gambar 4.13 | Ilustrasi efek ketika ukuran nanopartikel semakin besar, maka gaya coloumb pada distribusi positif-negatif melemah (Khoir, 2024)..... | 99 |
| Gambar 4.14 | Ilustrasi efek ukuran pada nanopartikel, a) ukuran partikel sangat kecil sehingga dianggap dipol, b) ukuran nanopartikel lebih besar sehingga efek retardasi diperhitungkan, dan c) ketika ukuran partikel lebih besar hingga muncul efek multipol (Khoir, 2024)..... | 100 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabel 2.1 | Komposisi asam amino gelatin sapi dan babi | 9 |
| Tabel 3.1 | Tabel untuk nilai indeks bias pada tiap jenis dan konsentrasi gelatin | 61 |
| Tabel 3.2 | Tabel untuk nilai λ resonansi pada simulasi <i>extinction</i> dengan variasi jenis dan ukuran <i>nanosphere</i> | 63 |
| Tabel 3.3 | Tabel untuk nilai <i>scattering cross section</i> dan <i>absorption cross section</i> pada tiap jenis dan konsentrasi gelatin | 64 |
| Tabel 4.1 | Proporsi gelatin dan aquades pada berbagai konsentrasi | 67 |
| Tabel 4.2 | Data hasil pengukuran indeks bias gelatin sapi dan babi pada tiap konsentrasi | 69 |
| Tabel 4.3 | Nilai rata-rata indeks bias gelatin sapi dan babi..... | 70 |
| Tabel 4.4 | Komparasi Mie Theory dengan BEM solver pada MNPBEM <i>toolbox</i> | 73 |
| Tabel 4.5 | Nilai sensitivitas <i>nanosphere</i> berdasarkan pergeseran λ LSPR pada gelatin sapi dengan konsentrasi 0,80% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran.... | 80 |
| Tabel 4.6 | Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ LSPR pada gelatin sapi dengan konsentrasi 2,00% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran.... | 81 |
| Tabel 4.7 | Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ LSPR pada gelatin babi dengan konsentrasi 0,80% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran ... | 82 |
| Tabel 4.8 | Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ LSPR pada gelatin babi dengan konsentrasi 2,00% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran ... | 83 |
| Tabel 4.9 | Nilai puncak <i>cross section</i> gelatin sapi dan babi pada tiap konsentrasi | 95 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----|
| Lampiran 1 Langkah Simulasi LSPR | 117 |
| Lampiran 2 <i>Source Code</i> Simulasi | 120 |
| Lampiran 3 Dokumentasi Penelitian | 126 |
| Lampiran 4 Bukti Konsultasi Skripsi | 133 |

ABSTRAK

Suyuti, Zara Azaria. 2025. **Deteksi Gelatin Sapi dan Babi dengan Nanosphere Au (Emas) dan Ag (Perak) Berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* Menggunakan *Metallic Nanoparticles Boundary Element Method (MNPBEM)***. Skripsi. Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Wiwis Sasmitannihidayah, M.Si (II) Dr. Erna Hastuti, M.Si

Kata Kunci: Gelatin, *Nanosphere* Emas dan Perak, LSPR, MNPBEM.

Gelatin banyak digunakan dalam produk makanan dan berasal dari hewan seperti sapi dan babi, yang mana babi diharamkan dalam Islam. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode deteksi halal-haram gelatin menggunakan sensor berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* dengan menganalisis perbedaan karakteristik optik antara gelatin sapi dan babi. Metode yang digunakan mencakup eksperimen dan komputasi, di mana eksperimen dilakukan dengan menguji indeks bias larutan gelatin sapi dan babi, sementara simulasi dilakukan menggunakan MNPBEM *toolbox* untuk menganalisis pergeseran panjang gelombang resonansi. Sebelum pengujian utama, dilakukan optimasi untuk menentukan material yang paling sensitif terhadap perubahan optik pada gelatin. Hasil menunjukkan bahwa perak (Ag) berukuran 100 nm adalah yang paling sensitif, serta terdapat perbedaan signifikan dalam karakteristik *absorption cross-section* dan *scattering cross-section* antara gelatin sapi dan babi. Kesimpulannya, sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM *toolbox* secara numerik telah dapat membedakan karakteristik optis gelatin sapi dan babi, sehingga menjadi solusi dalam menentukan kehalalan suatu produk berbasis gelatin.

ABSTRACT

Suyuti, Zara Azaria. 2025. **The Detection of Bovine and Porcine Gelatine Using Au (Gold) and Ag (Silver) Nanospheres Based on Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) Using Metallic Nanoparticles Boundary Element Method (MNPBEM)**. Thesis. Physics Department, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: (I) Wiwis Sasmitannighidayah, M.Si (II) Dr. Erna Hastuti, M.Si

Keywords: Gelatine, Gold and Silver Nanosphere, LSPR, MNPBEM.

Gelatine is often used in food products. It is derived from animals, such as cows and pigs, which are forbidden in Islam. This research aims to develop halal and haram detection methods using a Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)-based sensor by analyzing the optical characteristic differences between bovine and porcine gelatines. The method includes both experiments and computation. The experiment tests the refractive index of bovine and porcine gelatine solutions. The simulation employs the MNPBEM toolbox to analyze the resonance wavelength shift. Before the main testing, the researcher optimizes the process to determine the most sensitive material for gelatine optical changes. The results indicate that a 100 nm silver (Ag) is the most sensitive. Additionally, the study identifies significant differences in absorption and scattering cross-sections between bovine and porcine gelatines. The research concludes that an LSPR-based sensor using the MNPBEM toolbox can numerically differentiate the optical characteristics of bovine and porcine gelatine. Therefore, it can help determine whether a gelatine-based product is halal.

مستخلص البحث

سيوطي، زارا أزاريا. 2025. الكشف عن الجيلتين البقري والخنزيري باستخدام الكريات النانوية **Au** (الذهب) و **Ag** (الفضة) بناء على الرنين البلازموني السطحي الموضعي (**LSPR**) باستخدام طريقة العنصر الحدودي للجسيمات النانوية المعدنية (**MNPBEM**). البحث الجامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: ويويس ساسميتانينج هداية، الماجستير. المشرف الثاني: د. إرنا هاستوتي، الماجستير.

الكلمات الرئيسية: جيلتين، كريات نانوية، ذهب فضة، **LSPR**، **MNPBEM**.

استخدم الجيلتين على نطاق واسع في المنتجات الغذائية ويأتي من مثل الأبقار والخنازير، والتي يحظر الإسلام الخنازير. هدف هذا البحث إلى تطوير طريقة للكشف عن الجيلتين الحلال-الحرام باستخدام جهاز استشعار يعتمد على رنين البلازمون السطحي الموضعي (**LSPR**) من خلال تحليل الاختلاف في الخصائص البصرية بين الجيلتين البقري والخنازير. تضمنت الطرق المستخدمة تجارب وحسابات، حيث تم إجراء التجارب عن طريق اختبار معامل الانكسار لمحلول جيلتين البقر والخنازير، بينما تم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام صندوق أدوات **MNPBEM** لتحليل تحول الطول الموجي للرنين. قبل الاختبار الرئيسي، تم إجراء التحسين لتحديد المادة الأكثر حساسية للتغيرات البصرية في الجيلتين. أظهرت النتائج أن الفضة (**Ag**) التي يبلغ مقدارها 100 نانومتر كانت الأكثر حساسية، وكانت هناك اختلافات معنوية في خصائص المقطع العرضي للامتصاص والمقطع العرضي للاستطارة بين الجيلتين البقري والخنزيري. في الختام، تمكنت أجهزة الاستشعار القائمة على **LSPR** باستخدام صندوق أدوات **MNPBEM** عددياً من التمييز بين الخصائص البصرية للجيلتين البقري والخنزيري، بحيث يكون حلاً في تحديد حلالية المنتج من الجيلتين.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gelatin merupakan protein yang larut dan bisa bersifat *gelling agent* (bahan pembuat gel) atau sebagai *non gelling agent*, di mana sering digunakan dalam industri makanan, farmasi, dan kosmetik. Sumber gelatin dapat berasal dari hewan yang berbeda, contohnya adalah sapi dan babi (Zilhadia et al, 2018). Perbedaan sumber gelatin ini menimbulkan implikasi dalam aspek kehalalan bagi umat Muslim yang harus memastikan bahwa segala sesuatu yang dikonsumsi tidak berasal dari sumber yang diharamkan, karena gelatin yang berasal dari babi dianggap haram sebagaimana ditegaskan dalam Surah Al-Baqarah ayat 173:

إِنَّمَا حَرَّمَ عَلَيْكُمُ الْمَيْتَةَ وَالدَّمَ وَخَلْمَ الْخِنْزِيرِ وَمَا أُهْلِيَ بِهِ لَعِبْرَ اللَّهِ

Artinya: “Sesungguhnya Allah hanya mengharamkan bagimu bangkai, darah, daging babi, dan (daging hewan) yang disembelih dengan (menyebut nama) selain Allah.” (QS. Al-Baqarah (2): 173).

Menurut Tafsir Al-Mishbah, Quraish Shihab menegaskan bahwa ayat ini mengharamkan dengan tegas empat jenis makanan, yaitu bangkai, darah, daging babi, dan daging hewan yang disembelih dengan menyebut nama selain Allah. Secara bahasa, kata *'lahm al-khinzîr'* mencakup seluruh bagian tubuh babi, bukan hanya dagingnya saja, tetapi juga lemak, tulang, dan kulitnya. Para ulama pun sepakat bahwa semua bagian tubuh babi itu haram dikonsumsi, baik dalam keadaan mentah maupun setelah diproses dalam bentuk lain. Maka, gelatin yang berasal dari babi tidak dapat dikategorikan halal, meskipun telah mengalami perubahan bentuk. Sebaliknya, gelatin yang berasal dari sapi dapat dianggap halal selama proses produksinya sesuai dengan syariat Islam.

Akan tetapi, gelatin sapi dan babi memiliki ciri fisik yang hampir sama, sehingga masyarakat kesulitan untuk mengidentifikasi asal-usulnya. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah teknologi sensor yang dapat mendeteksi perbedaan antara gelatin sapi dan babi dengan lebih akurat, sehingga dapat membantu memastikan kehalalannya.

Penelitian sebelumnya terkait deteksi halal dan haram, telah digunakan beberapa metode analisis. Salah satu metode yang telah digunakan adalah PDK (*Pork Detection Kit*), yang bekerja dengan mendeteksi keberadaan protein babi dalam sampel produk. Hasilnya dapat diperoleh dalam waktu yang singkat (Husni et al., 2017), tetapi proses pengolahan gelatin bisa merusak struktur protein awalnya, sehingga PDK mungkin tidak mendeteksi protein babi yang telah terdenaturasi. Adapun alternatif lain, yaitu PCR (*Polymerase Chain Reaction*), yaitu teknik molekuler yang digunakan untuk memperbanyak fragmen DNA spesifik, memungkinkan deteksi keberadaan DNA babi dalam sampel (Cahyanto & Suryani, 2019). Namun, metode ini juga memiliki kelemahan, yaitu memerlukan peralatan laboratorium khusus dan personel terlatih, yang mungkin tidak tersedia di semua fasilitas. Karena adanya keterbatasan dari metode-metode tersebut, diperlukan pendekatan baru yang lebih akurat, cepat, dan efisien dalam mendeteksi perbedaan antara gelatin sapi dan babi. Salah satu metode yang memiliki potensi besar adalah deteksi berbasis fenomena LSPR.

LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*) memiliki kemampuan untuk mendeteksi interaksi biomolekul secara sensitif karena memanfaatkan nanopartikel pada proses identifikasinya (Flesch et al., 2020). Penggunaan LSPR dalam konteks ini memungkinkan dilakukannya pengujian yang cepat dan akurat dalam

menentukan asal-usul gelatin, apakah dari sumber yang halal atau tidak. Deteksi dengan menggunakan teknologi optis seperti LSPR ini memiliki kelebihan pada sensitivitas yang tinggi sehingga mampu mendeteksi perubahan kecil pada interaksi biomolekul, dan sifat non-invasif yang tidak merusak sampel (Lee et al., 2021). Hal ini menjadikan LSPR sebagai alat yang sangat efektif dalam analisis bahan-bahan kompleks seperti gelatin.

Penelitian sebelumnya, yaitu oleh Flesch et al. (2020). menunjukkan kemampuan LSPR dalam mengidentifikasi perubahan kecil di lingkungan molekuler sekitar nanopartikel emas dengan sensitivitas tinggi. Penelitian ini menekankan dasar penggunaan LSPR untuk aplikasi biosensing. Selanjutnya, perkembangan dalam teknologi biosensor LSPR terus berlanjut. Lee et al. (2021) memperkenalkan sensor LSPR yang meningkatkan sensitivitas deteksi dibandingkan dengan sensor SPR. Teknik ini memanfaatkan nanopartikel untuk meningkatkan lokalisasi medan dan memungkinkan deteksi protein dengan sensitivitas yang lebih tinggi.

Zhang et al. (2023) memperluas aplikasi biosensor berbasis LSPR pada serat optik, menunjukkan kemampuan sensor ini dalam mendeteksi perubahan pada indeks bias yang disebabkan oleh analit yang berbeda. Di sisi lain, Liu et al. (2019) memfokuskan kemajuan dalam biosensor LSPR yang lebih terjangkau dengan penggunaan nanopartikel emas, menggarisbawahi kemampuannya dalam kuantifikasi interaksi biomolekuler dengan biaya yang lebih rendah. Penelitian lebih lanjut oleh Nan et al. (2023) menunjukkan aplikasi spesifik biosensor LSPR dalam mendeteksi kortisol dalam keringat manusia, menggunakan nanopartikel emas untuk deteksi biomolekul spesifik.

Kelima penelitian di atas menunjukkan adanya potensi dari teknologi biosensor LSPR dalam mengidentifikasi biomolekul berupa gelatin. Maka dari itu, penelitian ini akan mengaplikasikan LSPR untuk mengidentifikasi karakteristik optis gelatin sapi dan babi, serta mengevaluasi efektivitas metode ini dalam mendeteksi gelatin.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik optis gelatin sapi dan babi melalui fenomena LSPR menggunakan MNPBEM. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan biosensor yang efektif untuk memastikan kehalalan produk-produk yang menggunakan gelatin sebagai salah satu bahan bakunya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka penelitian ini memiliki rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana sensitivitas *nanosphere* emas dan perak untuk deteksi gelatin dengan sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM?
2. Bagaimana karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* gelatin sapi dan babi dengan sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM?

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini, yaitu untuk:

1. Mengetahui sensitivitas *nanosphere* emas dan perak untuk deteksi gelatin dengan sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM.
2. Mengetahui karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* gelatin sapi dan babi dengan sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Bagi penulis

Memperluas pemahaman tentang biosensor, nanoteknologi, serta fenomena LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*), sekaligus memberikan pengalaman dalam melakukan penelitian menggunakan MNPBEM.

2. Bagi lembaga

Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang ingin mengembangkan penelitian serupa, sehingga memperkaya sumber daya akademik dan ilmiah di bidang biosensor dan nanoteknologi.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk menghindari meluasnya masalah yang akan diteliti, maka perlu adanya batasan masalah, yaitu sebagai berikut:

1. Rentang panjang gelombang yang digunakan yaitu antara 200-900 nm, dengan menggunakan 1000 titik.
2. Pengolahan data dilakukan menggunakan MNPBEM *toolbox* yang terintegrasi dalam aplikasi MATLAB.
3. Medium sebagai lingkungan yang digunakan pada simulasi adalah gelatin sapi dan babi.
4. Variasi konsentrasi gelatin yang digunakan berkisar antara 0,80% hingga 2,00% dengan interval 0,20%.
5. Nanopartikel yang digunakan berupa *nanosphere* emas dan perak.
6. Diameter *nanosphere* yang digunakan sebesar 10-100 nm dengan interval 10 nm.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gelatin

Gelatin berasal dari kata latin "*gelatus*" yang berarti pekat atau kaku merupakan suatu zat yang diperoleh dari hidrolisis parsial, yaitu proses pemecahan sebagian molekul kolagen yang berasal dari kulit, jaringan ikat putih, dan tulang hewan (Puspitaningrum, 2015). Sebagai polimer yang larut air, gelatin memiliki berbagai sifat unik, seperti berfungsi sebagai zat pengental, pembentuk film yang merupakan lapisan tipis untuk melindungi suatu produk, serta pengemulsi, yaitu zat yang dapat mengikat bahan misalnya air dan minyak pada produk seperti mayones. Karena sifat-sifat ini, gelatin digunakan secara luas dalam industri makanan, farmasi, kosmetik, serta aplikasi non-makanan seperti penelitian medis (Zilhadia et al., 2017).

Gelatin dibagi menjadi dua tipe berdasarkan proses pembuatannya. Gelatin tipe A dihasilkan dari kolagen yang diasamkan, umumnya berasal dari kulit babi, sedangkan gelatin tipe B berasal dari kolagen yang dibasakan, biasanya dari kulit sapi (Puspitaningrum, 2015). Menurut data SKW Biosystem INC, gelatin di dunia pada tahun 1999 sebanyak 254.000-ton dihasilkan dari kulit babi (41,4%), kulit sapi (28,7%), tulang sapi (29,8%), serta sisanya dari ikan. Sumber gelatin yang berasal dari mamalia lebih banyak digunakan karena ketinggian titik lebur, yaitu suhu di mana gelatin berubah dari padat menjadi cair ketika dipanaskan; titik gelasi, yaitu suhu di mana gelatin mulai membentuk gel; dan reversibilitas termal, yaitu kemampuan gelatin untuk kembali ke kondisi semula setelah dipanaskan dan

didinginkan (Saputra, 2014).

2.1.1 Sifat Fisik-Kimia Gelatin

Gelatin, yang merupakan turunan dari kolagen, tersedia dalam berbagai bentuk seperti lembaran, kepingan, potongan, atau serbuk, dengan tekstur yang bervariasi dari kasar hingga halus serta warna yang bervariasi dari kuning pucat hingga coklat terang, tergantung pada ukuran partikelnya. Larutan gelatin memiliki aroma ringan mirip kaldu dan stabil dalam kondisi kering, namun mudah rusak oleh mikroba jika berada dalam keadaan lembab atau dalam bentuk larutan. Gelatin tidak larut dalam air dingin tetapi mengembang dan melunak jika direndam, menyerap air hingga 5 sampai 10 kali massanya (Aris et al., 2020). Gelatin larut dalam air panas, asam asetat, dan gliserol, tetapi tidak larut dalam pelarut organik seperti aseton, kloroform, etanol (95%), eter, dan metanol (Youlanda, 2016). Dalam larutan asam atau basa kuat, gelatin akan mengendap karena perubahan struktur molekulnya dipicu oleh perubahan pH. Saat dilarutkan dalam air hangat dan didinginkan di bawah suhu 30°C, gelatin membentuk gel tiksotropik, yaitu gel yang mejadi cair saat diaduk dan kembali menjadi gel saat didiamkan, serta dapat kembali menjadi cair saat dipanaskan. Kekuatan gel gelatin, diukur dengan satuan "bloom," dipengaruhi oleh konsentrasi gelatin dalam air, pH, dan berat molekul gelatin, dengan konsentrasi gelatin yang lebih tinggi menghasilkan gel yang lebih kuat (Aris et al., 2020).

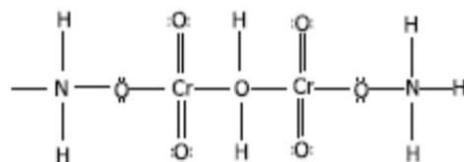
Gelatin bersifat amfoter, yaitu dapat stabil baik dalam asam maupun basa. Dalam larutan asam, gelatin bermuatan positif dan bermigrasi sebagai kation, sedangkan dalam larutan basa, gelatin bermuatan negatif dan bermigrasi sebagai anion. pH isoelektrik, yaitu kondisi ketika muatan positif dan negatif seimbang

sehingga total muatannya sama dengan 0, untuk gelatin tipe A berada dalam rentang antara 4,5 hingga 5,4, sementara untuk tipe B berada dalam rentang antara 4,6 hingga 9. Gelatin kering stabil di udara, sementara larutan gelatin tetap stabil dalam penyimpanan jangka panjang jika disimpan dalam kondisi dingin, namun rentan terdegradasi (Puspitaningrum, 2015).

2.1.2 Struktur Kimia Gelatin

Secara kimiawi, gelatin tersusun dari 18 asam amino yang saling terikat, termasuk asam aspartat, asam glutamat, serin, valin, tirosin, lisin, treonin, arginin, glisin, histidin, hidrokisprolin, isoleusin, leusin, hidrokisilisin, fenilalanin, prolin, alanin, dan metionin. Susunan asam amino gelatin berupa triplet peptida, yaitu Glisin-X-Y, di mana X umumnya adalah asam amino prolin dan Y adalah asam amino hidrokisprolin. Senyawa gelatin merupakan polimer linier yang tersusun dari satuan terulang asam amino glisin-prolin-prolin dan glisin-prolin-hidrokisprolin yang bergabung membentuk rangkaian polipeptida (Puspitaningrum, 2015).

Gelatin berdasarkan perspektif kimia dapat diidentifikasi sebagai polimer besar yang tersusun atas satuan-satuan yang disebut monomer, yaitu asam amino, yang menggambarkan susunan molekuler dari komponen dasar pembentuk protein (Aji, 2024).



Gambar 2.1 Representasi umum dari asam amino (Aji, 2024)

Asam amino merupakan sekuen, yaitu urutan atau susunan khas, yang terdapat dalam gelatin, di mana hidrolisis kolagen dari jaringan hewan seperti tulang dan kulit merupakan komponen utama produksi asam amino (Alipal et al., 2019).

Tabel 2.1 Komposisi asam amino gelatin sapi dan babi

| Asam Amino | Gelatin Sapi (%) | Gelatin Babi (%) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| L-Aspartic acid | 4,471 | 5,258 |
| L-Serine | 3,017 | 3,213 |
| L-Glutamic acid | 7,344 | 8,219 |
| Glycine | 20,493 | 21,944 |
| L-Histidine | 1,552 | 1,642 |
| L-Arginine | 9,319 | 11,448 |
| L-Threonine | 1,934 | 2,360 |
| L-Alanine | 6,187 | 6,659 |
| L-Proline | 9,542 | 10,274 |
| L-Cystine | 0,201 | 0,461 |
| L-Tyrosine | 0,474 | 0,925 |
| L-Valine | 2,361 | 2,635 |
| L-Methionine | 0,856 | 0,648 |
| L-Lysin HCl | 2,647 | 2,771 |
| L-Isoleucine | 1,616 | 1,347 |
| L-Leucine | 2,879 | 2,900 |
| L-Phenylalanine | 2,276 | 3,229 |
| Triptophan | 0,000 | 0,000 |

2.1.3 Karakteristik Gelatin Sapi

Gelatin sapi, yang umumnya dihasilkan dari bahan baku berupa tulang dan kulit sapi, diproduksi melalui proses basa yang menghasilkan gelatin tipe B. Gelatin tipe ini cenderung memiliki tekstur yang lebih keras dan kurang lembut dibandingkan dengan gelatin babi, yang dalam analisis menggunakan SPME dan GC-MS ditemukan mengandung senyawa *volatile* spesifik seperti 1-pentakosena. Temuan ini menunjukkan adanya perbedaan komposisi kimia antara gelatin sapi dan babi yang dapat memengaruhi kualitas serta sifat fisiknya (Sari, 2021).

Gelatin sapi terbentuk melalui proses hidrolisis parsial kolagen yang melibatkan pemutusan ikatan hidrogen dan ikatan hidrofobik pada struktur heliks kolagen, sehingga struktur protein kolagen menjadi lebih terbuka dan lebih mudah diekstraksi menjadi gelatin. Struktur gelatin sapi terdiri dari asam amino, dengan glisin sebagai asam amino utama yang menyusun sekitar dua pertiga dari seluruh asam amino yang ada. Glisin dan asam amino lainnya, seperti prolin, membentuk rantai α yang terdiri dari pengulangan kontinyu dari asam amino Gly-X-Y, di mana X biasanya adalah prolin dan Y adalah asam amino lainnya (Yuliani et al., 2024).

Proses hidrolisis ini dapat dipercepat dengan penggunaan asam kuat seperti HCl, yang meningkatkan konversi atau perubahan kolagen menjadi gelatin. Peningkatan konsentrasi ion H⁺ dalam larutan curing, yaitu campuran bahan kimia yang digunakan dalam proses pengawetan untuk meningkatkan daya tahan, tekstur, rasa, atau sifat tertentu dari suatu produk, terutama daging, dapat mempercepat proses hidrolisis. Hal ini terjadi karena ion H⁺ berperan sebagai katalis yang mempercepat pemecahan molekul kompleks menjadi molekul yang lebih

sederhana, sehingga meningkatkan efisiensi konversi selama proses pengawetan (Sasmitaloka et al., 2017).

2.1.4 Karakteristik Gelatin Babi

Gelatin babi, yang dihasilkan dari kulit, tulang, serta limbah Rumah Potong Hewan (RPH) babi, umumnya diproduksi melalui proses asam yang menghasilkan gelatin tipe A. Gelatin ini umumnya memiliki kekenyalan yang lebih lembut dan tekstur yang lebih halus dibandingkan dengan gelatin sapi. Analisis menggunakan SPME dan GC-MS menunjukkan bahwa gelatin babi mengandung senyawa *volatile* seperti 3-tetradecyn-1-ol, yang membedakannya secara signifikan dari gelatin jenis lain dalam hal komposisi kimia dan sifat fisiknya (Sari, 2021).

Struktur kimia gelatin babi didominasi oleh asam amino glisin dan prolin, yang membentuk rantai α polipeptida. Gelatin babi memiliki struktur α -helix yang terbentuk dari pengulangan kontinyu asam amino Gly-X-Y, dengan X biasanya adalah prolin dan Y biasanya adalah asam amino lainnya. Struktur gelatin juga memiliki tingkat struktur primer, sekunder, dan tersier yang mirip dengan protein lainnya, meskipun struktur kuartener terbentuk berbeda karena kolagen merupakan rantai linier. Kekuatan gel bervariasi mulai dari 50 hingga 300 bloom, dan dapat disesuaikan dengan penambahan bahan baku lain dalam industri (Aris et al., 2020).

2.2 Nanopartikel

Teknologi nanopartikel, yang sering disebut sebagai nanoteknologi, secara umum didefinisikan sebagai teknologi yang mencakup perancangan, pembuatan, dan aplikasi material atau struktur berukuran nanometer. Teknologi ini tidak hanya berfokus pada cara menghasilkan partikel berukuran nanometer, tetapi juga

mencakup proses produksi serta pemahaman tentang sifat-sifat baru yang muncul dari material nano (Ariyanta, 2014). Nanopartikel sendiri merupakan partikel dengan ukuran yang sangat kecil, berkisar antara 1 hingga 100 nanometer, dan dalam konteks nanoteknologi, nanopartikel diperlakukan sebagai objek kecil yang berperilaku sebagai satu kesatuan dalam hal sifat serta cara pergerakannya (Priyo, 2017).

Salah satu keunggulan utama dari nanopartikel adalah sifat optiknya, di mana perbedaan ukuran partikel dapat menghasilkan warna yang berbeda sesuai dengan teori *Surface Plasmon Resonance* (SPR) (Kartini et al., 2020). Selain itu, kelebihan lainnya adalah nanopartikel memiliki kemampuan untuk menembus ruang-ruang antar sel yang dapat ditembus oleh partikel koloidal, yaitu partikel dengan ukuran 1 nm hingga 1 μm . Nanopartikel juga menunjukkan peningkatan afinitas dari sistem, yaitu kemampuan nanopartikel untuk berinteraksi lebih baik dengan target biomolekul akibat peningkatan luas permukaan (Abdassah, 2017).

2.2.1 Nanopartikel Emas

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). Perbedaan sifat plasmonik permukaan antara nanopartikel dan material dalam ukuran bulk terletak pada beberapa aspek. Nanopartikel memiliki resonansi plasmon permukaan yang kuat dan dapat disesuaikan berdasarkan ukuran dan bentuk, yang kemudian dapat menghasilkan interaksi optik yang unik. Sebaliknya, material dalam ukuran bulk umumnya tidak menunjukkan resonansi plasmon yang signifikan karena ukuran yang lebih besar

mengurangi efek interaksi cahaya. Adapun ukuran kecil nanopartikel memungkinkan peningkatan sensitivitas terhadap cahaya, sehingga menghasilkan warna atau spektrum yang berbeda, sedangkan material dalam ukuran bulk cenderung memiliki sifat reflektif (memantulkan cahaya) atau transmisi yang lebih konsisten dan kurang sensitif terhadap panjang gelombang tertentu. Selain itu, nanopartikel lebih rentan terhadap pengaruh lingkungan dan dapat mengalami perubahan sifat plasmonik, sementara material dalam ukuran bulk lebih stabil dan kurang terpengaruh oleh kondisi lingkungan. Perbedaan kerapatan tinggi antara nanopartikel dan material dalam ukuran bulk terletak pada cara distribusi massa dan ruang. Nanopartikel, yang memiliki ukuran sangat kecil, sering kali menunjukkan kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan ukuran bulk dari material yang sama, karena sebagian besar massa berkontribusi pada permukaan. Hal ini mengakibatkan nanopartikel memiliki area permukaan yang lebih besar relatif terhadap volumenya, sehingga mampu meningkatkan interaksi dengan lingkungan dan reaktivitas, yaitu kemampuan suatu zat untuk bereaksi dengan zat lain. Nanopartikel emas merupakan salah satu logam yang paling banyak diteliti karena memiliki serapan pada panjang gelombang visible yang menghasilkan fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* (Octaviana et al., 2016).

Serapan LSPR pada panjang gelombang *visible* menghasilkan perubahan warna yang dapat diamati ketika AuNp berinteraksi dengan analit, yaitu medium atau molekul yang menempel pada nanopartikel. Interaksi ini menyebabkan agregasi, yaitu partikel-partikel kecil yang bergabung membentuk gumpalan, pada nanopartikel, sehingga memicu pergeseran panjang gelombang LSPR. Pergeseran ini terlihat dari perubahan warna pada larutan, menjadikannya indikator visual yang

sensitif untuk mendeteksi interaksi molekul atau perubahan lingkungan nanopartikel. Selain itu, AuNp memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap oksidasi (Anwar et al., 2018).

2.2.2 Nanopartikel Perak

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).

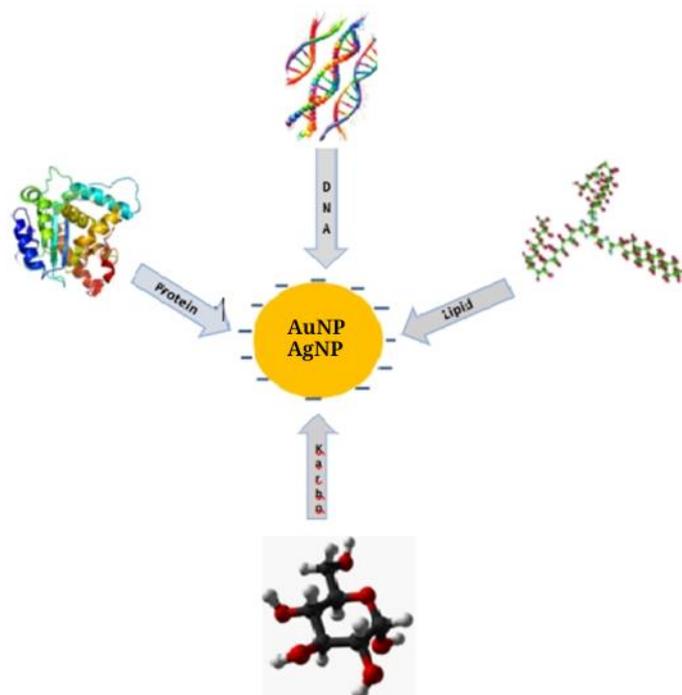
Koloid, yaitu campuran di mana partikel kecil tersebar dalam medium lain tanpa larut atau mengendap, seperti mayones yang merupakan minyak dalam air atau kabut yang merupakan air dalam udara, telah lama dikenal memiliki sifat antimikroba yang kuat. Koloid perak mampu membunuh berbagai mikroorganisme patogenik, yaitu mikroorganisme yang menyebabkan penyakit, tanpa adanya laporan tentang mikroba yang resisten atau bertahan terhadap efek perak. Selain itu, bentuk dan ukuran nanopartikel perak sangat berpengaruh pada sifat optik, listrik, magnet, katalis, serta sifat antimikrobanya. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar pula efek antimikrobanya (Ariyanta, 2014).

Nanopartikel perak (Ag), meskipun lebih rentan terhadap oksidasi, yaitu proses kimia di mana suatu zat kehilangan elektron selama reaksi kimia, tetap banyak

digunakan karena sifat kimianya yang lebih reaktif dan sifat antimikrobanya yang kuat. Reaktivitas permukaan nanopartikel emas yang rendah membuatnya sangat stabil, sedangkan perak yang lebih reaktif lebih mudah bereaksi dengan lingkungan sekitarnya, yang membuatnya cepat teroksidasi, namun tetap bermanfaat dalam aplikasi yang memerlukan interaksi kimia kuat (Roddu, 2021).

2.2.3 Interaksi Nanopartikel dengan Biomolekul

Nanopartikel dapat berinteraksi dengan biomolekul melalui interaksi elektrostatik, yaitu gaya tarik-menarik atau tolak-menolak yang terjadi antara partikel bermuatan listrik. Interaksi ini terjadi ketika nanopartikel bermuatan berinteraksi dengan molekul biologis yang juga memiliki muatan, sehingga memfasilitasi pengikatan dan stabilisasi biomolekul pada permukaan nanopartikel. Selain melalui interaksi elektrostatik, nanopartikel juga dapat berikatan secara kovalent, yaitu ikatan di mana dua atom berbagi pasangan elektron untuk membentuk molekul atau senyawa yang lebih stabil, dengan biomolekul. Dalam nanopartikel dan biomolekul, ikatan kovalen berarti keduanya berinteraksi melalui pembagian elektron di antara atom-atomnya. Proses ini sering digunakan dalam pembuatan biokonjugat, yaitu kombinasi beberapa molekul biologis atau molekul biologis dengan molekul sintetik melalui reaksi kimia untuk menghasilkan struktur yang fungsional. Biokonjugat ini banyak diaplikasikan dalam biosensor, di mana nanopartikel berperan sebagai pembawa biomolekul seperti DNA dan protein (Fazrin et al., 2020).



Gambar 2.2 Konjugasi AuNP dan AgNP dengan biomolekul (biokonjugat) melalui interaksi elektrostatik dan kovalen (Fazrin, 2020)

Nanopartikel logam, seperti AuNP dan AgNP, dapat berikatan dengan biomolekul melalui interaksi elektrostatik dengan molekul biologis. Metode ini merupakan salah satu cara paling sederhana untuk menfungsikan dan menstabilkan biokonjugasi nanopartikel. misalnya, jika nanopartikel bermuatan positif, ia dapat berikatan secara ionik dengan bagian biomolekul yang bermuatan negatif dan bersifat nukleofilik. Biomolekul yang memiliki gugus asam dan basa secara bersamaan, seperti protein, sangat efektif dalam menstabilkan nanopartikel. Secara umum, stabilisasi ini terjadi melalui adsorpsi pasif biomolekul ke permukaan nanopartikel melalui interaksi elektrostatik serta hidrofobik (Mirau et al., 2017).

Ukuran dan bentuk nanopartikel memengaruhi sifat interaksi mereka dengan molekul. Nanopartikel yang lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap

volume yang lebih tinggi, yang meningkatkan kemampuan mereka untuk berinteraksi dengan biomolekul (Fazrin et al., 2020). Interaksi antara nanopartikel dan molekul juga memengaruhi stabilitas sistem nanomaterial. Misalnya, nanopartikel dapat melindungi biomolekul dari degradasi, yaitu proses perusakan, serta meningkatkan bioavailabilitasnya, yaitu seberapa banyak atau cepat suatu zat aktif diserap, dalam aplikasi terapeutik. Selain itu, kemampuan nanopartikel untuk menembus membran sel juga bergantung pada interaksinya dengan molekul biologis di sekitarnya (Abdassah, 2017).

2.2.4 *Nanosphere* Logam

Nanosphere adalah partikel nano yang berbentuk bulat (*sphere*) dan memiliki diameter yang diukur dalam skala nanometer (nm). Ukuran ini sangat kecil, sehingga memungkinkan interaksi molekuler yang lebih intensif dengan lingkungan sekitar (Liu et al., 2023). *Nanosphere* memiliki luas permukaan yang sangat besar dibandingkan dengan ukuran fisiknya. Hal ini memungkinkan *nanosphere* untuk menampung lebih banyak biomolekul atau senyawa kimia, sehingga meningkatkan kemampuan deteksi. *Nanosphere* dapat digunakan untuk melindungi biomolekul atau senyawa kimia dari degradasi, di mana dapat membentuk struktur yang stabil dan tahan lama, sehingga memungkinkan penggunaan yang berlangsung lama (Muttaqien et al., 2023).

Salah satu keunggulan dari *nanosphere* adalah kemampuannya untuk mengumpulkan dan meningkatkan sinyal fluoresensi, yang merupakan proses penyerapan cahaya atau radiasi elektromagnetik dan kemudian memancarkan cahaya pada panjang gelombang yang lebih panjang atau energi yang lebih rendah. Kemampuan ini memungkinkan deteksi dengan tingkat sensitivitas yang lebih

tinggi (Liu et al., 2023). *Nanosphere* juga digunakan dalam penginderaan kimia untuk mendeteksi senyawa kimia atau biomolekul. Penggunaannya diintegrasikan dengan sensor kimia untuk meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas, yaitu kemampuan metode untuk mengidentifikasi hanya target yang diinginkan saja, dalam deteksi (Muttaqien et al., 2023).

2.2.5 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 يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِّثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ

Artinya: “Tidak lengah sedikit pun dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarah, baik di Bumi maupun di langit.” (Q.S. Yunus (10): 61).

Menurut Tafsir Al-Mishbah, Quraish Shihab menjelaskan bahwa penggunaan bahasa dengan kata ذَرَّةٌ digunakan untuk menggambarkan sesuatu yang paling kecil. Para pakar bahasa Arab biasanya menggunakan kata ini untuk menunjukkan atom, namun jika atom dapat dipisahkan atau dipecahkan lagi, maka bagian terkecil itu lebih tepat dinamai zarah.

Berdasarkan ayat ini, dapat diketahui bahwa sesuatu dengan ukuran yang sangat kecil bahkan tidak dapat dilihat oleh mata secara langsung, termasuk nanopartikel, telah dijelaskan oleh Allah SWT melalui Al-Quran sejak zaman di mana manusia belum menemukan keberadaan partikel yang sangat kecil ini. Hal ini semakin menguatkan bahwa Al-Qur'an bukan hanya kitab petunjuk spiritual, tetapi juga memberikan isyarat tentang fenomena ilmiah yang terus berkembang seiring

kemajuan ilmu pengetahuan. Oleh karena itu, penting untuk terus mempelajari dan mengembangkan ilmu agar semakin memahami keajaiban ciptaan Allah SWT.

2.3 Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)

Pada tahun 1908, Gustav Mie pertama kali menyelesaikan penyerapan optik nanopartikel logam bulat dengan mempertimbangkan interaksi antara medan listrik cahaya dan elektron bebas pada permukaan logam menggunakan teori elektrodinamika klasik persamaan Maxwell. Penyerapan optik ini dijelaskan sebagai hasil dari osilasi elektron konduksi, yaitu elektron yang bebas bergerak di dalam material dan berperan dalam menghantarkan arus pada permukaan logam yang terpolarisasi oleh medan elektromagnetik, artinya suatu sistem memiliki pemisahan muatan atau penyesuaian tertentu dari medan listrik. Fenomena ini dikenal sebagai resonansi plasmon permukaan lokal (LSPR) (Gharibshahi, 2017).

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).

Resonansi dalam fenomena LSPR berfungsi untuk memperkuat medan lokal yang ada di sekitar nanopartikel. Ketika resonansi terjadi, elektron bebas di

permukaan nanopartikel bergerak secara kolektif, menghasilkan osilasi permukaan. Osilasi ini menciptakan medan elektromagnetik tambahan di sekitar nanopartikel. Selain itu, resonansi juga memperkuat medan lokal di sekitar nanopartikel melalui beberapa mekanisme. Pertama, osilasi elektron yang diperkuat. Ketika resonansi terjadi, elektron bebas bergerak secara kolektif, menghasilkan osilasi permukaan yang memperkuat medan elektromagnetik di sekitar nanopartikel. Kedua, medan lokal yang sangat kuat. Medan lokal di sekitar nanopartikel menjadi sangat kuat karena medan elektromagnetik eksternal diperkuat oleh osilasi elektron bebas. Penguatan medan ini menghasilkan “hotspots”, yaitu area kecil dengan intensitas medan listrik yang jauh lebih tinggi dibandingkan medan aslinya. Ketiga, energi yang terserap. Resonansi menyebabkan energi dari medan elektromagnetik eksternal tersimpan sementara dalam osilasi elektron. Energi ini kemudian dilepaskan kembali, memperkuat medan elektromagnetik di sekitar nanopartikel.

Fenomena ini dapat diamati dalam berbagai sistem berbasis nanopartikel logam, salah satu contohnya adalah The Lycurgus Cup (Gambar 2.3a dan 2.3b). Artefak Romawi ini memiliki sifat kaca dikroik, di mana warnanya berubah tergantung pada cara cahaya berinteraksi dengannya. Ketika cahaya dipantulkan, cangkir tampak berwarna hijau, tetapi jika cahaya melewati kaca, warnanya berubah menjadi merah. Analisis modern menunjukkan bahwa perubahan warna ini disebabkan oleh nanopartikel emas dan perak yang tersebar di dalam kaca, menghasilkan efek plasmonik yang unik. Nanopartikel ini memiliki ukuran sekitar 70 nm, sehingga terlalu kecil untuk diamati dengan mikroskop optik biasa, tetapi dapat dianalisis menggunakan mikroskop elektron transmisi (TEM).



Gambar 2.3 (a) dan (b) menunjukkan The Lycurgus Cup, artefak Romawi abad ke-4 yang menunjukkan perubahan warna akibat interaksi cahaya dengan nanopartikel emas dan perak dalam kaca dikroik. (c) menunjukkan larutan emas koloid dari eksperimen Michael Faraday, yang menunjukkan warna merah khas akibat efek plasmonik dari nanopartikel emas (Locarno & Brinks, 2023)

Contoh lain dari efek plasmonik dapat dilihat pada larutan emas koloid yang dikembangkan oleh Michael Faraday pada tahun 1850-an (Gambar 2.3c). Saat itu, ia menemukan bahwa larutan emas tidak berwarna emas seperti bentuk padatnya, melainkan tampak merah ruby. Fenomena ini dijelaskan sebagai hasil dari resonansi plasmonik yang menyebabkan nanopartikel emas menyerap dan menyebarkan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Efek ini kemudian dikaji lebih lanjut oleh berbagai ilmuwan, termasuk Maxwell Garnett pada tahun 1904, Richard Gans pada tahun 1912, serta Kreibig dan Zacharias pada tahun 1970, yang menghubungkan respons optik nanopartikel emas dan perak dengan fenomena eksitasi plasmon permukaan lokal.

Ukuran, bentuk, dan bahan nanopartikel sangat memengaruhi frekuensi resonansi LSPR. Semakin kecil ukuran nanopartikel, frekuensi LSPR cenderung lebih tinggi karena perubahan distribusi densitas optis, yang menunjukkan seberapa banyak cahaya yang diserap atau ditransmisikan sesuai dengan ukuran partikel. Pada ukuran yang sangat kecil, efek kuantum mulai muncul, sehingga spektrum

bergeser ke arah biru (Arfan, 2017). Bentuk nanopartikel juga berperan penting. Nanopartikel yang berbentuk simetris menghasilkan frekuensi LSPR yang lebih stabil dan dapat diprediksi, sementara bentuk yang tidak simetris bisa menyebabkan pergeseran frekuensi LSPR (Utama, 2018). Selain itu, bahan nanopartikel, seperti emas dan perak, juga memengaruhi frekuensi LSPR karena perbedaan sifat optik mereka (Arfan, 2017).

LSPR terjadi pada material dengan banyak elektron bebas dan bersifat terlokalisasi di permukaan nanopartikel karena efek plasma yang terlokalisasi. Jika medium di sekitar nanopartikel berubah, frekuensi resonansi juga akan berubah, menjadikan LSPR sensitif terhadap perubahan lingkungan. Tidak digunakannya faktor refleksi dan transmisi pada LSPR dapat dijelaskan sebagai berikut. Refleksi atau pemantulan energi terjadi ketika sebagian gelombang tidak berinteraksi langsung dengan nanopartikel, sehingga tidak mendukung resonansi. Energi tetap ada tetapi tidak digunakan untuk resonansi. Transmisi atau penerusan energi bergantung pada ketebalan material dan indeks bias medium. Energi gelombang yang hanya melewati nanopartikel tanpa interaksi signifikan juga tidak mendukung resonansi.

Di sisi lain, efek ekstinsi, yang merupakan penurunan intensitas cahaya, juga mencakup kombinasi dari absorpsi dan *scattering*. Ekstinsi diukur melalui spektrum yang mencakup total cahaya yang hilang karena kedua efek tersebut (Habibi Masheli et al., 2023). Adapun absorpsi menggambarkan seberapa banyak energi cahaya diserap oleh nanopartikel dan diubah menjadi pemanasan lokal atau energi non-radiasi. Hal ini sangat penting dalam aplikasi seperti fototermal dan biosensing (Li et al., 2015). Sementara itu, *scattering* terjadi ketika cahaya

terhambur oleh nanopartikel, terutama pada nanopartikel yang lebih besar atau saat resonansi tertentu tercapai. Efek *scattering* ini memperkuat medan lokal di sekitar nanopartikel, berperan penting dalam pembentukan dan penguatan hotspots, yang meningkatkan efektivitas resonansi plasmon permukaan lokal (LSPR) (Payne, 2015). Selain itu, *scattering* juga mengarah pada pemancaran energi ke berbagai arah, semakin memperkuat medan elektromagnetik di sekitar nanopartikel dan meningkatkan respons LSPR.

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 (ϵ_d) dari medium di sekitar nanopartikel. Hubungan antara panjang gelombang resonansi LSPR (λ_{LSPR}) dengan keadaan nanopartikel dan medium sekitarnya dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$\lambda_{LSPR} = \lambda_{bulk} (1 + 2\epsilon_d)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Di mana:

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

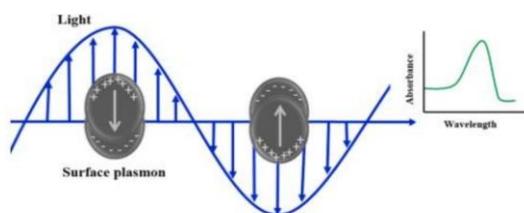
λ_{bulk} = panjang gelombang resonansi material dalam keadaan bulk (nm)

ϵ_d = 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.

LSPR dapat digunakan dalam teknik sensor optik, di mana nanopartikel logam diimobilisasi (ditempatkan atau diikat secara stabil) pada permukaan serat optik. Ketika nanopartikel ini terkena analit, panjang gelombang puncak LSPR akan bergeser, dan perubahan sifat optik dapat dideteksi. Teknik ini menawarkan keunggulan seperti sensitivitas tinggi, deteksi tanpa label, dan kemampuan pengukuran secara real-time (Chauhan & Kumar Singh, 2021).



Gambar 2.4 Representasi *Localized Surface Plasmon* (LSP) pada nanopartikel dan peristiwa pengikatan nanopartikel dalam spektrum absorbansi. (Aji, 2024)

Pembangkitan LSPR secara teoritis dapat terjadi pada logam, paduan yang merupakan campuran unsur dengan salah satunya logam, atau semikonduktor yang mampu menghantarkan listrik jika diberi energi tambahan. Hal ini membutuhkan material dengan konstanta dielektrik riil negatif yang besar, yaitu komponen real dari permitivitas kompleks bernilai negatif, dan bagian imajiner positif yang kecil untuk meminimalkan kerugian energi. Emas sering digunakan dalam aplikasi biologis karena sifat inert secara kimia, tahan terhadap oksidasi, biokompatibel

sehingga aman berinteraksi dengan tubuh, dan mampu mengikat biomolekul dengan baik. Sementara itu, perak sering digunakan dalam LSPR pada frekuensi terlihat karena lebar garis plasmon yang sempit, meskipun perak mudah teroksidasi dalam kondisi laboratorium biasa. Struktur nano dan bahan non-logam mulia dengan sifat optik yang baik juga menjadi pilihan dalam penginderaan plasmonik untuk mendapatkan sifat optik yang diinginkan dengan biaya lebih rendah (Zhou et al., 2018).

Sensitivitas didefinisikan sebagai perubahan yang terukur pada sinyal keluaran yang bergantung pada perubahan satuan dalam besaran analit yang diukur. Performa LSPR dilihat dari nilai sensitivitasnya, semakin tinggi nilai sensitivitas maka performa LSPR semakin optimal. Sensitivitas didapat dengan menghitung posisi puncak (λ) LSPR per unit indeks bias (RIU) (Shabaninezhad & Ramakrishna, 2019), seperti pada persamaan 2.2, sehingga dengan melihat $\Delta\lambda_{LSPR}$ dengan indeks bias yang berbeda maka dapat mengidentifikasi nilai sensitivitas dari LSPR tersebut.

$$S = \frac{\Delta\lambda_{LSPR}}{\Delta n} \quad (2.2)$$

Di mana:

S = sensitivitas (nm/RIU)

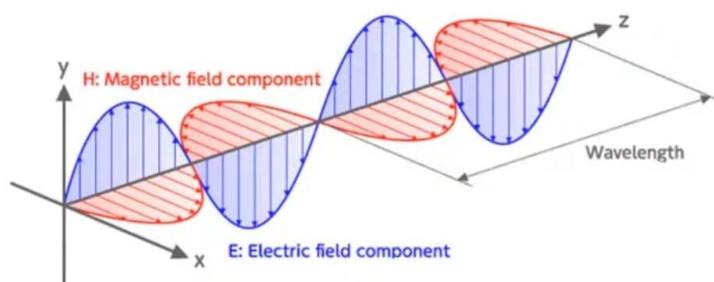
λ_{LSPR} = panjang gelombang resonansi (nm)

n = indeks bias

2.3.1 Teori Maxwell

Gelombang elektromagnetik terdiri dari dua komponen utama yang saling berinteraksi, yaitu medan listrik (E) yang bergetar ke atas atau bawah dan medan

magnet (\mathbf{H}) yang bergetar ke kanan atau kiri. Kedua komponen ini saling tegak lurus satu sama lain, serta keduanya juga tegak lurus terhadap arah propagasi (perambatan) gelombang, yang biasanya dilambangkan dengan sumbu \mathbf{k} . Sumbu \mathbf{k} adalah arah propagasi gelombang elektromagnetik, dengan rumus $\mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$, yang menunjukkan banyaknya siklus gelombang dalam satu ruang. Jika nilai \mathbf{k} besar, maka gelombang lebih rapat, sedangkan jika nilai \mathbf{k} kecil, gelombang menjadi lebih renggang. Panjang gelombang (λ) sendiri didefinisikan sebagai jarak antara dua puncak berturut-turut medan listrik atau medan magnet. Gelombang elektromagnetik ini merambat melalui ruang bebas dengan kecepatan cahaya (c), yang memiliki nilai sekitar 3×10^8 m/s (Griffiths, 2017).



Gambar 2.5 gelombang radiasi elektromagnetik yang merambat secara transversal di ruang dan waktu terdiri dari vektor medan listrik (\mathbf{E}) dan medan magnet (\mathbf{H}) yang saling tegak lurus satu sama lain (Shrestha & Shrestha, 2023)

Medan listrik (\mathbf{E}) ditunjukkan dengan garis berwarna biru, yang bergerak secara transversal, yaitu berosilasi dalam arah yang tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang. Jika partikel memiliki muatan positif, medan listrik (\mathbf{E}) akan mendorong partikel tersebut searah dengan medan listrik, sedangkan jika partikel memiliki muatan negatif, medan listrik (\mathbf{E}) akan mendorong partikel ke arah yang berlawanan. Hal ini sesuai dengan persamaan gaya listrik $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$, di

mana q adalah besar muatan partikel. Sementara itu, medan magnet (H) digambarkan dengan garis berwarna merah, yang juga berosilasi secara transversal, namun berada pada arah yang tegak lurus terhadap medan listrik dan arah perambatan gelombang. Medan magnet H memiliki pengaruh utama dalam mengubah arah gerak partikel bermuatan sesuai dengan hukum Lorentz, dengan persamaan gaya $F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, di mana gaya hanya bekerja jika partikel tersebut memiliki kecepatan awal. Dengan kata lain, E dan H berada dalam bidang yang saling tegak lurus, sementara gelombang itu sendiri bergerak dalam arah yang tegak lurus terhadap keduanya (Shrestha & Shrestha, 2023).

Panjang gelombang (λ) adalah jarak antara dua puncak berturut-turut dari medan listrik atau medan magnet, yang menunjukkan periode osilasi dari gelombang tersebut. Dalam konteks ini, panjang gelombang ini juga terkait dengan frekuensi (f) dan kecepatan gelombang (c) melalui hubungan $c = f\lambda$, di mana f adalah frekuensi gelombang yang menggambarkan seberapa sering gelombang berosilasi selama satu detik, yang juga berkaitan dengan energi foton melalui persamaan $E = hf$ di mana h adalah konstanta Planck (Mardhiyah et al, 2014).

Interaksi antara medan listrik dan medan magnet ini merupakan inti dari teori Maxwell, yang merumuskan bahwa perubahan dalam medan listrik dapat menghasilkan perubahan dalam medan magnet, dan sebaliknya. Proses ini saling memengaruhi dan menyebabkan terjadinya gelombang elektromagnetik yang merambat melalui ruang. Teori Maxwell, yang mencakup persamaan-persamaan fundamental (dasar atau hal penting), menggambarkan bagaimana medan-medan ini berinteraksi dan mengalir melalui ruang waktu (4 dimensi, di mana ruang memiliki panjang, lebar, dan tinggi), memungkinkan terjadinya fenomena seperti

cahaya, gelombang radio, dan radiasi elektromagnetik lainnya (Wahyuddin et al, 2023).

Persamaan Maxwell terdiri dari empat persamaan utama yang menggambarkan hubungan antara medan listrik, medan magnet, arus listrik, dan muatan. Persamaan pertama, yaitu hukum Gauss untuk medan listrik:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa divergensi medan perpindahan listrik ($\nabla \cdot \mathbf{D}$) sebanding dengan densitas muatan listrik (ρ) dalam suatu volume, yang menggambarkan bahwa medan listrik dihasilkan oleh muatan listrik (Dan, 2020).

Hukum Gauss untuk medan listrik juga menjelaskan bagaimana muatan listrik memengaruhi medan listrik di sekitarnya. Analisis ini penting untuk memahami distribusi muatan bebas (ρ) dan medan di sekitar bahan seperti nanopartikel emas dan perak. Dalam LSPR (*localized surface plasmon resonance*), osilasi medan listrik bergantung pada elektron bebas di permukaan logam. Persamaan ini menunjukkan bagaimana muatan bebas menghasilkan medan lokal yang memperkuat osilasi resonansi plasmon.

Distribusi muatan bebas (ρ) di permukaan logam memiliki peran penting, karena LSPR terjadi akibat interaksi antara medan listrik eksternal dan elektron bebas di permukaan logam. Divergensi medan listrik ($\nabla \cdot \mathbf{D}$) menunjukkan bahwa medan listrik dapat mengalami lonjakan tajam di sekitar permukaan logam akibat keberadaan muatan bebas (ρ).

Lonjakan medan ini dapat dijelaskan sebagai berikut: sebelum mencapai permukaan logam, medan di dalam logam cenderung sangat kuat karena tingginya

densitas muatan bebas. Ketika medan mencapai permukaan, medan listrik melonjak karena muatan terkonsentrasi di permukaan. Setelah itu, medan menjadi lebih lemah di medium luar. Di sisi lain, perubahan medan listrik yang tajam terjadi ketika medan listrik stabil di dalam logam, namun saat keluar dari logam ke medium luar, medan listrik berubah drastis. Setelah itu, medan akan menyebar dan melemah di medium sekitarnya.

Persamaan kedua, yaitu hukum Gauss untuk medan magnet:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

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).

Persamaan ini menggambarkan bahwa medan magnet tidak memiliki “sumber” seperti medan listrik yang memiliki muatan listrik sebagai sumbernya. Medan magnet hanya dapat membentuk garis-garis gaya tertutup dan stabil, di mana tidak ada garis gaya yang benar-benar keluar atau masuk, melainkan selalu membentuk loop tertutup. Hal ini dapat dilihat pada fenomena gelombang elektromagnetik, di mana medan magnet (\mathbf{B}) selalu menyertai medan listrik (\mathbf{E}). Namun, medan magnet ini tidak menyebabkan efek seperti “muatan magnetik” karena divergensi $B = 0$.

Dalam fenomena LSPR, medan magnet lokal di sekitar nanopartikel dapat meningkat sebagai akibat dari penguatan medan listrik yang terlokalisasi. Penguatan medan elektromagnetik ini terjadi karena interaksi antara gelombang elektromagnetik dengan elektron bebas di permukaan logam. Meskipun medan

magnet menyertai medan listrik dalam proses ini, efek utamanya tetap didominasi oleh medan listrik yang terlokalisasi.

Selain itu, hukum Gauss untuk medan magnet dalam bentuk integral ($\oint_{\partial v} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dA = 0$) menjelaskan bahwa medan magnet selalu tegak lurus terhadap permukaan tertutup. Dengan kata lain, jumlah medan magnet yang masuk ke dalam suatu volume selalu sama dengan jumlah medan magnet yang keluar, sehingga tidak ada akumulasi medan magnet di dalam volume tersebut. Hal ini mempertegas bahwa medan magnet tidak memiliki muatan magnetik dan hanya membentuk loop tertutup.

Hukum Faraday, yang merupakan persamaan ketiga, yaitu:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.5)$$

Menjelaskan bahwa medan listrik (\mathbf{E}) tidak hanya dihasilkan oleh muatan listrik, tetapi juga oleh perubahan medan magnet (\mathbf{B}) terhadap waktu ($\partial \mathbf{B} / \partial t$). Persamaan ini menggambarkan fenomena induksi elektromagnetik, di mana medan listrik yang berotasi atau berputar ($\nabla \times \mathbf{E}$) muncul akibat perubahan medan magnet dalam waktu tertentu. Tanda negatif (-) pada persamaan ini menunjukkan arah medan listrik yang dihasilkan, yang selalu berlawanan arah dengan perubahan medan magnetnya, sesuai dengan prinsip Lenz. Rotasi medan listrik ($\nabla \times \mathbf{E}$) terjadi di sekitar area perubahan medan magnet ($\partial \mathbf{B} / \partial t$), membentuk pola melingkar (Dan, 2020).

Dalam LSPR, hukum Faraday memiliki sebagaimana ketika nanopartikel logam mengalami resonansi plasmonik, medan elektromagnetik eksternal yang

diterapkan memicu osilasi kolektif elektron di permukaan nanopartikel. Osilasi ini menyebabkan perubahan medan magnet (\mathbf{B}) yang sangat cepat, yang pada gilirannya menghasilkan medan listrik (\mathbf{E}) melingkar di sekitarnya. Interaksi medan listrik dan medan magnet yang berubah-ubah ini meningkatkan penguatan medan elektromagnetik di sekitar nanopartikel, menghasilkan efek LSPR yang lebih intens. Fenomena ini memungkinkan nanopartikel logam memiliki sensitivitas tinggi terhadap cahaya, memaksimalkan resonansi, dan memperkuat sinyal pada aplikasi biosensing.

Persamaan keempat, hukum Ampère-Maxwell, yaitu:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.6)$$

Di mana rotasi medan magnet ($\nabla \times \mathbf{H}$) bergantung pada arus listrik (\mathbf{J}) yang mengalir melalui konduktor serta perubahan medan listrik ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$) yang dikenal sebagai arus perpindahan. Arus perpindahan ini menjelaskan bagaimana perubahan medan listrik seiring waktu dapat menciptakan medan magnet (Dan, 2020).

Dalam persamaan ini, ($\nabla \times \mathbf{H}$) menggambarkan medan magnet yang berotasi, sementara (\mathbf{J}) merepresentasikan kerapatan arus listrik yang mengalir melalui konduktor atau nanopartikel logam. Sementara itu, ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$) menunjukkan bagaimana perubahan medan listrik menciptakan medan magnet. Medan listrik (\mathbf{D}) sendiri dapat dinyatakan sebagai rumus 2.7, yang menunjukkan bagaimana material merespons medan listrik yang diberikan.

Dalam LSPR, hukum Ampère-Maxwell menjelaskan bagaimana medan elektromagnetik berinteraksi dengan nanopartikel logam. Ketika nanopartikel

terkena cahaya dengan panjang gelombang tertentu, elektron bebas dalam logam akan berosilasi, menghasilkan arus listrik (\mathbf{J}) yang menciptakan medan magnet lokal sesuai dengan $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$. Selain itu, dalam resonansi plasmonik, medan listrik (\mathbf{D}) di sekitar nanopartikel berubah dengan cepat akibat osilasi elektron, sehingga menciptakan arus perpindahan ($\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$) yang berperan dalam pembentukan medan magnet tambahan di sekitar nanopartikel.

Interaksi antara medan listrik dan medan magnet dalam sistem LSPR ini bersifat dinamis, di mana perubahan satu medan akan mempengaruhi medan lainnya, yang memperkuat resonansi elektromagnetik terlokalisasi. Hal ini membuat nanopartikel plasmonik sangat sensitif terhadap perubahan indeks bias di sekitarnya.

Dalam Gambar 2.4, ditunjukkan hubungan antara medan listrik dan magnet dengan material. Medan perpindahan listrik (\mathbf{D}) dipengaruhi oleh medan listrik (\mathbf{E}) dan polarisasi material (\mathbf{P}), yang dijelaskan oleh persamaan:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 \epsilon_\infty \mathbf{E} \quad (2.7)$$

di mana \mathbf{D} merupakan medan perpindahan listrik yang menggambarkan total densitas fluks listrik dalam suatu medium, yang dipengaruhi oleh medan listrik eksternal (\mathbf{E}) dan polarisasi material (\mathbf{P}). ϵ_0 adalah permitivitas vakum, dengan nilai $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, yang menunjukkan kemampuan ruang vakum dalam mendukung medan listrik. \mathbf{P} merepresentasikan momen dipol listrik, yaitu muatan listrik dalam material yang terbentuk akibat medan listrik eksternal (Djuhana, 2021).

Selain itu, terdapat ϵ_{∞} atau permitivitas relatif dalam frekuensi tinggi, yang menunjukkan bagaimana material merespons medan listrik dalam frekuensi tertentu, seperti gelombang optik. ϵ_{∞} juga merupakan faktor utama yang menentukan medan perpindahan listrik baik dalam vakum maupun dalam material. Dalam sistem ini, polarisasi (\mathbf{P}) berbanding lurus dengan medan listrik (\mathbf{E}), sehingga semakin besar polarisasi, semakin besar pula medan listrik yang dihasilkan (Jeffrey & Ridgeway, 2020).

Medan perpindahan listrik bergantung pada medan listrik dan karakteristik material, termasuk permitivitasnya. Material dengan permitivitas tinggi (ϵ_{∞}) akan lebih mampu menangkap medan listrik eksternal, sehingga memengaruhi sifat optik dan dielektriknya (Jeffrey & Ridgeway, 2020).

Sementara itu, medan magnet (\mathbf{B}) tergantung pada intensitas medan magnet (\mathbf{H}) dan magnetisasi material (\mathbf{M}), yang dijelaskan oleh persamaan:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.8)$$

di mana μ_0 adalah permeabilitas magnetic vakum, yaitu konstanta universal yang menggambarkan kemampuan ruang hampa untuk mendukung medan magnet, dengan nilai $4\pi \times 10^{-7}$ H/m (Paul et al, 2014). Dalam persamaan ini, \mathbf{B} merepresentasikan total medan magnet yang melintasi suatu area, yang mencakup kontribusi medan luar (\mathbf{H}) dan magnetisasi material (\mathbf{M}). \mathbf{H} adalah medan magnet yang berasal dari sumber eksternal, sedangkan \mathbf{M} adalah magnetisasi, yaitu besarnya material yang termagnetisasi akibat pengaruh medan luar per satuan volume dalam material. Dengan demikian, medan magnet total dalam suatu

material tidak hanya dipengaruhi oleh medan eksternal, tetapi juga oleh respons magnetik intrinsik material tersebut.

Hubungan antara persamaan ini dengan LSPR yaitu magnetisasi (\mathbf{M}) muncul sebagai respon lokal material logam terhadap medan listrik dan medan magnet eksternal, yang terutama disebabkan oleh pergerakan elektron bebas dalam logam. Dalam nanopartikel yang mengalami resonansi plasmonik, elektron bebas dalam logam berosilasi akibat eksitasi medan elektromagnetik, menghasilkan arus listrik osilasi. Arus listrik ini menciptakan magnetisasi lokal (\mathbf{M}), yang sebanding dengan intensitas medan eksternal (\mathbf{H}).

Magnetisasi ini memodifikasi medan magnet total dalam sistem plasmonik, yang menyebabkan perubahan dalam interaksi antara nanopartikel logam dan gelombang elektromagnetik. Dalam vakum, medan magnet total hanya bergantung pada medan eksternal, yang dirumuskan sebagai $\mathbf{B} = \mu_0 + \mathbf{H}$. Namun, dalam material, magnetisasi berperan dalam memodifikasi medan magnet tersebut, sehingga rumusnya menjadi persamaan 2.8. Hal ini menunjukkan bahwa medan magnet dalam suatu material bukan hanya hasil dari medan luar, tetapi juga dipengaruhi oleh sifat magnetiknya sendiri.

Solusi medan listrik untuk gelombang elektromagnetik dapat ditulis dalam bentuk gelombang sinusoidal sebagai:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (2.9)$$

di mana \mathbf{E}_0 adalah amplitudo medan listrik yang menentukan intensitas cahaya, ω adalah frekuensi sudut gelombang medan listrik dengan hubungan $\omega = 2\pi f$, dan

t adalah waktu. Persamaan ini menunjukkan bagaimana medan listrik berosilasi dalam ruang dan waktu (Shin, 2019).

Pada interaksi dengan nanopartikel logam, gelombang elektromagnetik yang datang akan menghasilkan medan listrik osilasi yang memaksa elektron bebas pada permukaan nanopartikel untuk ikut berosilasi. Osilasi ini digambarkan oleh faktor eksponensial kompleks $e^{-i\omega t}$, yang menunjukkan osilasi sinusoidal dari medan listrik. Ketika gelombang elektromagnetik mengenai permukaan nanopartikel, medan listrik eksternal berinteraksi dengan elektron bebas, menyebabkan terjadinya pergerakan osilasi elektron dalam material.

Jika frekuensi gelombang elektromagnetik (ω) sesuai dengan frekuensi resonansi nanopartikel, maka akan terjadi resonansi LSPR. Pada kondisi ini, osilasi elektron diperkuat, menciptakan medan listrik yang lebih intens di sekitar nanopartikel.

Dalam medium konduktif, sifat material mempengaruhi perambatan gelombang elektromagnetik, di mana permitivitas kompleks memainkan peran dalam menentukan bagaimana medan listrik merambat atau mengalami atenuasi di dalam material. Konstanta dielektrik (ϵ) menjadi parameter kompleks, yang ditulis sebagai:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{i\sigma(\omega)}{\omega\epsilon_0} \quad (2.10)$$

di mana di mana ϵ_{∞} adalah permitivitas material pada frekuensi tinggi, $\sigma(\omega)$ adalah konduktivitas kompleks material, ω adalah frekuensi sudut, dan ϵ_0 adalah permitivitas vakum. Nilai $\epsilon(\omega)$ terdiri dari bagian nyata $Re(\epsilon)$, yang

menggambarkan penyimpanan energi dalam medan listrik, dan bagian imajiner $Im(\epsilon)$, yang menunjukkan disipasi energi dalam bentuk panas akibat konduktivitas material (Amir et al., 2015).

Pada frekuensi tertentu, permitivitas kompleks $\epsilon(\omega)$ dapat berubah sedemikian rupa hingga mencapai resonansi LSPR. Resonansi ini terjadi ketika bagian nyata ($Re(\epsilon)$) dan $\epsilon(\omega)$ mendekati nol, yang menyebabkan penguatan medan lokal di sekitar nanopartikel logam.

Bagian nyata dari konstanta dielektrik ($Re(\epsilon)$) menggambarkan respon dielektrik murni material, yaitu bagaimana medan listrik distabilkan dalam material tersebut. Ketika $Re(\epsilon) \approx 0$, medan listrik dan gelombang elektromagnetik tidak sepenuhnya distabilkan, sehingga memungkinkan terjadinya osilasi elektron bebas pada permukaan nanopartikel. Kondisi ini memicu resonansi plasmonik, yang meningkatkan respons optik nanopartikel.

Dalam medium konduktif, persamaan gelombang elektromagnetik mengalami modifikasi karena pengaruh konduktivitas material terhadap perambatan gelombang. Persamaan gelombang untuk medan listrik (\mathbf{E}) dalam medium ini dituliskan sebagai:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left[\epsilon_\infty + \frac{i\sigma(\omega)}{\omega \epsilon_0} \right] = -\mu_0 \epsilon \omega^2 \mathbf{E} \quad (2.11)$$

Di mana ∇^2 adalah operator Laplace, yang menggambarkan bagaimana medan listrik berubah secara spasial dalam suatu medium, μ_0 adalah permeabilitas vakum, $\epsilon(\omega)$ adalah konstanta dielektrik kompleks, ω adalah frekuensi sudut gelombang elektromagnetik, dan \mathbf{E} adalah medan listrik yang bergantung pada ruang dan waktu.

Persamaan 2.11 menunjukkan bahwa medan listrik dalam suatu medium tidak hanya dipengaruhi oleh medan eksternal, tetapi juga oleh sifat intrinsik material, seperti permitivitas dan konduktivitasnya. Konstanta dielektrik kompleks $\epsilon(\omega)$ dalam persamaan ini terdiri dari bagian nyata, yang menggambarkan kapasitas penyimpanan energi medan listrik dalam material, dan bagian imajiner, yang merepresentasikan disipasi energi dalam bentuk panas akibat osilasi elektron bebas.

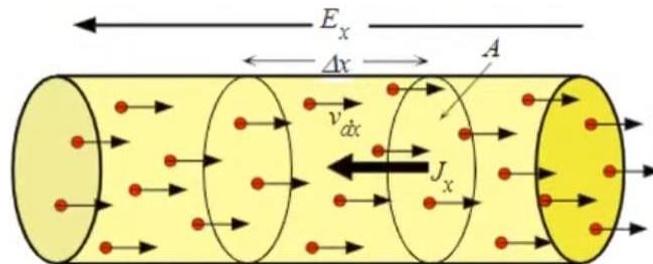
Dalam LSPR, persamaan 2.11 digunakan untuk menjelaskan bagaimana gelombang elektromagnetik berinteraksi dengan elektron bebas dalam nanopartikel logam. Resonansi terjadi ketika $\epsilon(\omega)$ memenuhi kondisi tertentu, yaitu bagian real $Re(\epsilon)$ mendekati nol, yang memungkinkan elektron bebas beresonansi dengan amplitudo maksimum. Efek konduktivitas $\sigma(\omega)$ menunjukkan bagaimana medan elektromagnetik mempengaruhi osilasi elektron, menciptakan medan lokal yang diperkuat di sekitar nanopartikel dan membentuk *hot spots*.

Resonansi ini juga dipengaruhi oleh sifat material, seperti permitivitas tinggi (ϵ_∞) dan konduktivitas $\sigma(\omega)$, serta lingkungan di sekitar nanopartikel (indeks bias medium). Akibatnya, terjadi penguatan medan listrik lokal. Persamaan 2.11 juga menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik dalam medium konduktif akan mengalami peredaman, yang ditentukan oleh sifat konduktif material (Tushar et al, 2024).

2.3.2 Teori Drude Elektron

Teori Drude Elektron merupakan salah satu model fundamental yang digunakan untuk memahami fenomena optik pada partikel logam. Model ini menjelaskan bagaimana elektron bebas dalam logam berinteraksi dengan medan

elektromagnetik. Teori ini menjelaskan bahwa elektron dalam logam dianggap sebagai gas elektron bebas yang bergerak di dalam kisi ion logam, dengan interaksi yang dapat dianalisis menggunakan konsep konduktivitas dan respon terhadap medan listrik.



Gambar 2.6 Ilustrasi Teori Drude Elektron (Djuhana, 2020)

Gambar 2.6 menjelaskan Teori Drude Elektron, yang digunakan untuk memahami perilaku elektron dalam logam. Logam direpresentasikan sebagai silinder panjang, di mana elektron bebas (ditunjukkan sebagai titik-titik merah) bergerak secara acak seperti gas. Ketika medan listrik E_x diterapkan sepanjang logam, elektron mulai bergerak secara sistematis berlawanan arah medan, membentuk arus listrik J_x . Gaya yang bekerja pada elektron dapat dijelaskan melalui persamaan:

$$m_e \frac{dv}{dt} + m_e \Gamma \mathbf{v} = e\mathbf{E} \quad (2.12)$$

Di sini, m_e adalah massa elektron, dv/dt adalah percepatan, dan $e\mathbf{E}$ adalah gaya listrik akibat medan. Komponen $m_e \frac{dv}{dt}$ merupakan gaya inersia yang menggambarkan perubahan kecepatan elektron bebas akibat medan listrik, sedangkan komponen $m_e \Gamma \mathbf{v}$ menggambarkan gaya hambat yang disebabkan oleh tumbukan elektron dengan ion-ion dalam logam. Persamaan ini menunjukkan

keseimbangan antara gaya pendorong akibat medan listrik (eE) dan gaya hambat dari tumbukan ($me\Gamma v$). Akibat tumbukan, elektron mencapai kecepatan drift rata-rata (v), yang menentukan laju arus listrik dalam material. Teori Drude Elektron ini menyederhanakan perilaku elektron di logam, menjelaskan fenomena seperti konduktivitas listrik dan hambatan, dengan asumsi bahwa elektron bergerak seperti gas bebas tetapi terhambat oleh interaksi dengan ion-ion logam (Djuhana, 2020).

Medan listrik E pada fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) berasal dari medan elektromagnetik yang berinteraksi dengan nanopartikel logam. Elektron bebas dalam nanopartikel ini berosilasi melawan medan elektromagnetik tersebut. Medan E bertindak sebagai gaya pemaksa yang mendorong elektron untuk berosilasi dengan frekuensi medan elektromagnetik. Dalam fenomena ini, parameter $me\Gamma v$ atau efek damping menentukan lebar spektrum resonansi LSPR. Semakin besar damping (Γ), semakin lebar spektrum resonansi, yang menunjukkan energi osilasi elektron semakin cepat hilang karena disipasi.

Kecepatan drift, yaitu gerakan rata-rata elektron menuju arah tertentu akibat pengaruh medan listrik harmonik sinusoidal, yang merupakan medan listrik dengan osilasi teratur mengikuti pola sinus atau kosinus, dinyatakan sebagai:

$$v = v_0 e^{-i\omega t} \quad (2.13)$$

Rumus 2.13 ini menjelaskan kecepatan drift dalam bentuk kompleks, di mana medan listrik eksternal dinyatakan sebagai di mana medan listrik eksternal dinyatakan sebagai $E = E_0 e^{-i\omega t}$. Faktor $e^{-i\omega t}$ menunjukkan bahwa kecepatan drift elektron berosilasi dengan frekuensi sudut (ω) yang sama dengan medan listrik

eksternal. Osilasi ini menggambarkan bagaimana elektron merespons medan listrik dengan gerakan teratur yang dipengaruhi oleh pola osilasi medan tersebut.

Amplitudo kecepatan drift, yaitu nilai maksimum dari kecepatan drift elektron akibat medan listrik eksternal, diberikan oleh:

$$\mathbf{v}_0 = \frac{e}{m_e \Gamma - i\omega m_e} \mathbf{E}_0 \quad (2.14)$$

Dalam rumus ini, e adalah muatan elektron, yang mencerminkan respons partikel bermuatan terhadap medan listrik eksternal, dan m_e adalah massa elektron, yang memengaruhi inersia elektron dalam merespons gaya eksternal. Parameter Γ , atau konstanta damping, mencerminkan energi yang hilang akibat tumbukan elektron dengan ion atau atom dalam logam, yang menentukan lebar resonansi dalam fenomena LSPR, sedangkan \mathbf{E}_0 , amplitudo medan listrik eksternal, memberikan dorongan utama untuk memulai dan mendukung osilasi elektron (Noer & Dayana, 2021).

Dalam fenomena *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR), kecepatan drift (\mathbf{v}) dari elektron-elektron yang berosilasi terjadi sesuai dengan medan listrik eksternal, dengan frekuensinya ditentukan oleh ω . Resonansi plasmonik terjadi ketika frekuensi medan eksternal (ω) mendekati frekuensi alami osilasi elektron dalam logam, yang dipengaruhi oleh massa dan muatan elektron serta sifat redaman logam. Pada kondisi resonansi, amplitudo kecepatan drift (\mathbf{v}_0) mencapai nilai maksimum karena medan listrik eksternal secara optimal “mendorong” osilasi plasmonik.

Lebar spektrum resonansi sangat dipengaruhi oleh konstanta damping (Γ), yang mencerminkan tingkat redaman dalam sistem. Semakin kecil nilai Γ , resonansi menjadi lebih tajam, menghasilkan penguatan medan elektromagnetik lokal yang lebih signifikan. Sebaliknya, semakin besar nilai Γ , resonansi menjadi lebih lebar karena energi osilasi lebih cepat hilang akibat disipasi.

Kerapatan arus listrik (\mathbf{j}) dalam material diberikan oleh:

$$\mathbf{j} = en\mathbf{v} = \sigma(\omega)\mathbf{E}_0 \quad (2.15)$$

Dengan konduktivitas listrik kompleks sebagai fungsi frekuensi:

$$\sigma(\omega) = \frac{ne^2}{m_e\Gamma - i\omega m_e} \quad (2.16)$$

Rumus 2.15 menggambarkan bagaimana elektron bebas dalam nanopartikel logam bereaksi terhadap medan elektromagnetik eksternal. Kerapatan arus listrik (\mathbf{j}) adalah jumlah muatan listrik per satuan waktu yang melewati suatu penampang, yang bergantung pada medan listrik eksternal (\mathbf{E}_0) dan konduktivitas listrik material ($\sigma(\omega)$). Pada persamaan ini, en adalah muatan total elektron bebas per satuan volume, di mana n merepresentasikan densitas elektron bebas, e adalah muatan elektron, dan \mathbf{v} adalah kecepatan drift elektron. Amplitudo medan listrik eksternal (\mathbf{E}_0) bertindak sebagai gaya pendorong untuk menghasilkan arus listrik dalam material.

Rumus 2.16 menunjukkan bahwa konduktivitas listrik kompleks ($\sigma(\omega)$) menggambarkan bagaimana elektron bebas merespons medan listrik pada frekuensi tertentu (ω). Parameter ini memiliki dua komponen; bagian nyata ($\text{Re}(\sigma(\omega))$), yang

terkait dengan energi yang hilang akibat redaman, dan bagian imajiner ($\text{Im}(\sigma(\omega))$), yang menggambarkan energi yang disimpan dan dilepaskan kembali dalam resonansi plasmonik, dengan konstanta damping (Γ) sebagai faktor utama. Frekuensi medan listrik eksternal (ω), konsentrasi elektron bebas (n), muatan elektron (e), massa elektron (m_e), dan konstanta damping (Γ) bersama-sama memengaruhi bagaimana konduktivitas listrik kompleks berubah pada frekuensi tertentu.

Dalam fenomena LSPR, medan elektromagnetik eksternal menyebabkan osilasi elektron bebas dalam nanopartikel logam. Amplitudo osilasi ini menghasilkan kerapatan arus listrik (\mathbf{j}) yang bergantung pada konduktivitas listrik kompleks ($\sigma(\omega)$), yaitu respons material terhadap medan eksternal. Konduktivitas listrik kompleks ($\sigma(\omega)$) mencapai nilai maksimum pada frekuensi (ω) yang mendekati frekuensi alami osilasi plasmonik. Pada frekuensi ini, bagian imajiner dari ($\sigma(\omega)$) menjadi signifikan, yang menunjukkan bahwa energi elektromagnetik eksternal disimpan dalam bentuk osilasi plasmonik. Respons ini menentukan efisiensi interaksi antara medan eksternal dengan material.

Model ini menggambarkan hubungan antara konstanta dielektrik kompleks ϵ_m dengan medan listrik eksternal yang dikenakan pada logam. Secara matematis, hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} - i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega^3 + \Gamma^2 \omega} \quad (2.17)$$

di mana $\omega_p = \sqrt{Ne^2/\epsilon_0 m}$ merupakan frekuensi plasma yang bergantung pada kerapatan pembawa muatan N , muatan elektron e , serta massa efektif elektron m .

Sementara itu, Γ merupakan frekuensi redaman yang menggambarkan laju gangguan gerakan elektron akibat tumbukan dengan ion atau elektron lainnya. Redaman ini dapat dihitung berdasarkan aturan Matthiessen sebagai:

$$\Gamma = \sum_j / \tau_j \quad (2.18)$$

Dengan τ_j sebagai waktu relaksasi akibat mekanisme tumbukan yang berbeda (Locarno & Brinks, 2023).

Untuk memperhitungkan pengaruh latar belakang ion dalam logam, model Drude diperluas dengan menambahkan konstanta inti $\epsilon_{m,\infty}$, sehingga konstanta dielektrik kompleks menjadi:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_{m,\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} - i \frac{\omega_p^2 \Gamma}{\omega^3 + \Gamma^2 \omega} \quad (2.19)$$

Atau singkatnya dapat dituliskan sebagai:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma} \quad (2.20)$$

Di mana $\epsilon(\omega)$ adalah konstanta dielektrik kompleks yang menggambarkan respons material terhadap medan elektromagnetik pada frekuensi tertentu (ω), ϵ_∞ adalah konstanta dielektrik pada frekuensi sangat tinggi, yang merepresentasikan respons elektronik murni tanpa adanya fenomena osilasi kolektif, ω_p adalah frekuensi plasma elektron, yang menggambarkan frekuensi osilasi kolektif elektron dalam bahan, Γ adalah konstanta damping atau frekuensi tumbukan yang menunjukkan tingkat kehilangan energi atau pengaruh penghambatan terhadap gerakan electron (Locarno & Brinks, 2023).

Rumus 2.17 menunjukkan bagaimana bahan berinteraksi dengan medan elektromagnetik seiring perubahan frekuensi. Pada frekuensi rendah, efek osilasi kolektif elektron (plasma) menjadi lebih dominan, sementara pada frekuensi tinggi, respons material akan didominasi oleh efek elektronik murni, yang tercermin dalam nilai ϵ_∞ . Model ini penting untuk memahami sifat dielektrik material konduktif atau semikonduktif dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam fenomena seperti LSPR, di mana interaksi dengan medan elektromagnetik bergantung pada frekuensi gelombang yang diterapkan (Nuryadin, 2020).

Konstanta damping (Γ) menggambarkan bagaimana energi elektron “hilang” karena tumbukan dengan ion atau ketidaksempurnaan dalam bahan. Semakin besar nilai Γ , semakin tinggi disipasi energi yang terjadi. Hal ini berpengaruh pada seberapa efisien elektron dapat bergerak dalam bahan, dan seiring meningkatnya Γ , resistivitas (kemampuan untuk menahan aliran arus listrik) dan penghambatan terhadap aliran elektron juga akan meningkat. Parameter ini sangat penting dalam menentukan konduktivitas material pada frekuensi tertentu, terutama dalam bahan konduktif dan semikonduktif. Frekuensi plasma elektron (ω_p) menggambarkan sifat intrinsik (sifat bawaan material yang tidak bergantung pada ukuran, bentuk, atau jumlahnya) bahan berdasarkan kerapatan elektron bebas (n), massa elektron (m_e), dan konstanta dielektrik vakum (ϵ_0). Frekuensi plasma ini terkait dengan osilasi kolektif elektron dalam bahan yang terjadi ketika elektron bergerak secara serempak sebagai respons terhadap medan eksternal. Nilai ω_p sangat menentukan respons bahan terhadap gelombang elektromagnetik, terutama dalam fenomena plasmonik dan LSPR, di mana interaksi dengan gelombang elektromagnetik bergantung pada frekuensi tertentu yang diterapkan pada material (Yu et al, 2024).

2.3.3 Mie Theory

Mie Theory adalah teori klasik yang dikembangkan oleh Gustav Mie pada tahun 1908 untuk memodelkan interaksi cahaya dengan partikel bulat. Teori ini memberikan solusi lengkap untuk memprediksi penghamburan dan penyerapan cahaya oleh partikel-partikel dengan berbagai ukuran. Mie Theory sangat relevan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang nanoteknologi, plasmonik, dan fotonik, karena dapat menjelaskan interaksi resonansi antara cahaya dan nanopartikel (Akimov, 2024).

Dalam penelitian ini, Mie Theory digunakan untuk memodelkan fenomena LSPR pada nanopartikel emas dan perak yang digunakan untuk mendeteksi gelatin. Fenomena LSPR sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan sekitar partikel, seperti perubahan indeks refraktif akibat interaksi dengan molekul biomolekul tertentu. Teori Mie memungkinkan untuk menghitung penghamburan dan penyerapan cahaya yang terjadi ketika nanopartikel berinteraksi dengan cahaya pada panjang gelombang tertentu (Akimov 2024).

Jurnal yang ditinjau mengungkapkan bahwa Mie Theory menguraikan medan elektromagnetik menjadi komponen *Transverse Magnetic* (TM) dan *Transverse Electric* (TE), yang dipecah dalam bentuk harmonik bola. Dengan analisis ini, resonansi yang terjadi pada nanopartikel dapat dijelaskan sebagai hasil dari interferensi antara medan hamburan yang dihasilkan oleh arus internal partikel (*current-sourced*) dan medan yang tidak dipengaruhi oleh arus (*current-free*) (Akimov, 2024).

Rumus ekstinsi (Q_{ext}) yang mencakup semua cahaya yang dihamburkan dan diserap oleh partikel diberikan oleh:

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca} \quad (2.23)$$

Ekstinsi (Q_{ext}) menggambarkan total interaksi cahaya dengan partikel, termasuk komponen yang diserap (*absorption*) dan dihamburkan (*scattering*). Absorpsi menggambarkan jumlah cahaya yang benar-benar diserap oleh partikel tanpa dipantulkan atau diteruskan ke medium sekitarnya, sedangkan menggambarkan intensitas hamburan cahaya (Djuhana, 2021).

Mie Theory digunakan untuk memprediksi respons optik nanopartikel emas dan perak yang terpapar pada molekul. Perubahan indeks refraktif yang terjadi saat gelatin berikatan dengan permukaan nanopartikel dapat menyebabkan pergeseran resonansi LSPR, yang dapat dihitung menggunakan koefisien hamburan Mie. Dengan demikian, teori ini membantu dalam mendeskripsikan pengukuran dan analisis spektrum optik yang dihasilkan oleh interaksi cahaya dengan nanopartikel pada panjang gelombang yang sesuai (Akimov, 2024).

2.3.4 Aplikasi LSPR dalam Biosensor

Biosensor berbasis LSPR merupakan alat yang mengubah informasi biologis menjadi sinyal yang dapat diukur, dengan aplikasi yang semakin berkembang. Salah satu aplikasi biosensor LSPR adalah dalam deteksi protein biomarker, seperti free prostate specific antigen (f-PSA). Biosensor ini dapat mendeteksi f-PSA dengan sensitivitas tinggi hingga 100 fg/mL, mendukung diagnosis dini kanker prostat melalui penggunaan antibodi spesifik (sanders et al., 2014). Selain itu, LSPR dapat digunakan untuk menganalisis interaksi protein secara kuantitatif dengan

memanfaatkan nanopartikel emas yang disusun sendiri. Teknik ini menciptakan permukaan optimal untuk mendeteksi dan mengukur interaksi biomolekul, sehingga memperkuat potensi LSPR dalam pengembangan biosensor yang lebih efektif untuk analisis biomolekul dan aplikasi diagnostik (Flesch et al., 2020).

LSPR juga menunjukkan potensi dalam aplikasi deteksi DNA, di mana biosensor dapat dirancang untuk mendeteksi hybridisasi DNA dengan sensitivitas tinggi. Dengan menggunakan nanopartikel emas yang difungsikan dengan DNA, biosensor ini dapat mengenali urutan spesifik dari DNA target, yang sangat penting dalam diagnostik genetik dan penelitian kanker (Soares et al., 2014). Keuntungan dari pendekatan ini adalah kemampuannya untuk memberikan hasil secara real-time dan tanpa label, yang mempercepat proses deteksi (Kaye et al., 2018).

2.3.5 Refraktometer

Refraktometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur indeks bias suatu cairan (Bhalla & Shen, 2024). Indeks bias (*refractive index*) adalah perbandingan kecepatan cahaya di ruang hampa dengan kecepatan cahaya di dalam medium tertentu. Indeks bias umumnya digunakan untuk mengkarakterisasi sampel cair, seperti halnya titik lebur digunakan untuk mengkarakterisasi senyawa padat. Saat cahaya berpindah dari satu medium ke medium lainnya, kecepatan dan arah cahaya berubah. Fenomena ini disebut dengan refraksi (Ugwu et al., 2018).

Dalam konsep LSPR, refraktometer dimanfaatkan untuk mengukur perubahan indeks bias akibat interaksi antara cahaya dengan nanopartikel logam yang dilapisi biomolekul, untuk dianalisis pergeseran panjang gelombang resonansinya. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip pembiasan cahaya, di mana cahaya akan mengalami

pembelokan saat melewati permukaan batas antara dua media dengan kepadatan berbeda. Sudut pembiasan ini bergantung pada perbedaan indeks bias antara kedua media tersebut (Wibowo, 2024). Menariknya, Al-Qur'an juga menjelaskan peran cahaya dalam menunjukkan sesuatu yang tidak terlihat, sebagaimana disebutkan dalam surat An-Nur ayat 40:

إِذَا أَخْرَجَ يَدَهُ لَمْ يَكَدْ يَرِبْهَا وَمَنْ لَمْ يُجْعَلِ اللَّهُ لَهُ نُورًا فَمَا لَهُ مِنْ نُّورٍ

Artinya: “Apabila seseorang mengeluarkan tangannya, niscaya dia tidak dapat melihatnya. Barang siapa yang tidak diberi cahaya oleh Allah, maka dia tidak memiliki cahaya.” (Q.S. An-Nūr (24): 40).

Berdasarkan ayat tersebut, cahaya memiliki peran penting dalam proses penglihatan manusia. Selain itu, sifat-sifat cahaya dapat dipelajari dan dimanfaatkan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk dalam pengembangan teknologi yang mempermudah pekerjaan manusia (Meiliyadi et al., 2024).

Jika ditinjau dari makna ayatnya, ayat ini menggambarkan ketiadaan cahaya yang menyebabkan seseorang tidak dapat melihat apa pun. Hal ini dapat menjadi kiasan bahwa tanpa cahaya, pengamatan tidak dapat dilakukan. Prinsip yang sama diterapkan dalam penelitian ini, di mana cahaya yang diberikan pada larutan gelatin mengalami pembiasan, sehingga memungkinkan pengukuran indeks biasnya menggunakan refraktometer.

2.4 Metallic Nanoparticles Boundary Element Method (MNPBEM)

2.4.1 Boundary Element Method (BEM)

BEM (*Boundary Element Method*) adalah metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah rekayasa dan ilmiah, termasuk analisis

getaran alami sistem pelat yang terendam cairan. BEM berakar pada teori potensi yang dikembangkan oleh Kellogg, dan selanjutnya diperluas oleh Kupradze dan Michlin, yang menciptakan persamaan integral batas multidimensional untuk teori elastisitas. Ini memberikan dasar bagi penerapan langsung persamaan integral dalam masalah potensi statis (Guminiak et al, 2023).

BEM beroperasi dengan mengurangi dimensi masalah dengan menggantikan volume elemen dengan elemen batas, yang menyederhanakan analisis. Hal ini memungkinkan evaluasi lebih efisien terhadap masalah yang melibatkan kondisi batas kompleks, seperti *crack propagation* dalam struktur yang lebih rumit (Chen et al., 2024).

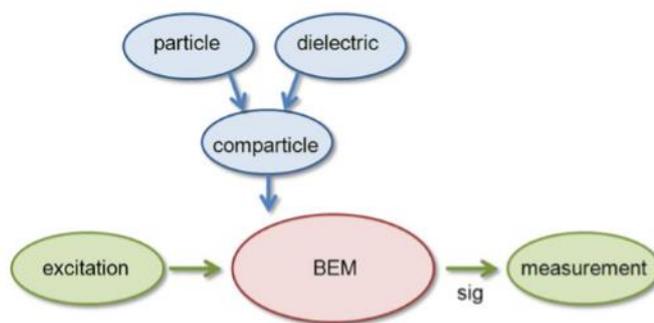
Keunggulan BEM meliputi karakteristik reduksi dimensi, kemudahan dalam penggambaran perilaku singular di dekat *crack tip*, serta formulasi yang lebih tepat dalam menangani interaksi elastis. Metode ini juga lebih efisien dalam menyelesaikan masalah yang melibatkan batasan geometris yang kompleks, sehingga sering dipilih untuk analisis mekanik yang memerlukan akurasi tinggi (Chen et al., 2024).

2.4.2 MNPBEM

MNPBEM (*Metallic Nanoparticles Boundary Element Method*) adalah *toolbox* berbasis MATLAB yang digunakan untuk simulasi optik nanopartikel, khususnya dalam konteks plasmonik dan resonansi lokal permukaan (LSPR). Toolbox ini memanfaatkan metode elemen batas (*Boundary Element Method*, BEM) untuk menghitung interaksi antara cahaya dan nanopartikel dalam geometri kompleks, seperti nanosphere. Simulasi ini berguna dalam memodelkan penampang

hamburan dan penyerapan nanopartikel logam seperti emas dan perak dengan memecahkan persamaan elektromagnetik dalam batas kuasi-elektrostatik (Bonatti et al., 2020).

MNPBEM menggunakan persamaan Maxwell untuk menghitung interaksi antara nanopartikel dan medan elektromagnetik eksternal. Ini melibatkan eksitasi oleh gelombang datar dan dipole yang dapat menciptakan medan elektromagnetik di batas nanopartikel logam. 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 cross sections*). 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) (Gezgin et al, 2020).



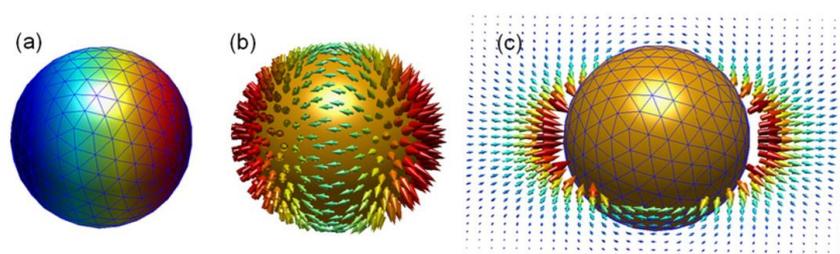
Gambar 2.7 Bagan alir untuk simulasi BEM yang umum

Gambar 2.7 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 sesuai dengan 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 untuk memahami perilaku 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 2.8 berikut.

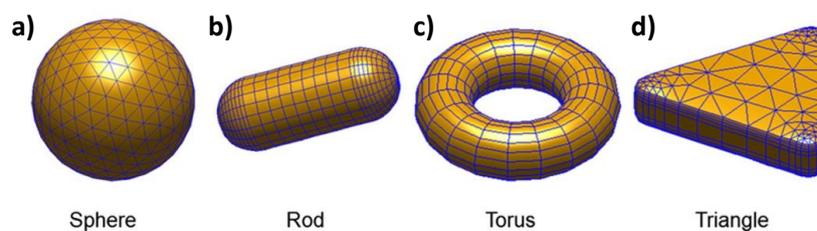


Gambar 2.8 Hasil simulasi BEM: (a) distribusi muatan permukaan σ_i , dan bagian riil dari medan listrik yang terinduksi pada (b) batas partikel serta (c) di area lain. Dalam simulasi ini (pada file `demo fieldstat.m` untuk detailnya),

menggunakan eksitasi gelombang bidang terhadap nanopartikel emas dengan diameter 10 nm yang terbenam dalam air

Pada Gambar 2.8a, distribusi muatan permukaan nanopartikel ditampilkan dengan variasi warna yang menunjukkan perbedaan muatan positif dan negatif. Ketika nanopartikel emas terkena medan listrik eksternal, elektron dalam partikel mengalami pergerakan dan menciptakan muatan permukaan, yang berperan dalam interaksi dengan gelombang cahaya yang datang. Selanjutnya, pada Gambar 2.8b, medan listrik yang terbentuk di sekitar nanopartikel digambarkan menggunakan garis-garis kecil yang menunjukkan arah medan yang terinduksi. Hal ini menggambarkan bagaimana elektron dalam nanopartikel berosilasi akibat interaksi dengan cahaya, yang merupakan prinsip utama dalam fenomena plasmonik. Pada Gambar 2.8c, terlihat bahwa medan listrik ini tidak hanya terbatas pada permukaan nanopartikel, tetapi juga menyebar ke medium sekitarnya, menunjukkan bagaimana nanopartikel emas dapat digunakan dalam sensor optik dan biosensing. Perubahan medan listrik yang terjadi memungkinkan deteksi kondisi lingkungan sekitar nanopartikel, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi berbasis deteksi optik yang presisi. Dengan memahami bagaimana medan listrik dan muatan permukaan terbentuk melalui simulasi ini, peneliti dapat merancang nanopartikel yang lebih efisien untuk berbagai aplikasi teknologi nano, termasuk deteksi biomolekul, sensor optik, dan pengembangan material plasmonik canggih.

Selain itu, berbagai bentuk nanopartikel telah dikaji dalam simulasi ini menggunakan MNPBEM *toolbox*, seperti yang ditunjukkan dalam gambar berikut:



Gambar 2.9 Diskritisasi berbagai bentuk nanopartikel yang ada pada MNPBEM *toolbox*

Gambar 2.9 menunjukkan berbagai bentuk partikel yang telah diskritisasi menggunakan MNPBEM *toolbox*, yaitu *nanosphere* (Gambar 2.9a), nanorod (Gambar 2.9b), torus (Gambar 2.9c), dan nanoprisma (Gambar 2.9d). Meskipun berbagai bentuk dapat dimodelkan dalam simulasi ini, hanya *nanosphere* (Gambar 2.9a) yang digunakan, karena karakteristik optiknya yang lebih seragam dan mudah dianalisis dibandingkan bentuk lainnya.

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 atau nanoprisma.

Distribusi medan listrik di sekitar *nanosphere* dalam pendekatan persamaan Maxwell penuh dapat dihitung menggunakan persamaan Helmholtz untuk potensial skalar dan vektor:

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -4\pi\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (2.24)$$

dengan:

$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ = fungsi Green untuk propagasi gelombang elektromagnetik

\mathbf{r}, \mathbf{r}' = posisi dalam ruang

k = bilangan gelombang dalam medium, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\delta(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ = fungsi delta Dirac

Potensial skalar dan vektor akibat eksitasi medan luar diberikan oleh:

$$\phi(\mathbf{r}) = \phi_{ext}(\mathbf{r}) + \oint_{\partial V} G(\mathbf{r}, \mathbf{s})\sigma(\mathbf{s})da \quad (2.25)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mathbf{A}_{ext}(\mathbf{r}) + \oint \partial V G(\mathbf{r}, \mathbf{s})\mathbf{h}(\mathbf{s})da \quad (2.26)$$

Medan listrik dan magnetik yang diinduksi kemudiandiperoleh dari hubungan:

$$\mathbf{E} = ik\mathbf{A} - \nabla\phi \quad (2.27)$$

$$\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.28)$$

Interaksi medan dengan *nanosphere* dipengaruhi oleh parameter dielektrik $\epsilon(\omega)$, yang menentukan resonansi plasmonik berdasarkan solusi batas untuk distribusi muatan dan arus permukaan. Dengan menyelesaikan persamaan ini menggunakan BEM, distribusi medan elektromagnetik di sekitar *nanosphere* dapat ditentukan secara numerik. Setelah medan elektromagnetik diketahui, *scattering cross section* (σ_{sca}) dan *extinction cross section* (σ_{ext}) dapat dihitung. *Scattering cross section* diperoleh dari fluks medan Poynting yang dipancarkan oleh partikel melalui rumus:

$$\sigma_{sca} = \frac{1}{I_{inc}} \int_S \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.29)$$

dengan:

σ_{sca} = *scattering cross section*

I_{inc} = intensitas medan insiden

$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)$ = vektor Poynting

$d\mathbf{A}$ = elemen luas permukaan *nanosphere*

Extinction cross section dihitung dari medan listrik insiden dan medan terinduksi

dalam partikel:

$$\sigma_{ext} = \frac{k}{\epsilon_0} \int_S \text{Im}(\mathbf{E}^* \cdot \mathbf{P}) dA \quad (2.30)$$

dengan:

σ_{ext} = *extinction cross section*

ϵ_0 = permitivitas vakum

\mathbf{P} = polarisasi dipol dalam nanopartikel

Dari sini, *absorption cross section* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\sigma_{abs} = \sigma_{ext} - \sigma_{sca} \quad (2.31)$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Menurut Kasiram (2017), Penelitian kuantitatif adalah suatu proses menemukan pengetahuan yang menggunakan data berupa angka sebagai alat menganalisis keterangan mengenai apa yang ingin diketahui. Metode yang digunakan secara lebih spesifik adalah metode komputasi menggunakan *boundary element method* (BEM) dengan memanfaatkan *MNPBEM toolbox* yang dijalankan pada aplikasi MATLAB.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian berjudul “Deteksi Gelatin Sapi dan Babi dengan *Nanosphere Au* (Emas) dan Ag (Perak) Berbasis *Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR)* Menggunakan *Metallic Nanoparticles Boundary Element Method (MNPBEM)*” ini dimulai pada bulan Oktober 2024 di Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Alat yang diperlukan pada penelitian ini antara lain:

A. Peralatan untuk pengukuran indeks bias

1. Refraktometer Abbe
2. *Glass beaker*
3. Pipet
4. Neraca digital

5. *Hot plate*

6. Sarung tangan

B. Peralatan untuk simulasi

1. Laptop

2. MATLAB (R2011a)

3. MNPBEM *toolbox*

4. *Software* Excel

3.3.2 Bahan

Bahan yang diperlukan pada penelitian ini antara lain:

1. Gelatin sapi

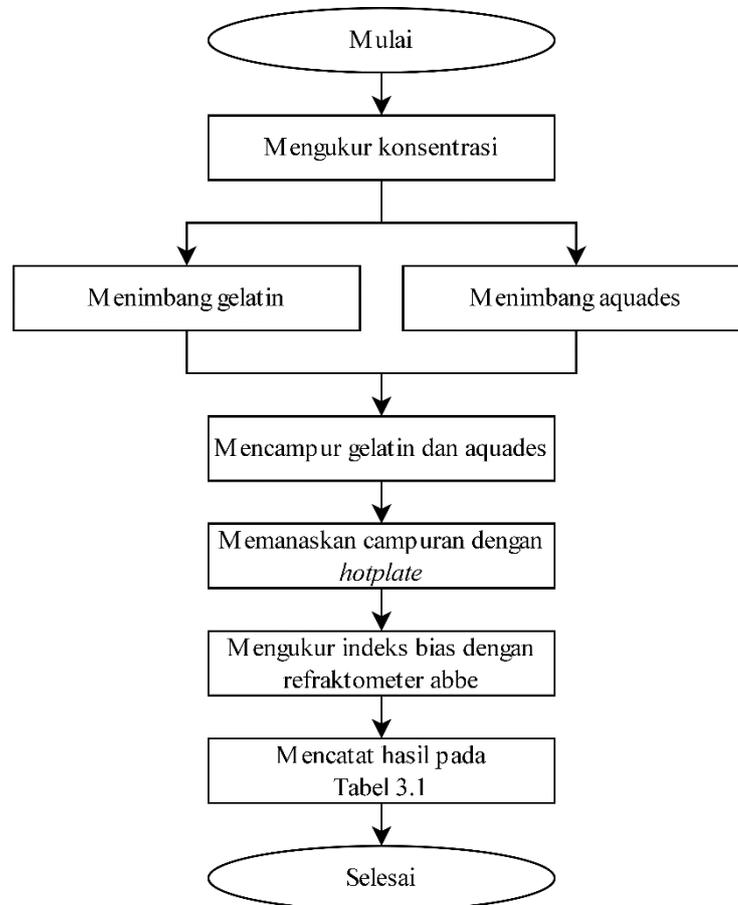
2. Gelatin babi

3. Aquades

3.4 Diagram Alir Penelitian

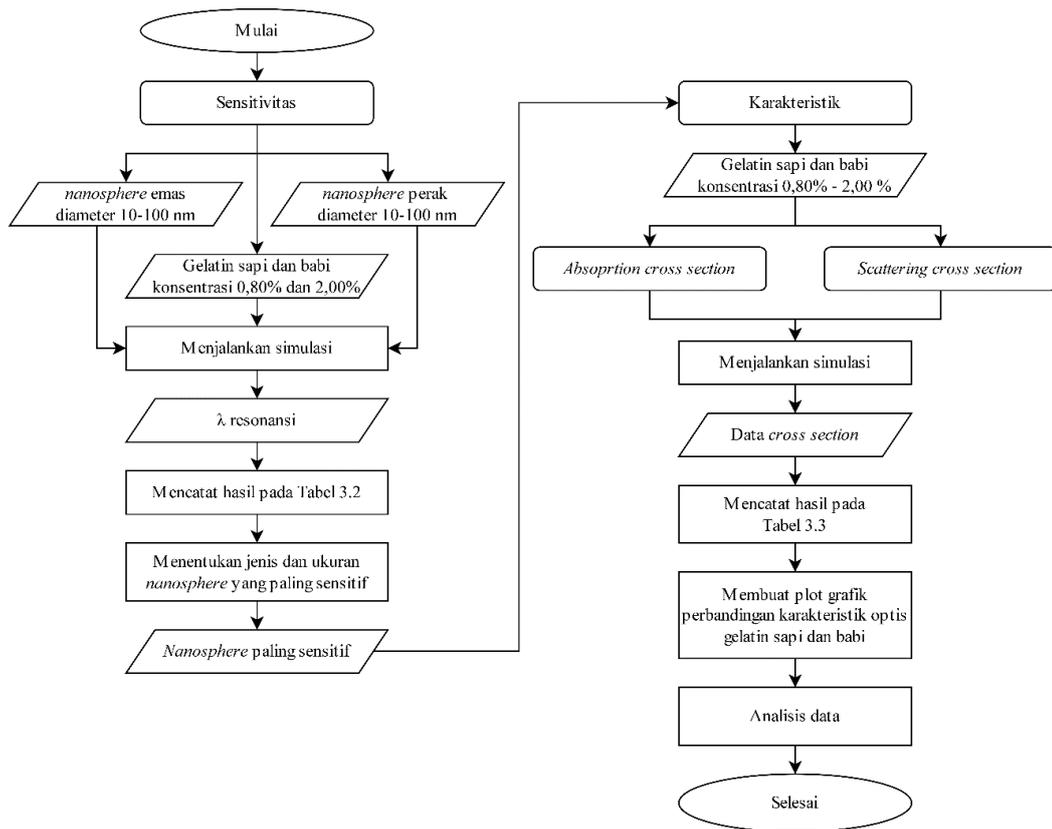
Berikut diagram alir untuk penelitian ini:

1. Diagram alir pada pengukuran indeks bias



Gambar 3.1 Diagram alir pengukuran indeks bias

2. Diagram alir pada simulasi



Gambar 3.2 Diagram alir simulasi

3.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode komputasi dengan pendekatan *Boundary Element Method* (BEM) untuk memodelkan fenomena LSPR pada nanopartikel yang berinteraksi dengan gelatin. Terdapat beberapa proses yang dilakukan pada penelitian ini, diantaranya yaitu:

3.5.1 Pengumpulan Data

Data input yang diperlukan pada penelitian ini berkaitan dengan karakteristik dari material nanopartikel dan medium yang diteliti, yaitu parameter optis gelatin berupa indeks bias yang diukur menggunakan alat Refraktometer Abbe, fungsi

dielektrik dari material, bentuk dan diameter dari nanopartikel, serta nilai panjang gelombang elektromagnetik.

3.5.2 Pengukuran Indeks Bias

1. Menimbang gelatin sapi dan babi untuk konsentrasi 0,80% - 2,00% dengan interval 0,20% menggunakan neraca digital.
2. Menyesuaikan takaran aquades dengan masing-masing konsentrasi gelatin menggunakan neraca digital.
3. Mencampur gelatin dengan aquades pada *glass beaker*.
4. Memanaskan semua larutan gelatin menggunakan *hot plate*.
5. Menyiapkan alat Refraktometer Abbe.
6. Menggunakan pipet untuk meletakkan beberapa tetes larutan gelatin di atas prisma refraktometer.
7. Menutup prisma kemudian melihat melalui lensa untuk membaca nilai indeks bias yang tertera pada skala.
8. Mencatat nilai indeks bias serta melakukan 3 kali pengulangan pada setiap jenis dan konsentrasi gelatin yang berbeda-beda.

3.5.3 Simulasi

Simulasi menggunakan *Metallic Nanoparticles Boundary Element Method* (MNPBEM) *toolbox* pada aplikasi MATLAB. Langkah simulasi pada MNPBEM adalah sebagai berikut:

1. Mengatur indeks bias analit yaitu gelatin sapi dan babi dengan konsentrasi sebesar 0,80% - 2,00% dengan interval 0,20%.
2. Mengatur konstanta dielektrik dari jenis logam material emas dan perak.
3. Menentukan bentuk nanopartikel yaitu *nanosphere*.

2. Pengukuran nilai *absorption cross section*, *scattering cross section*, dan *extinction cross section*

Setelah indeks bias diperoleh, langkah berikutnya adalah pengambilan data *extinction cross section* pada variasi jenis dan ukuran *nanosphere* untuk pengukuran sensitivitas LSPR menggunakan indeks bias gelatin sapi dan babi konsentrasi terendah (0,80%) dan tertinggi (2,00%) dengan indeks bias udara, yang akan dihitung menggunakan rumus 2.2. Setiap data yang diperoleh dari pengukuran ini akan dicatat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Tabel untuk nilai λ resonansi pada simulasi extinction dengan variasi jenis dan ukuran nanosphere

| Diameter <i>nanosphere</i> | Gelatin | | | Udara | | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|-------------------------------|--------------------------|-------|-------------|--------------------------|-------|-------------|-----------------------|-------|
| | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | | |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | Emas | Perak |
| 10 | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | |
| 50 | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | |
| 70 | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | |
| 90 | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | |

Setelah bentuk dan ukuran yang paling sensitif didapatkan, maka dilakukan pengukuran *absorption cross section* dan *scattering cross section*, yang hasilnya akan dicatat pada tabel 3.3. Berdasarkan hasil ini, maka akan dilakukan perbandingan antara gelatin sapi dan babi dengan cara dibuat plot grafik baru.

Tabel 3.3 Tabel untuk nilai scattering cross section dan absorption cross section pada tiap jenis dan konsentrasi gelatin

| Konsentrasi | Cross section (nm ²) | | | |
|-------------|----------------------------------|------|-------------------|------|
| | <i>Absorption</i> | | <i>Scattering</i> | |
| | Sapi | Babi | Sapi | Babi |
| 0,80% | | | | |
| 1,00% | | | | |
| 1,20% | | | | |
| 1,40% | | | | |
| 1,60% | | | | |
| 1,80% | | | | |
| 2,00% | | | | |

3.7 Analisis Data

Proses simulasi menghasilkan grafik yang terdiri dari *scattering cross section* dan *absorption cross section*. Pada setiap puncak grafik yang terbentuk, nilai puncak pada sumbu x (panjang gelombang) dan y (*scattering cross section*, *absorption cross section*, atau *extinction cross section*) akan dicatat dan dimasukkan ke dalam tabel 3.2 dan tabel 3.3. Data yang diperoleh dari tabel yang telah disusun akan dibuat plot grafik baru untuk mengidentifikasi karakteristik optis gelatin sapi dan babi terhadap respon LSPR pada nanopartikel emas dan perak dengan diameter tertentu.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian terdiri dari tiga tahapan, yaitu pengujian indeks bias, simulasi sensitivitas *nanosphere* emas dan perak, serta simulasi karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section*. Setiap tahap merupakan suatu proses dalam memahami kemampuan sensor LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance*) untuk mendeteksi gelatin sapi dan babi.

Pengujian pertama dilakukan untuk menentukan nilai indeks bias gelatin sapi dan babi. Nilai indeks bias ini merupakan parameter yang memengaruhi pergeseran λ_{LSPR} . Hasil nilai indeks bias akan menjadi dasar untuk tahapan berikutnya, yaitu simulasi sensitivitas di mana simulasi ini dilakukan untuk mengidentifikasi jenis dan ukuran *nanosphere* yang paling sensitif terhadap perubahan indeks bias gelatin. Tujuan dari simulasi ini adalah menentukan geometri *nanosphere* yang optimal untuk deteksi gelatin menggunakan aplikasi sensor LSPR. Pengujian terakhir yaitu simulasi karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* untuk gelatin sapi dan babi. Hasil simulasi ini memberikan wawasan mengenai respons optik masing-masing gelatin, yang dapat dimanfaatkan untuk membedakan antara gelatin sapi dan babi berdasarkan sifat optiknya.

4.1 Pengujian Indeks Bias

Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) sangat sensitif terhadap perubahan indeks bias medium di sekitar nanopartikel logam, karena indeks bias secara langsung memengaruhi interaksi antara medan elektromagnetik dengan nanopartikel logam dalam fenomena LSPR. Indeks bias gelatin yang melapisi

nanopartikel akan menentukan bagaimana cahaya merambat dalam medium tersebut, sehingga memengaruhi posisi λ_{LSPR} . Gelatin dengan konsentrasi tertentu dibuat dan diuji menggunakan alat Refraktometer Abbe untuk mendapatkan nilai indeks bias pada setiap konsentrasi. Tahapan penelitian ini melibatkan dua langkah, yaitu pembuatan sampel gelatin dengan konsentrasi tertentu dan pengukuran indeks bias menggunakan alat Refraktometer Abbe.

4.1.1 Pengukuran Konsentrasi Gelatin

Sampel gelatin dengan berbagai konsentrasi dibuat untuk diukur indeks biasnya. Konsentrasi gelatin yang digunakan berkisar antara 0,80% hingga 2,00% dengan interval 0,20%. Sampel ini diperoleh dengan cara mencampurkan gelatin dan aquades sehingga total massa larutan menjadi 10 g untuk setiap konsentrasi. Jumlah gelatin dan aquades dihitung berdasarkan persentase konsentrasi yang diinginkan menggunakan rumus:

$$\text{konsentrasi (\%)} = \left(\frac{\text{massa zat terlarut}}{\text{massa total larutan}} \right) \times 100\%$$

$$m_{\text{gelatin}} = \frac{\text{konsentrasi}}{100} \times \text{massa total larutan}$$

$$m_{\text{aquades}} = \text{massa total larutan} - m_{\text{gelatin}}$$

Contoh perhitungan untuk konsentrasi 0,80% adalah sebagai berikut:

$$m_{\text{gelatin}} = \frac{0,80}{100} \times 10 = 0,08 \text{ gram}$$

$$m_{\text{aquades}} = 10 - 0,08 = 9,92 \text{ gram}$$

Larutan ini kemudian dihomogenisasi dengan cara dipanaskan, sehingga gelatin dapat larut dengan sempurna. Adapun proporsi gelatin dan aquades untuk setiap konsentrasi yang digunakan disajikan pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Proporsi gelatin dan aquades pada berbagai konsentrasi

| No | konsentrasi (%) | Massa Gelatin (g) | Massa Aquades (g) |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,80% | 0,08 | 9,92 |
| 2 | 1,00% | 0,10 | 9,90 |
| 3 | 1,20% | 0,12 | 9,88 |
| 4 | 1,40% | 0,14 | 9,86 |
| 5 | 1,60% | 0,16 | 9,84 |
| 6 | 1,80% | 0,18 | 9,82 |
| 7 | 2,00% | 0,20 | 9,80 |

Dari Tabel 4.1, dapat diamati bahwa jumlah gelatin meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi, sementara jumlah aquades yang digunakan berkurang. Sebagai contoh pada konsentrasi terendah (0,80%), sebanyak 0,08 g gelatin dilarutkan dalam 9,92 g aquades untuk membentuk 10 g larutan, sedangkan pada konsentrasi tertinggi (2,00%), jumlah gelatin yang digunakan meningkat menjadi 0,20 g yang dilarutkan dalam 9,80 g aquades. Pola ini menunjukkan hubungan linier antara peningkatan konsentrasi gelatin dan massa gelatin yang diperlukan dalam larutan.

4.1.2 Pengukuran Indeks Bias

Pengukuran indeks bias pada larutan gelatin dilakukan menggunakan alat Refraktometer Abbe, yang bekerja berdasarkan prinsip pembiasan cahaya ketika melewati medium dengan indeks bias tertentu. Sebelum digunakan, alat tersebut dikalibrasi untuk memastikan hasil pengukuran akurat, menggunakan air murni (aquades) yang memiliki indeks bias sebesar 1,3330. Nilai ini sesuai dengan hasil

studi yang dilakukan oleh Zamroni (2013) sebagaimana tercantum dalam literatur. Selanjutnya, sampel larutan gelatin dengan berbagai konsentrasi, seperti yang tertera pada Tabel 4.1, diaplikasikan pada prisma alat dengan volume 1 tetes. Prisma refraktometer kemudian ditutup rapat untuk mencegah gangguan udara, dan pembacaan dilakukan pada skala indeks bias alat.

Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan pada setiap konsentrasi untuk meningkatkan ketepatan data. Nilai rata-rata dari tiga pengulangan tersebut kemudian dihitung untuk mendapatkan hasil akhir indeks bias pada setiap konsentrasi. Nilai indeks bias yang dihasilkan disajikan dalam Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Data hasil pengukuran indeks bias gelatin sapi dan babi pada tiap konsentrasi

| Konsentrasi | Indeks bias gelatin | | | | | | | |
|-------------|---------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|-----------|
| | Sapi | | | | Babi | | | |
| | 1 | 2 | 3 | Rata-rata | 1 | 2 | 3 | Rata-rata |
| 0,80% | 1,3339 | 1,3340 | 1,3338 | 1,3339 | 1,3341 | 1,3339 | 1,3340 | 1,3340 |
| 1,00% | 1,3340 | 1,3342 | 1,3341 | 1,3341 | 1,3344 | 1,3342 | 1,3343 | 1,3343 |
| 1,20% | 1,3341 | 1,3343 | 1,3342 | 1,3342 | 1,3345 | 1,3346 | 1,3344 | 1,3345 |
| 1,40% | 1,3345 | 1,3346 | 1,3344 | 1,3345 | 1,3350 | 1,3349 | 1,3351 | 1,3350 |
| 1,60% | 1,3353 | 1,3352 | 1,3351 | 1,3352 | 1,3356 | 1,3354 | 1,3355 | 1,3355 |
| 1,80% | 1,3356 | 1,3355 | 1,3357 | 1,3356 | 1,3361 | 1,3359 | 1,3360 | 1,3360 |
| 2,00% | 1,3364 | 1,3365 | 1,3363 | 1,3364 | 1,3366 | 1,3365 | 1,3364 | 1,3365 |

Untuk mempermudah dalam melakukan tahapan penelitian selanjutnya, maka nilai rata-rata yang telah dihitung disajikan kembali dalam tabel tersendiri sebagai berikut:

Tabel 4.3 Nilai rata-rata indeks bias gelatin sapi dan babi

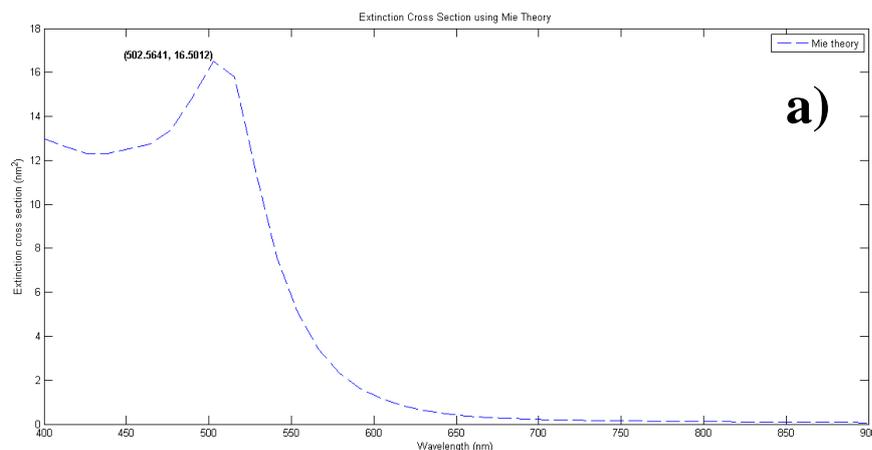
| No | Konsentrasi | Indeks bias gelatin | |
|----|-------------|---------------------|--------|
| | | Sapi | Babi |
| 1 | 0,80% | 1,3339 | 1,3340 |
| 2 | 1,00% | 1,3341 | 1,3343 |
| 3 | 1,20% | 1,3342 | 1,3345 |
| 4 | 1,40% | 1,3345 | 1,3350 |
| 5 | 1,60% | 1,3352 | 1,3355 |
| 6 | 1,80% | 1,3356 | 1,3360 |
| 7 | 2,00% | 1,3364 | 1,3365 |

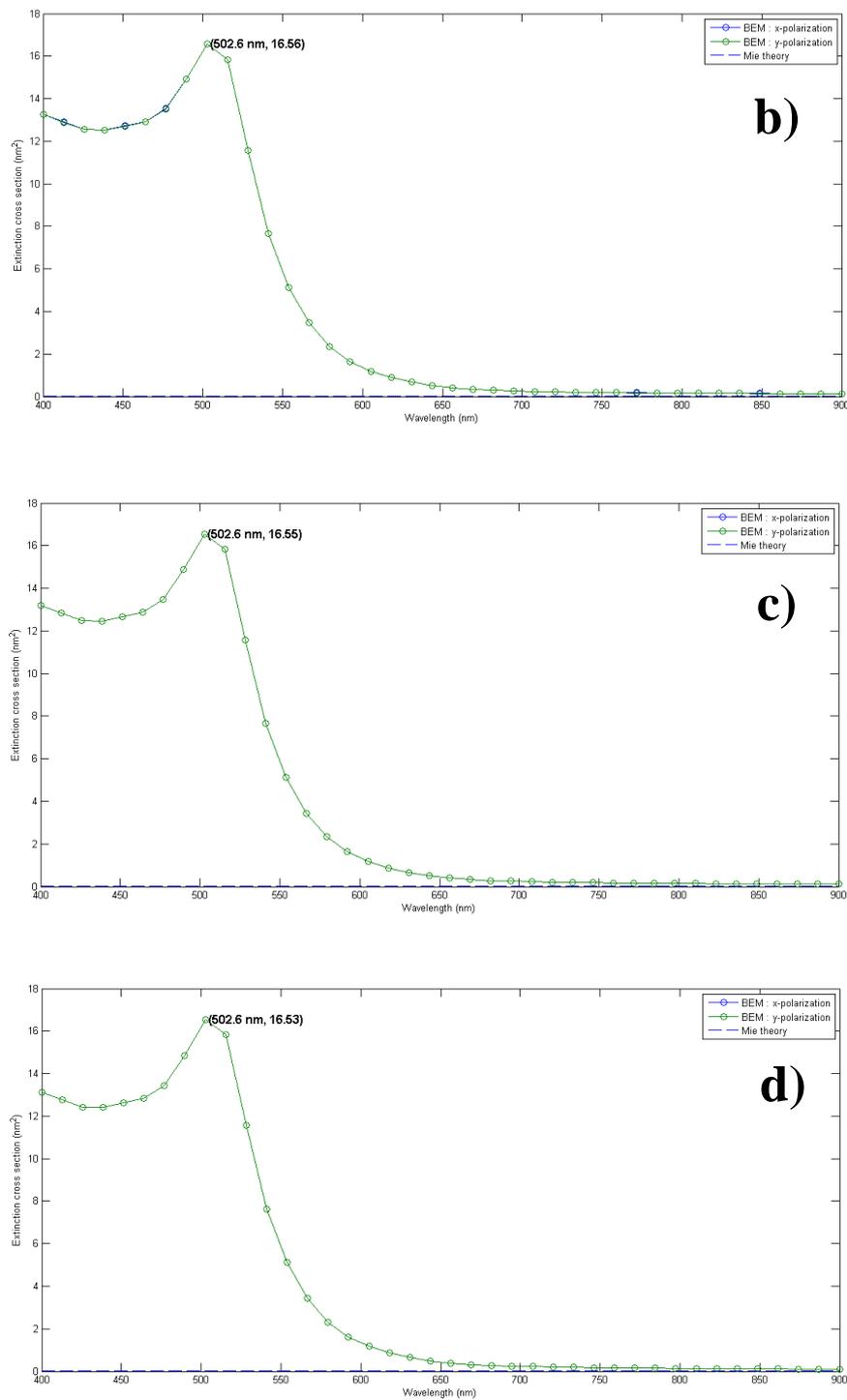
Hasil pengukuran menunjukkan adanya perbedaan yang konsisten, yaitu nilai indeks bias meningkat seiring bertambahnya konsentrasi. Pada konsentrasi 0,80% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3339 untuk gelatin sapi dan 1,3340 untuk gelatin babi; pada konsentrasi 1,00% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3341 untuk gelatin sapi dan 1,3343 untuk gelatin babi; pada konsentrasi 1,20% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3342 untuk gelatin sapi dan 1,3345 untuk gelatin babi; pada konsentrasi 1,40% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3345 untuk gelatin sapi dan 1,3350 untuk gelatin babi; pada konsentrasi 1,60% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3352 untuk gelatin sapi dan 1,3355 untuk gelatin babi; pada konsentrasi 1,80% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3356 untuk gelatin sapi dan 1,3360 untuk gelatin babi; serta pada konsentrasi 2,00% didapatkan nilai indeks bias sebesar 1,3364 untuk gelatin sapi dan 1,3365 untuk gelatin babi.

Peningkatan nilai indeks bias ini sangat relevan untuk deteksi menggunakan sensor LSPR. Perbedaan nilai indeks bias pada gelatin sapi dan babi di setiap konsentrasi dapat menghasilkan respon LSPR yang berbeda. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sifat optik gelatin dapat dimanfaatkan untuk membandingkan atau mendeteksi perbedaan jenis gelatin dalam sensor LSPR. Respon ini nantinya akan digunakan untuk memahami bagaimana variasi indeks bias dapat memengaruhi fenomena optik yang bergantung pada interaksi medan elektromagnetik dengan medium.

4.2 Komparasi Hasil Simulasi dengan Perhitungan Analitik *Mie Theory*

Sebelum simulasi, dilakukan komparasi hasil simulasi dengan *Mie Theory*. Dalam sensor LSPR, analisisnya adalah dengan menyelesaikan persamaan Maxwell menggunakan metode perhitungan numerik *Boundary Element Method* (BEM), yang mana secara analitik dapat menggunakan *Mie Theory*. Perhitungan secara analitik dengan *Mie Theory* telah ada sebagai fungsi dalam *MNPBEM toolbox* dan bisa dimanfaatkan untuk membandingkan dengan perhitungan numerik BEM. Berikut adalah hasil perhitungan *extinction cross section* pada nanopartikel emas dengan ukuran 10 nm di medium udara:





Gambar 4.1 Hasil simulasi *extinction cross section* pada nanopartikel emas diameter 10 nm di medium udara (a) *Mie Theory*, b.) *Mie Theory Vs BEM solver* menggunakan 144 *vertices*, c.) *Mie Theory Vs BEM solver* menggunakan 256 *vertices*, dan d.) *Mie Theory Vs BEM solver* menggunakan 576 *vertices*

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh bahwa puncak panjang gelombang maksimum resonansi terkait *extinction cross section* dengan *Mie Theory* pada nanopartikel emas diameter 10 nm di medium udara seperti pada gambar 4.1a adalah 502,6 nm dan nilai *extinction cross section* pada puncak panjang gelombang tersebut adalah 16,50 nm². Hasil tersebut digunakan sebagai acuan akurasi perhitungan numerik BEM. Hasil dengan simulasi BEM dengan objek yang sama menggunakan *vertices* (pengaturan diskretisasi mesh) 144 seperti pada gambar 4.1b menghasilkan puncak panjang gelombang 502,6 nm dan nilai *extinction cross section* adalah 16,56 nm² (nilai *error* sebesar 0,36 % dibanding dengan hasil *Mie Theory*). Pada simulasi BEM dengan *vertices* 256 seperti pada gambar 4.1c menghasilkan puncak panjang gelombang pada 502,6 nm dan nilai *extinction cross section* adalah 16,55 nm² (nilai *error* sebesar 0,30 %). Terakhir, pada simulasi BEM dengan *vertices* 576 seperti pada gambar 4.1d menghasilkan puncak panjang gelombang 502,6 nm dan nilai *extinction cross section* adalah 16,53 nm² (nilai *error* sebesar 0,18 %).

Tabel 4.4 Komparasi Mie Theory dengan BEM solver pada MNPBEM toolbox

| | λ LSPR (nm) | <i>extinction cross section</i> (nm ²) |
|-------------------------|---------------------|--|
| <i>Mie Theory</i> | 502,6 | 16,50 |
| BEM 144 vertices | 502,6 | 16,56 |
| BEM 256 vertices | 502,6 | 16,55 |
| BEM 576 vertices | 502,6 | 16,53 |

Dari ketiga perbandingan hasil simulasi antara BEM dan *Mie Theory*, diperoleh bahwa peningkatan jumlah *vertices* dalam diskretisasi mesh memberikan hasil yang semakin akurat terhadap *Mie Theory*. Namun, perbedaan utama yang ditemukan lebih signifikan pada nilai *cross section* dibandingkan dengan puncak panjang

gelombang resonansi, yang tetap konstan di semua simulasi. Oleh karena itu, meskipun penggunaan *vertices* yang lebih besar dapat meningkatkan akurasi, perbedaan nilai *error* yang sangat kecil dibandingkan peningkatan waktu komputasi yang signifikan membuat penggunaan 144 *vertices* tetap dipilih sebagai kompromi optimal antara efisiensi dan akurasi.

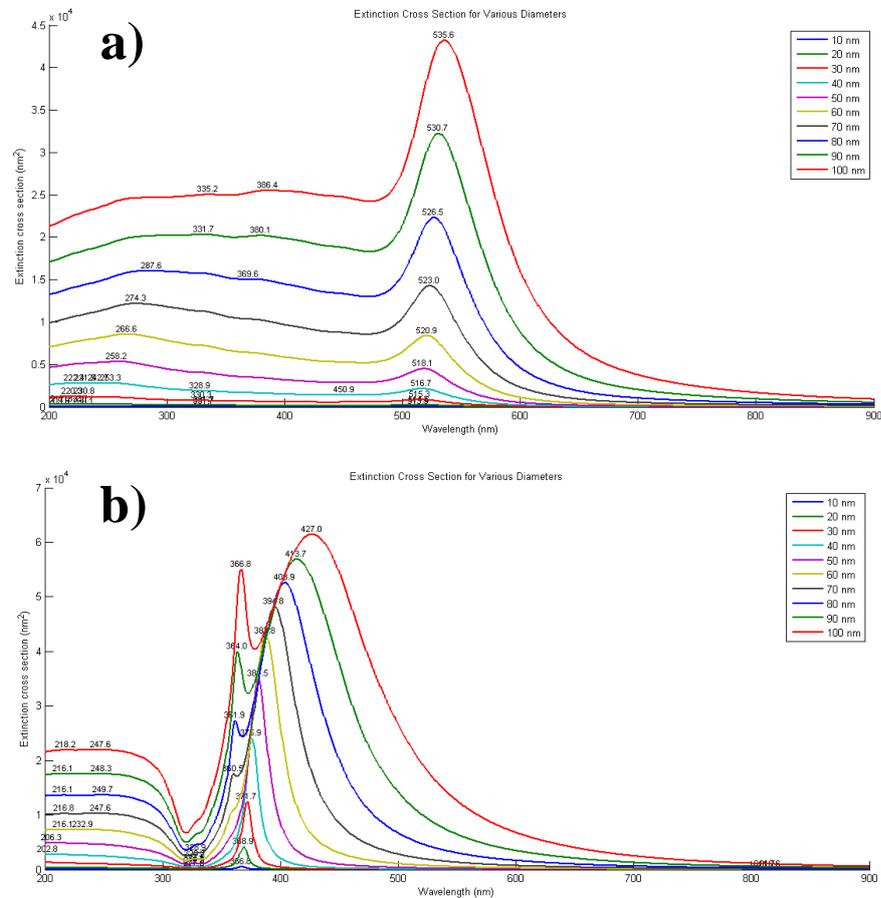
4.3 Pengujian Sensitivitas *Nanosphere* Emas dan Perak

Simulasi sensitivitas bertujuan untuk mengidentifikasi ukuran dan jenis *nanosphere* yang memberikan respons LSPR paling sensitif terhadap perubahan konsentrasi gelatin. *Nanosphere* yang digunakan memiliki ukuran diameter berkisar antara 10 nm hingga 100 nm dengan interval 10 nm.

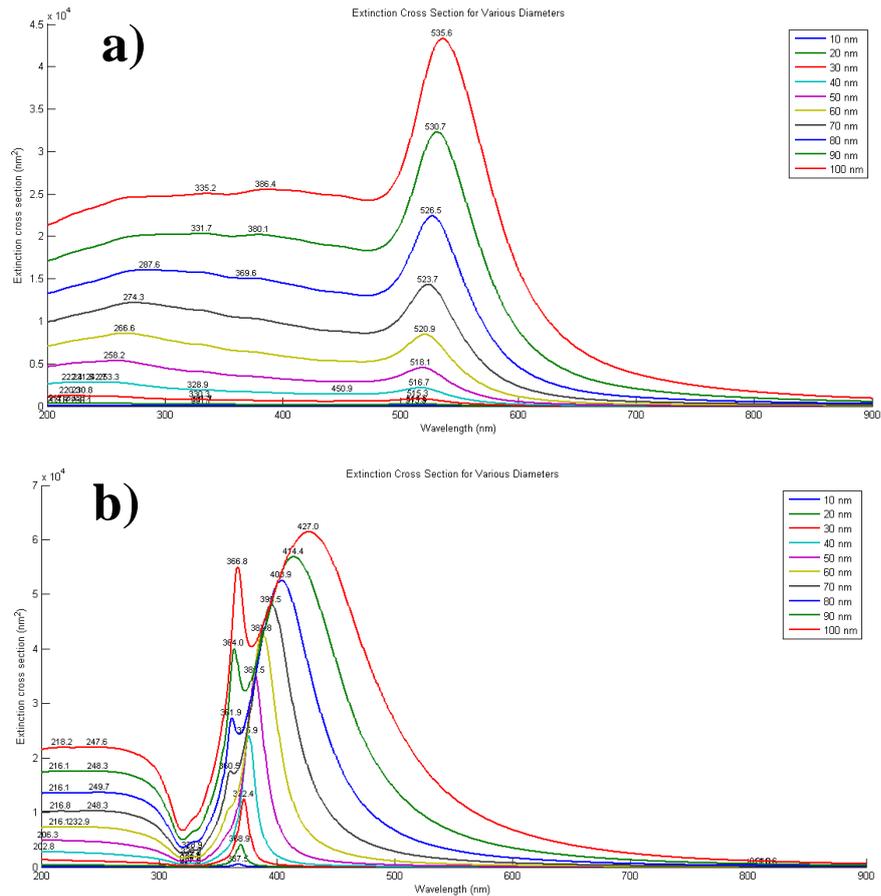
Pengujian sensitivitas menggunakan empat konsentrasi larutan gelatin dengan udara sebagai perbandingannya. Udara ini berfungsi sebagai referensi utama, sementara konsentrasi larutan gelatin yang dianalisis mencakup dua jenis gelatin, yaitu gelatin sapi dan gelatin babi. Dari masing-masing jenis gelatin, dipilih dua konsentrasi saja, yaitu yang paling rendah (0,80%) dan yang paling tinggi (2,00%), sehingga dapat diamati apakah perubahan konsentrasi di tingkat terendah memiliki pola yang sama dengan di tingkat tertinggi.

Beberapa gambar berikut merupakan plot grafik dari simulasi *extinction cross section* yang menggambarkan pergeseran λ_{LSPR} berdasarkan ukuran *nanosphere* emas dan perak di udara serta dalam larutan gelatin sapi dan gelatin babi dengan konsentrasi terendah dan tertinggi. Analisis ini diharapkan dapat menunjukkan seberapa besar sensitivitas sensor LSPR terhadap perubahan indeks bias, sehingga

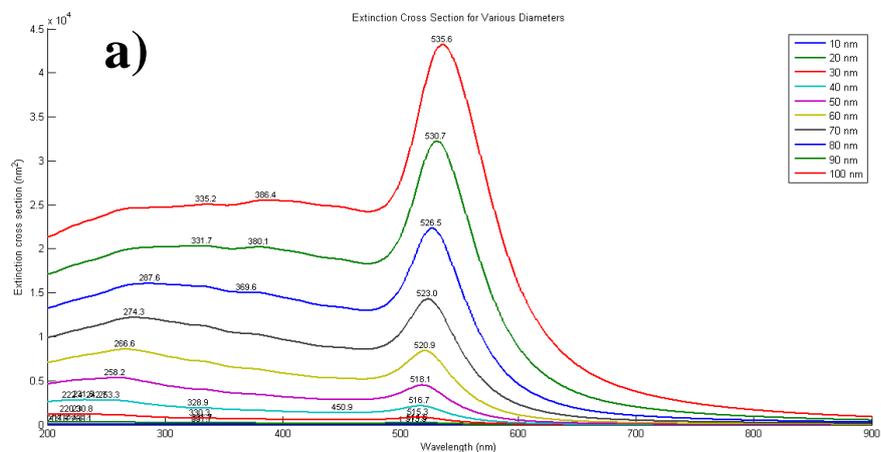
dapat digunakan untuk membedakan jenis dan konsentrasi gelatin berdasarkan interaksinya dengan nanopartikel logam.

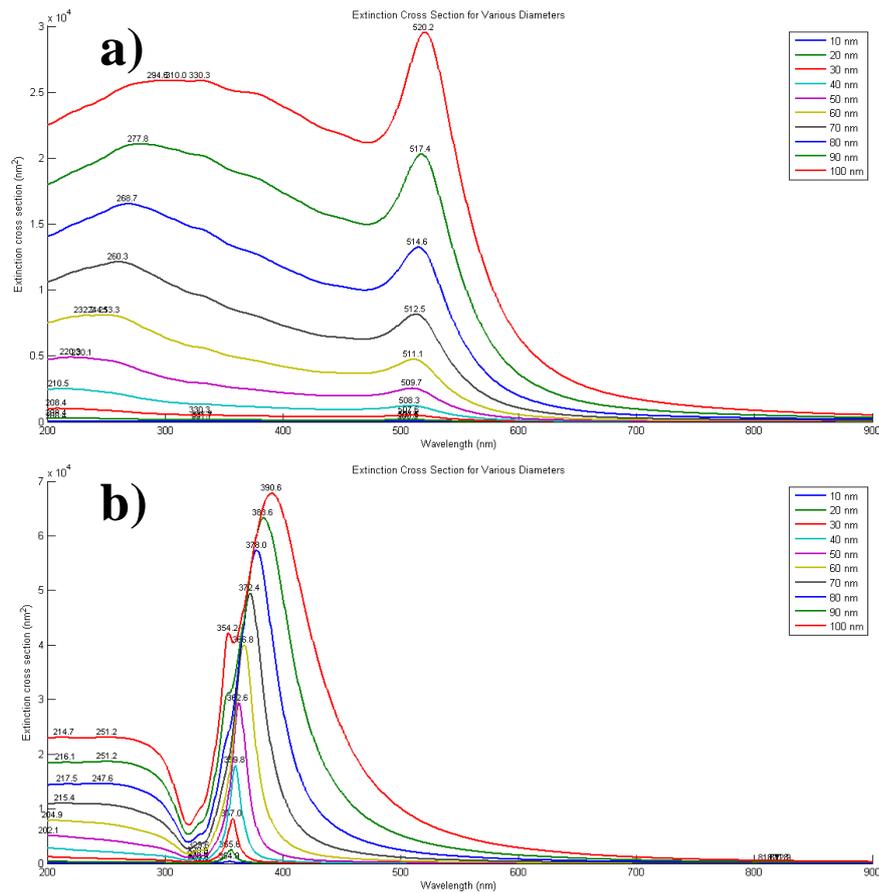


Gambar 4.2 Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin sapi dengan konsentrasi 0,80% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak



Gambar 4.3 Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin sapi dengan konsentrasi 2,00% pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak





Gambar 4.6 Grafik pergeseran panjang gelombang resonansi hasil simulasi sensor LSPR untuk deteksi udara pada ukuran 10-100 nm dengan interval 10 nm menggunakan a) nanopartikel emas dan b) nanopartikel perak

Perhitungan sensitivitas dilakukan dengan menggunakan data panjang gelombang resonansi yang diperoleh dari beberapa grafik hasil simulasi pada Gambar 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, dan 4.6. Sensitivitas dihitung dengan membandingkan pergeseran λ_{LSPR} pada keempat konsentrasi larutan gelatin dan udara. Rumus yang digunakan untuk menghitung sensitivitas adalah seperti pada rumus 2.2, yaitu:

$$S = \frac{\Delta\lambda_{LSPR}}{\Delta n}$$

$\Delta\lambda_{LSPR}$ merupakan selisih antara $\lambda_{gelatin}$ dengan λ_{udara} yang diperoleh dari grafik hasil simulasi pada Gambar 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 dan 4.6. Sementara itu, Δn adalah perbedaan indeks bias antara larutan gelatin dengan udara. Nilai indeks bias larutan gelatin diperoleh dari hasil pengujian yang telah didapatkan seperti pada Tabel 4.3. Dengan data λ_{LSPR} dari grafik hasil simulasi dan indeks bias dari pengujian Refraktometer Abbe, sensitivitas masing-masing nanopartikel dapat dihitung. Sebagai contoh, berikut adalah perhitungan sensitivitas untuk nanopartikel emas ukuran 10 nm terhadap larutan gelatin babi dengan konsentrasi 2,00%:

$$s = \frac{\Delta\lambda_{LSPR}}{\Delta n} = \frac{\lambda_{gelatin} - \lambda_{udara}}{n_{gelatin} - n_{udara}} = \frac{513.91 - 506.91}{1,3365 - 1} = 20,8 \text{ nm/RIU}$$

Berdasarkan perhitungan ini, sensitivitas nanopartikel emas ukuran 10 nm terhadap larutan gelatin babi konsentrasi 2,00% adalah sebesar 20,8 nm/RIU. Nilai sensitivitas untuk ukuran lain dihitung dengan metode yang sama dan disajikan pada Tabel 4.5, 4.6, 4.7, dan 4.8. Tabel-tabel berikut menunjukkan sensitivitas *nanosphere* emas dan perak berdasarkan pergeseran panjang gelombang puncak LSPR ketika berinteraksi dengan gelatin pada konsentrasi tertentu.

Tabel 4.5 Nilai sensitivitas *nanosphere* berdasarkan pergeseran λ_{LSPR} pada gelatin sapi dengan konsentrasi 0,80% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran

| Diameter <i>nanosphere</i> | Gelatin | | | Udara | | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|-------------------------------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|-------------|-----------------------|---------|
| | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | Emas | Perak |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 513,91 | 366,77 | 1,3339 | 506,91 | 354,85 | 1 | 20,9644 | 35,6993 |
| 20 | 514,61 | 368,87 | 1,3339 | 507,61 | 355,56 | 1 | 20,9644 | 39,8622 |
| 30 | 515,32 | 371,67 | 1,3339 | 507,61 | 356,96 | 1 | 23,0907 | 44,0551 |
| 40 | 516,72 | 375,88 | 1,3339 | 508,31 | 359,76 | 1 | 25,1872 | 48,2779 |
| 50 | 518,12 | 381,48 | 1,3339 | 509,71 | 362,56 | 1 | 25,1872 | 56,6637 |
| 60 | 520,92 | 387,79 | 1,3339 | 511,11 | 366,77 | 1 | 29,3801 | 62,9530 |
| 70 | 523,02 | 394,79 | 1,3339 | 512,51 | 372,37 | 1 | 31,4765 | 67,1459 |
| 80 | 526,53 | 403,9 | 1,3339 | 514,61 | 377,98 | 1 | 35,6993 | 77,6280 |
| 90 | 530,73 | 413,71 | 1,3339 | 517,42 | 383,58 | 1 | 39,8622 | 90,2366 |
| 100 | 535,64 | 427,03 | 1,3339 | 520,22 | 390,59 | 1 | 46,1815 | 109,134 |

Tabel 4.6 Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ_{LSPR} pada gelatin sapi dengan konsentrasi 2,00% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran

| Diameter <i>nanosphere</i> | Gelatin | | | Udara | | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|-------------------------------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|-------------|-----------------------|---------|
| | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | | |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 513,91 | 367,47 | 1,3364 | 506,91 | 354,85 | 1 | 20,8086 | 37,5149 |
| 20 | 514,61 | 368,87 | 1,3364 | 507,61 | 355,56 | 1 | 20,8086 | 39,5660 |
| 30 | 515,32 | 372,37 | 1,3364 | 507,61 | 356,96 | 1 | 22,9191 | 45,8086 |
| 40 | 516,72 | 375,88 | 1,3364 | 508,31 | 359,76 | 1 | 25,0000 | 47,9191 |
| 50 | 518,12 | 381,48 | 1,3364 | 509,71 | 362,56 | 1 | 25,0000 | 56,2426 |
| 60 | 520,92 | 387,79 | 1,3364 | 511,11 | 366,77 | 1 | 29,1617 | 62,4851 |
| 70 | 523,72 | 395,5 | 1,3364 | 512,51 | 372,37 | 1 | 33,3234 | 68,7574 |
| 80 | 526,53 | 403,9 | 1,3364 | 514,61 | 377,98 | 1 | 35,4340 | 77,0511 |
| 90 | 530,73 | 414,41 | 1,3364 | 517,42 | 383,58 | 1 | 39,5660 | 91,6468 |
| 100 | 535,64 | 427,03 | 1,3364 | 520,22 | 390,59 | 1 | 45,8383 | 108,323 |

Tabel 4.7 Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ_{LSPR} pada gelatin babi dengan konsentrasi 0,80% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran

| Diameter <i>nanosphere</i> | Gelatin | | | Udara | | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|-------------------------------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|-------------|-----------------------|---------|
| | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | Emas | Perak |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 513,91 | 366,77 | 1,3340 | 506,91 | 354,85 | 1 | 20,9581 | 35,6886 |
| 20 | 514,61 | 368,87 | 1,3340 | 507,61 | 355,56 | 1 | 20,9581 | 39,8503 |
| 30 | 515,32 | 371,67 | 1,3340 | 507,61 | 356,96 | 1 | 23,0838 | 44,0419 |
| 40 | 516,72 | 375,88 | 1,3340 | 508,31 | 359,76 | 1 | 25,1796 | 48,2635 |
| 50 | 518,12 | 381,48 | 1,3340 | 509,71 | 362,56 | 1 | 25,1796 | 56,6467 |
| 60 | 520,92 | 387,79 | 1,3340 | 511,11 | 366,77 | 1 | 29,3713 | 62,9341 |
| 70 | 523,02 | 394,79 | 1,3340 | 512,51 | 372,37 | 1 | 31,4671 | 67,1257 |
| 80 | 526,53 | 403,9 | 1,3340 | 514,61 | 377,98 | 1 | 35,6886 | 77,6048 |
| 90 | 530,73 | 413,71 | 1,3340 | 517,42 | 383,58 | 1 | 39,8503 | 90,2096 |
| 100 | 535,64 | 427,03 | 1,3340 | 520,22 | 390,59 | 1 | 46,1677 | 109,102 |

Tabel 4.8 Nilai sensitivitas nanopartikel berdasarkan pergeseran λ_{LSPR} pada gelatin babi dengan konsentrasi 2,00% dan udara dengan variasi jenis dan ukuran

| Diameter <i>nanosphere</i> | Gelatin | | | Udara | | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|-------------------------------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|-------------|-----------------------|----------|
| | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | λ resonansi (nm) | | Indeks bias | Emas | Perak |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 209,81 | 366,77 | 1,3365 | 208,41 | 354,85 | 1 | 20,80238 | 37,50371 |
| 20 | 211,21 | 368,87 | 1,3365 | 208,41 | 355,56 | 1 | 20,80238 | 39,55423 |
| 30 | 220,32 | 371,67 | 1,3365 | 208,41 | 356,96 | 1 | 22,91233 | 45,79495 |
| 40 | 231,53 | 375,88 | 1,3365 | 210,51 | 359,76 | 1 | 24,99257 | 47,90490 |
| 50 | 258,16 | 381,48 | 1,3365 | 220,32 | 362,56 | 1 | 24,99257 | 56,22585 |
| 60 | 266,57 | 387,79 | 1,3365 | 232,23 | 366,77 | 1 | 29,15305 | 62,46657 |
| 70 | 523,02 | 394,79 | 1,3365 | 260,26 | 372,37 | 1 | 33,31352 | 68,73700 |
| 80 | 526,53 | 403,9 | 1,3365 | 268,67 | 377,98 | 1 | 35,42348 | 77,02823 |
| 90 | 530,73 | 413,71 | 1,3365 | 277,78 | 383,58 | 1 | 39,55423 | 91,61961 |
| 100 | 535,64 | 427,03 | 1,3365 | 520,22 | 390,59 | 1 | 45,82467 | 108,2912 |

Ketika indeks bias lingkungan di sekitar nanopartikel berubah, panjang gelombang resonansi bergeser. Pergeseran ini dapat diukur untuk mengetahui sensitivitas nanopartikel terhadap perubahan lingkungan, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara pergeseran panjang gelombang resonansi ($\Delta\lambda$) dengan perubahan indeks bias (Δn). Hasil penelitian oleh Bouhadiche & Benghorieb (2024) menunjukkan bahwa sensitivitas yang tinggi menunjukkan kemampuan nanopartikel untuk merespons perubahan indeks bias di sekitarnya dengan pergeseran panjang gelombang resonansi yang lebih besar. Nilai sensitivitas yang lebih tinggi menandakan performa sensor yang lebih baik dalam mendeteksi perubahan indeks bias.

Hasil penelitian ini dapat diamati pada Tabel 4.5, 4.6, 4.7, dan 4.8. Hasil analisis dari keempat konsentrasi gelatin menunjukkan tren yang konsisten, yaitu *nanosphere* perak dengan diameter 100 nm memiliki sensitivitas tertinggi dibandingkan dengan *nanosphere* emas diameter 10-100 nm dan *nanosphere* perak diameter 10-90 nm, dengan nilai 109,134 nm/RIU pada gelatin sapi 0,80%; 108,323 nm/RIU pada gelatin sapi 2,00%; 90,2096 nm/RIU pada gelatin babi 0,80%; dan 108,291 nm/RIU pada gelatin babi 2,00%. Hal ini menunjukkan bahwa baik dalam gelatin sapi maupun gelatin babi dengan konsentrasi terendah hingga tertinggi, sensitivitas sensor LSPR tetap mengikuti pola yang sama, di mana *nanosphere* berdiameter lebih besar memiliki sensitivitas lebih tinggi. Selain itu, perbandingan antara *nanosphere* emas dan perak menunjukkan bahwa perak memiliki sensitivitas yang lebih tinggi.

Meskipun pola sensitivitas tetap sama di semua konsentrasi gelatin, di mana nanopartikel dengan ukuran lebih besar selalu menunjukkan sensitivitas yang lebih

tinggi, hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap konsentrasi gelatin menghasilkan nilai puncak LSPR yang berbeda, meskipun sangat kecil perbedaannya. Perubahan indeks bias yang disebabkan oleh perbedaan konsentrasi gelatin tidak hanya mempengaruhi pergeseran panjang gelombang resonansi, tetapi juga mempengaruhi intensitas puncak resonansi plasmonik.

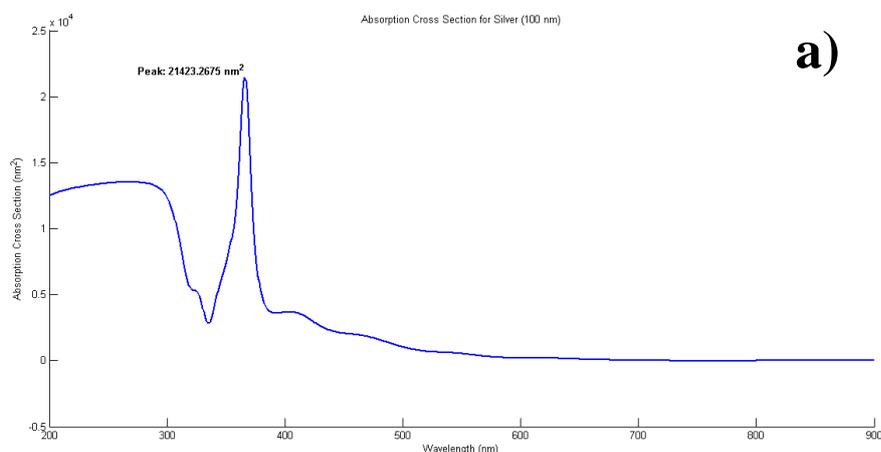
4.4 Pengujian Karakteristik *Absorption Cross Section* dan *Scattering Cross Section*

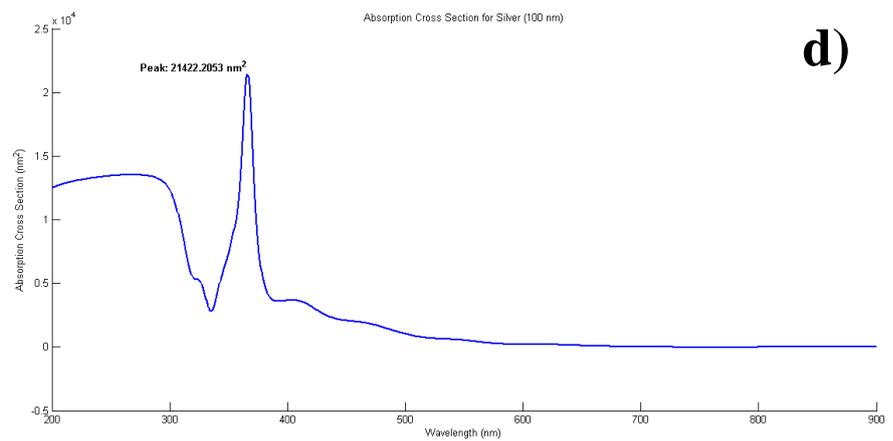
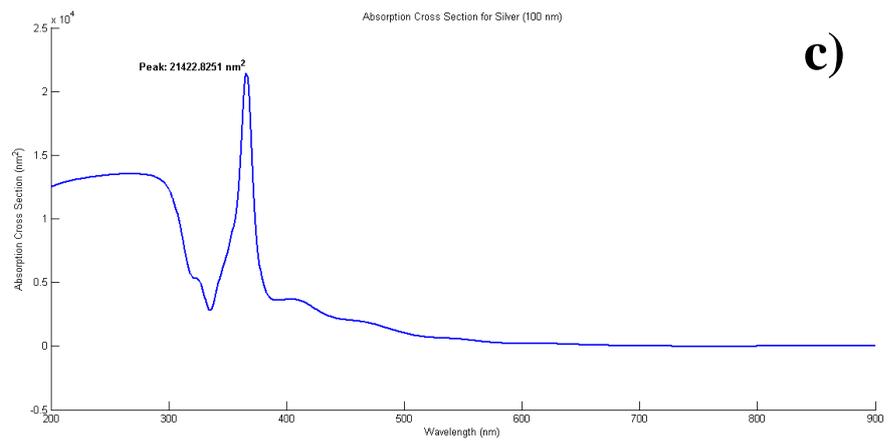
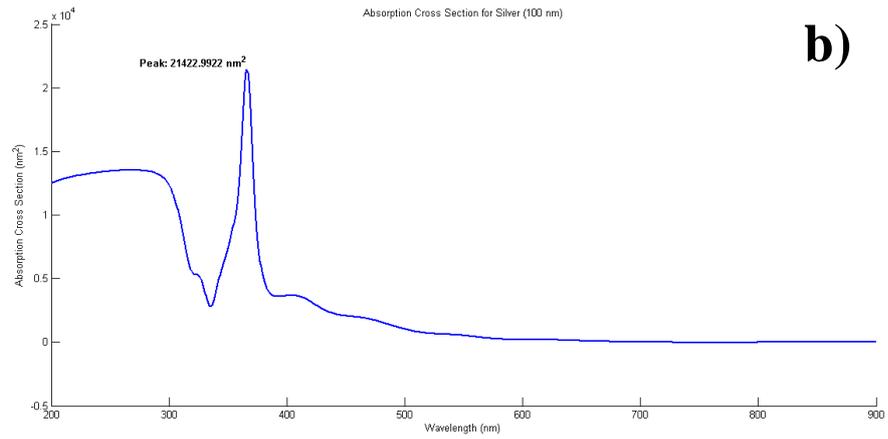
Section

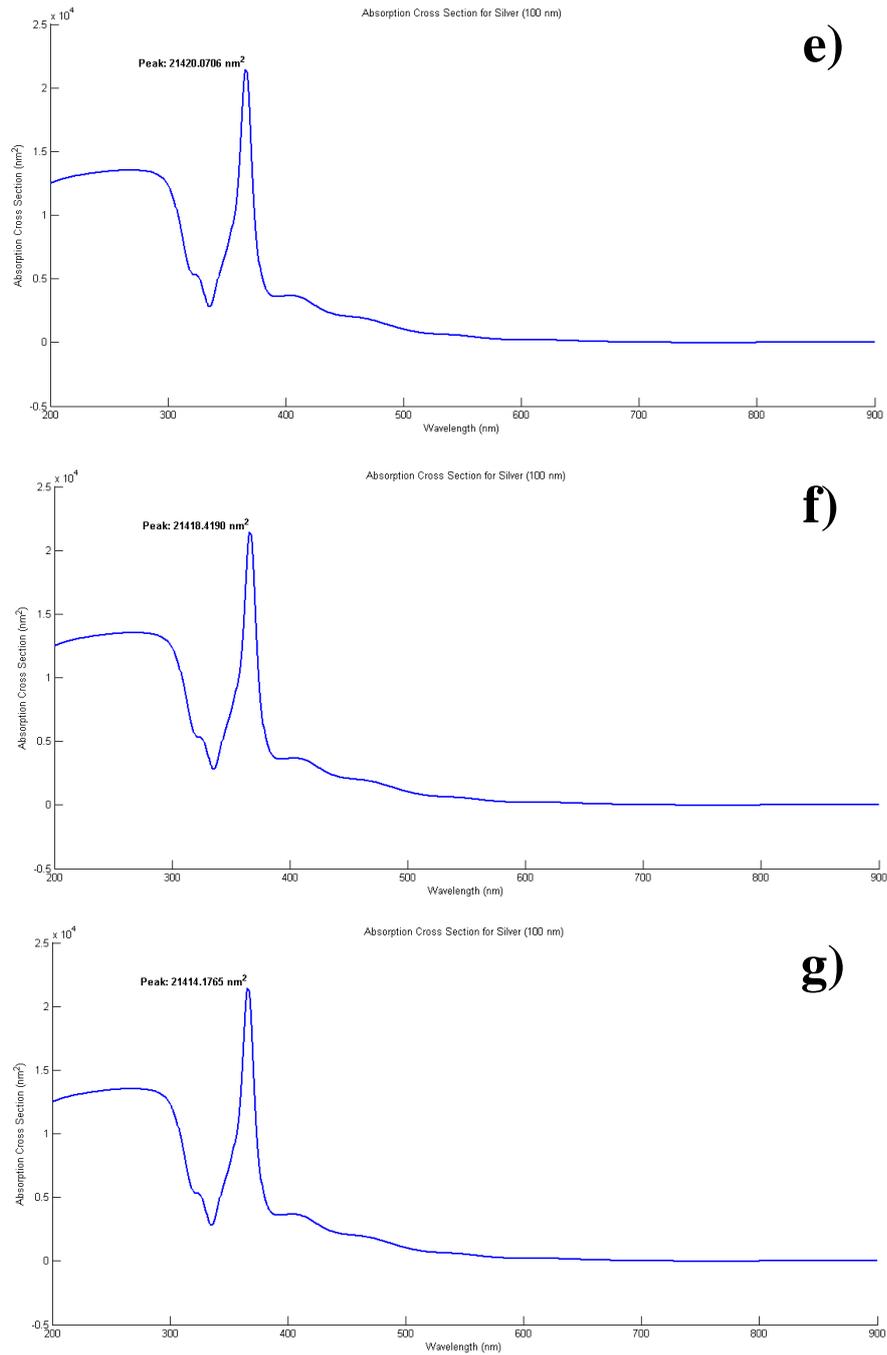
Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan karakteristik *cross section* dari gelatin sapi dan babi. Data diperoleh dengan simulasi sensor LSPR untuk *absorption cross section* dan *scattering cross section* pada setiap jenis dan konsentrasi gelatin, yang kemudian diambil nilai puncak *cross section*-nya untuk dianalisis lebih lanjut.

4.4.1 Pengujian Karakteristik *Absorption Cross Section*

Beberapa gambar berikut adalah grafik yang didapatkan dari simulasi *absorption cross section* pada LSPR menggunakan nanopartikel yang paling sensitif (perak dengan diameter 100 nm) pada gelatin sapi.

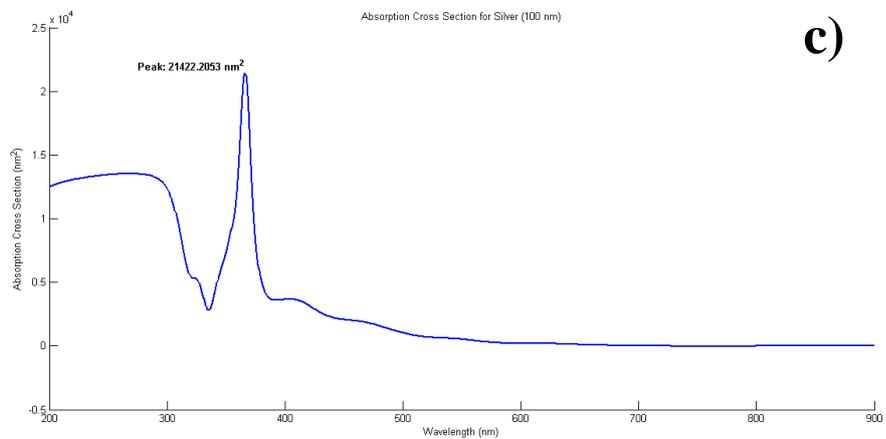
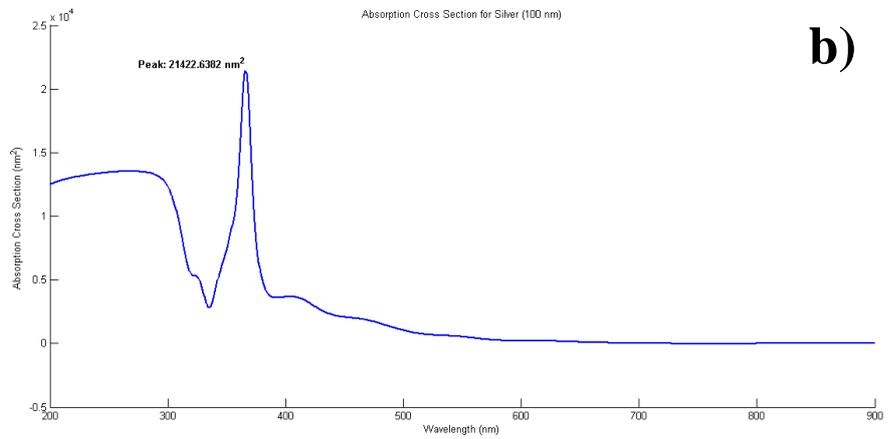
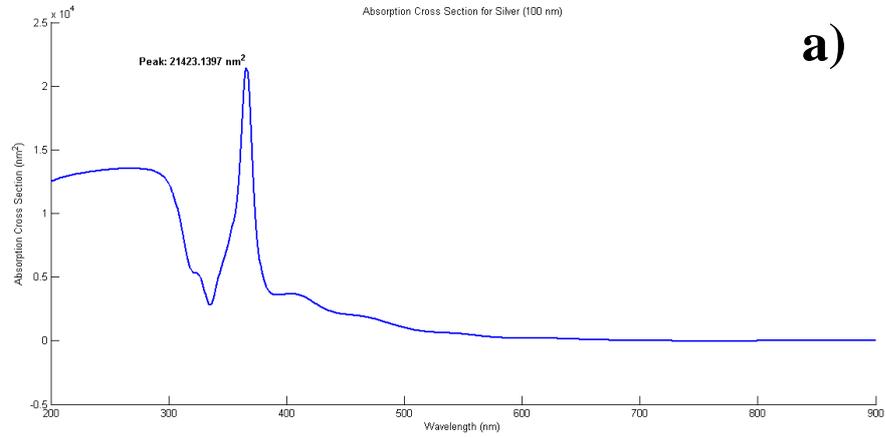


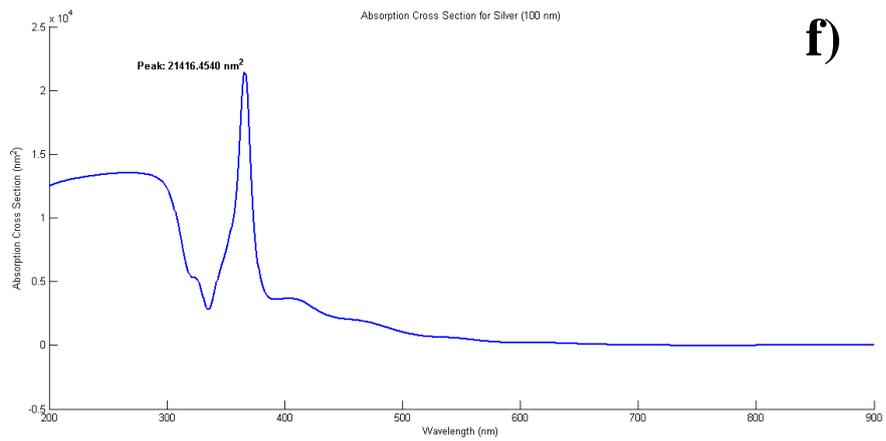
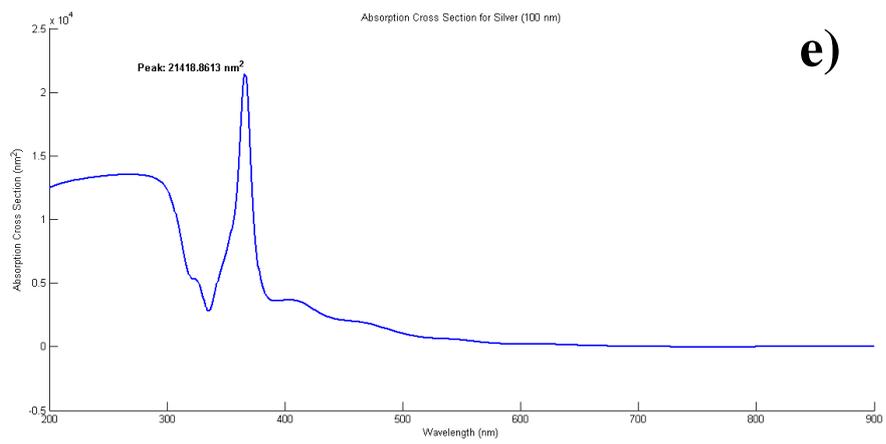
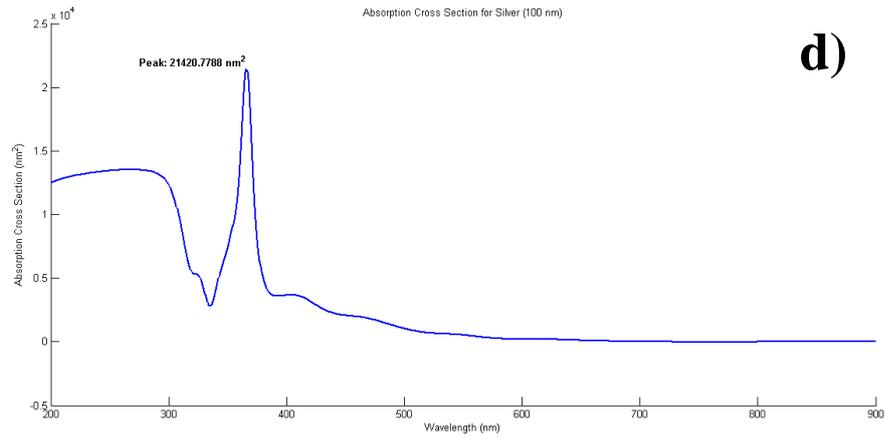


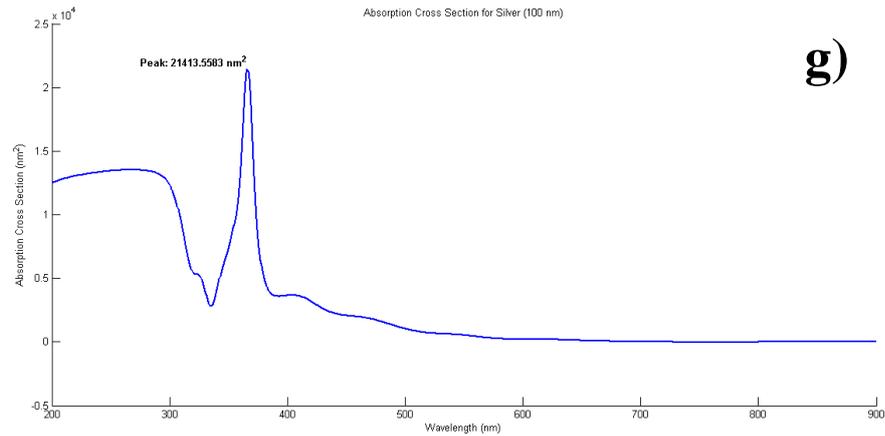


Gambar 4.7 Plot grafik *absorption cross section* hasil simulasi LSPR dari gelatin sapi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00%

Adapun grafik yang didapatkan dari simulasi *absorption cross section* pada variasi konsentrasi gelatin babi adalah sebagai berikut:



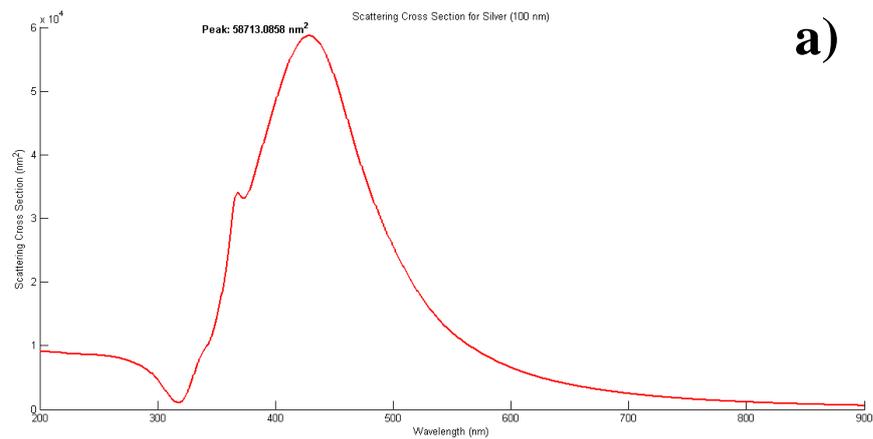


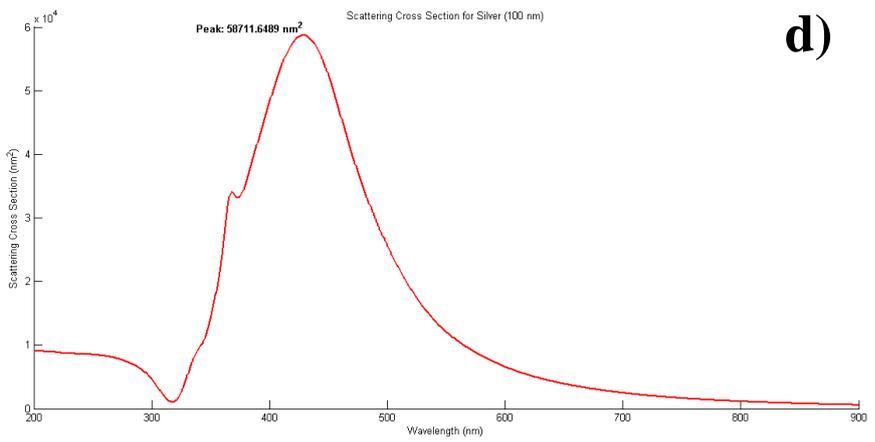
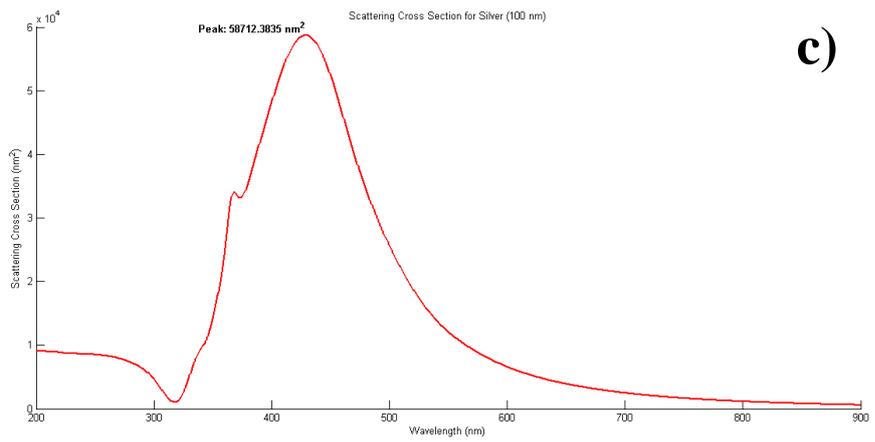
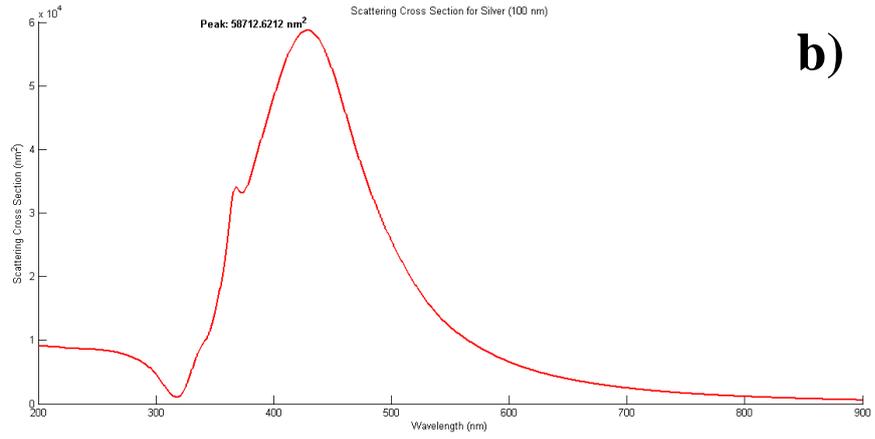


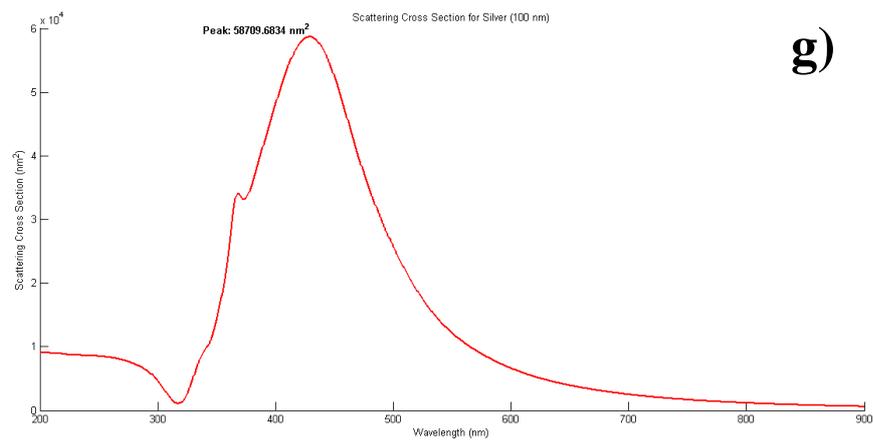
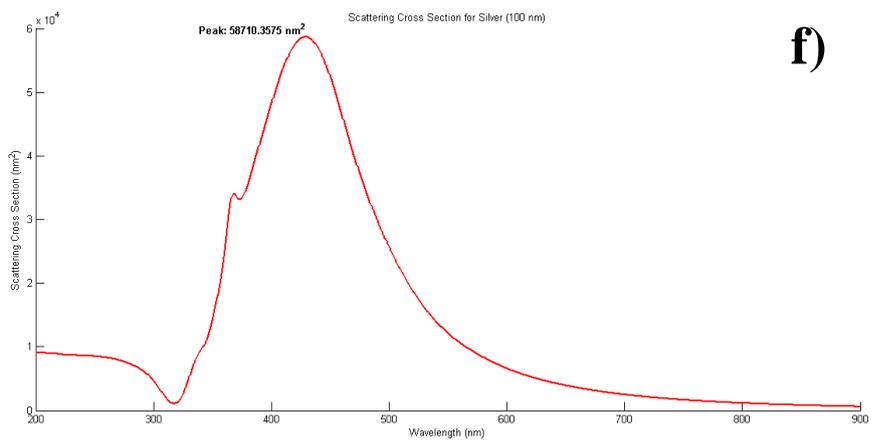
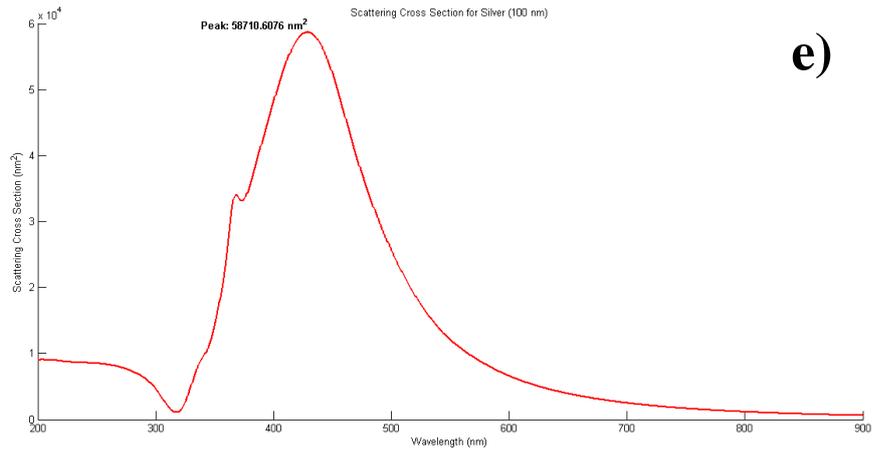
Gambar 4.8 Plot grafik *absorption cross section* hasil simulasi LSPR dari gelatin babi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00%

4.4.2 Pengujian Karakteristik *Scattering Cross Section*

Beberapa gambar berikut adalah grafik yang didapatkan dari simulasi *scattering cross section* pada sensor LSPR menggunakan nanopartikel yang paling sensitif (perak dengan diameter 100 nm) pada gelatin sapi.

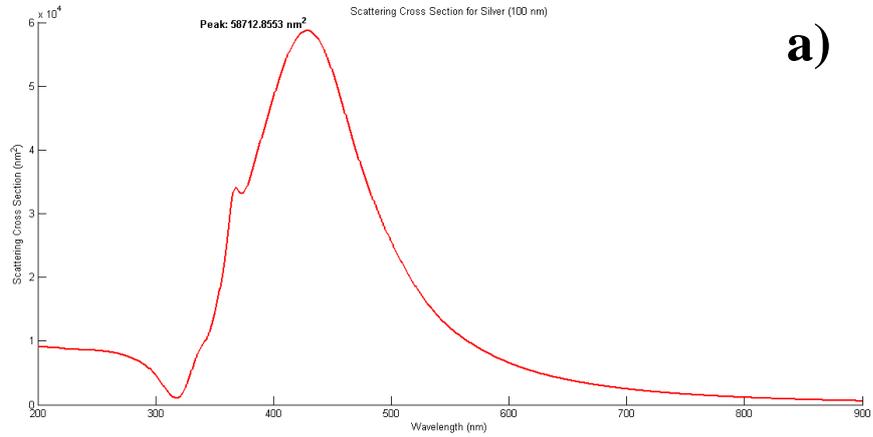
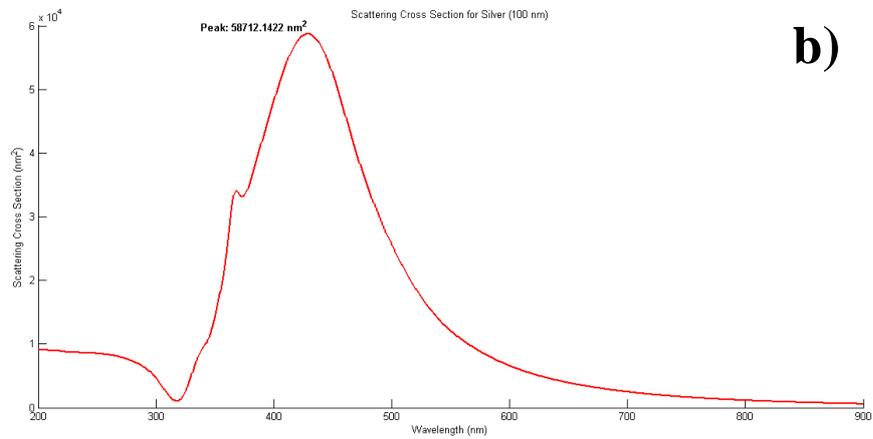
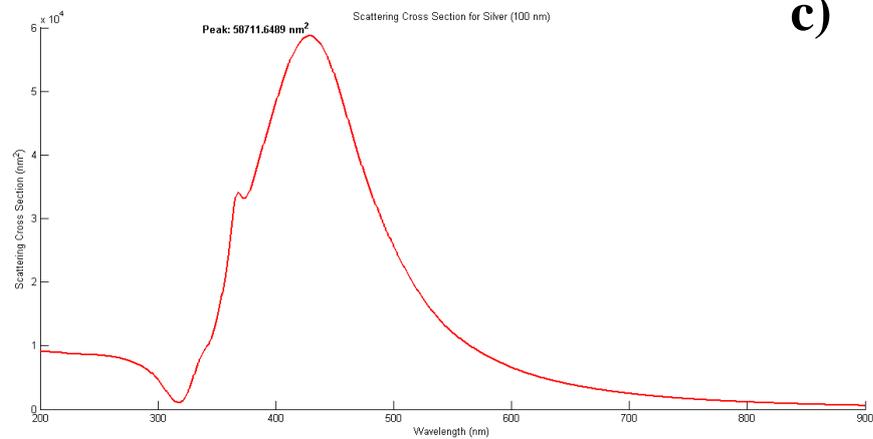


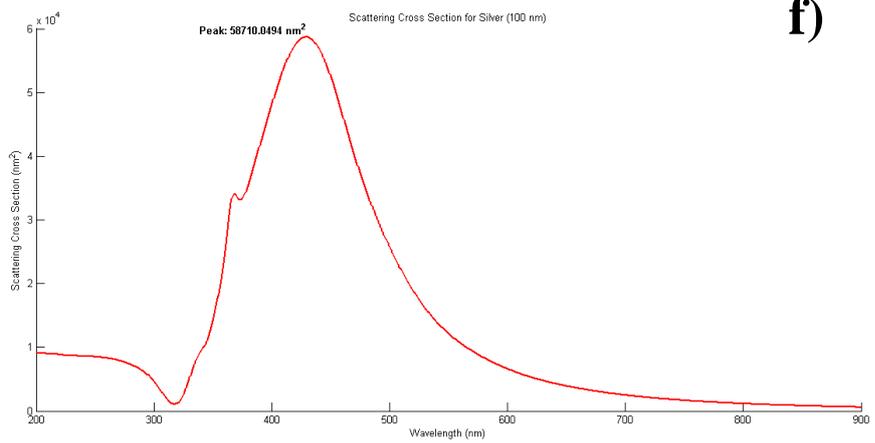
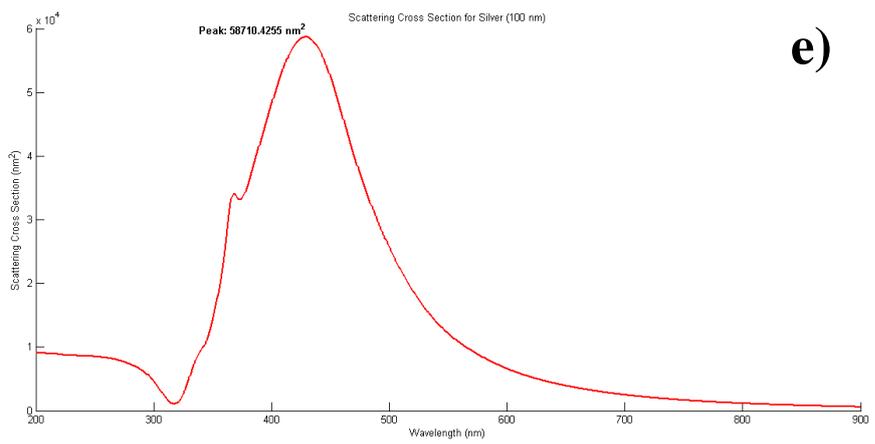
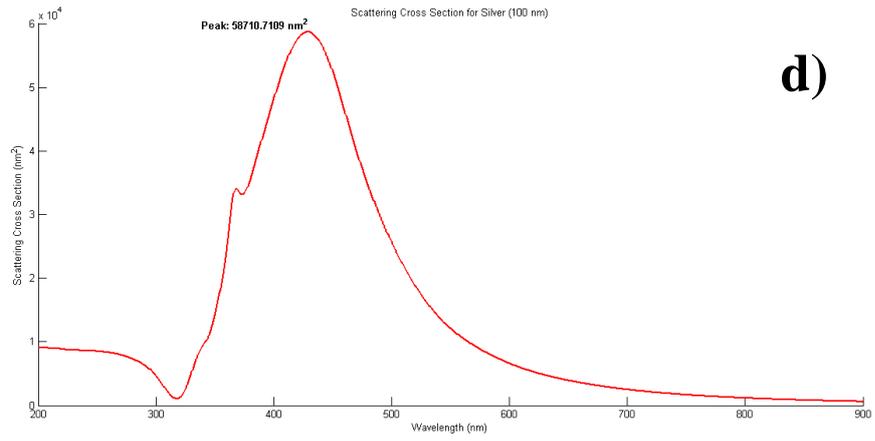


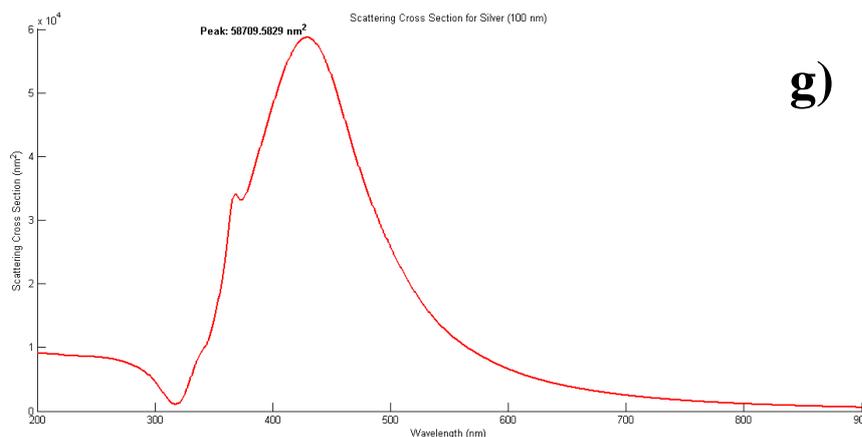


Gambar 4.9 Plot grafik *scattering cross section* hasil simulasi LSPR dari gelatin sapi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00%

Adapun grafik yang didapatkan dari simulasi *scattering cross section* pada variasi konsentrasi gelatin babi adalah sebagai berikut:

**a)****b)****c)**





g)

Gambar 4.10 Plot grafik *scattering cross section* hasil simulasi LSPR dari gelatin babi dengan konsentrasi (a) 0,80%; (b) 1,00%; (c) 1,20%; (d) 1,40%; (e) 1,60%; (f) 1,80%; dan (g) 2,00%

4.4.3 Perbandingan Karakteristik *Absorption Cross Section* dan *Scattering*

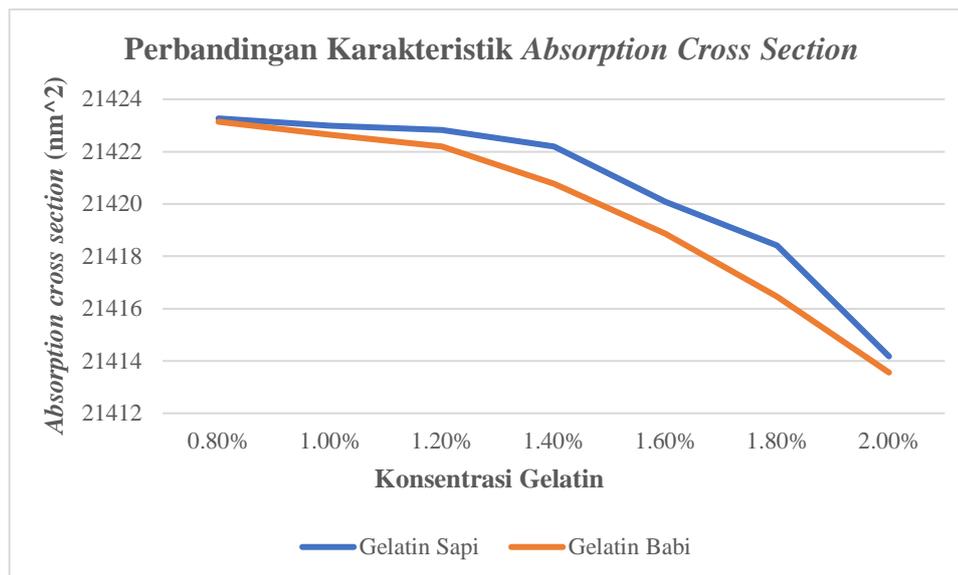
Cross Section Gelatin Sapi dan Babi

Hasil perbandingan karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* antara gelatin sapi dan babi berdasarkan data yang telah diperoleh dapat dilihat pada tabel berikut.

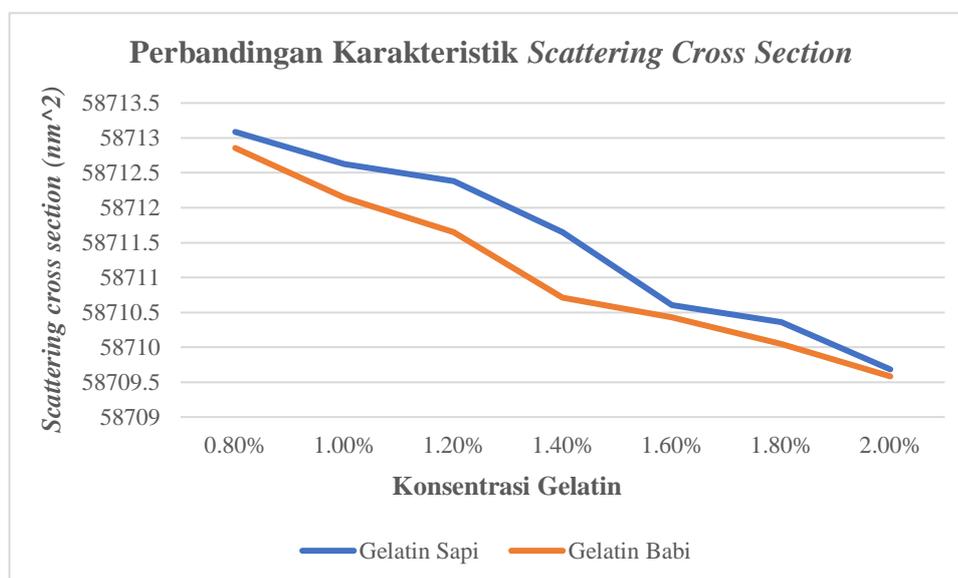
Tabel 4.9 Nilai puncak *cross section* gelatin sapi dan babi pada tiap konsentrasi

| Konsentrasi | Cross section (nm ²) | | | |
|-------------|----------------------------------|------------|-------------------|------------|
| | <i>Absorption</i> | | <i>Scattering</i> | |
| | Sapi | Babi | Sapi | Babi |
| 0,80% | 21423,2675 | 21423,1397 | 58713,0858 | 58712,8553 |
| 1,00% | 21422,9922 | 21422,6382 | 58712,6212 | 58712,1422 |
| 1,20% | 21422,8251 | 21422,2053 | 58712,3835 | 58711,6489 |
| 1,40% | 21422,2053 | 21420,7788 | 58711,6489 | 58710,7109 |
| 1,60% | 21420,0706 | 21418,8613 | 58710,6076 | 58710,4255 |
| 1,80% | 21418,4190 | 21416,4540 | 58710,3575 | 58710,0494 |
| 2,00% | 21414,1765 | 21413,5583 | 58709,6834 | 58709,5829 |

Berdasarkan tabel ini, dapat dibuat grafik baru untuk membandingkan karakteristik optis pada gelatin sapi dan babi.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan karakteristik *absorption cross section* antara gelatin sapi dan babi



Gambar 4.12 Grafik perbandingan karakteristik *scattering cross section* antara gelatin sapi dan babi

Berdasarkan kedua grafik pada Gambar 4.11 dan 4.12, didapatkan perbedaan yang jelas antara sifat optik gelatin sapi dan babi. Nilai *absorption cross section* maupun *scattering cross section* pada gelatin sapi selalu lebih tinggi dibandingkan dengan gelatin babi di seluruh konsentrasi yang diuji.

4.5 Pembahasan

4.5.1 Pengujian Indeks Bias Gelatin

Indeks bias diukur menggunakan Refraktometer Abbe analog, yang bekerja berdasarkan prinsip pembiasan cahaya ketika cahaya melewati medium dengan indeks bias tertentu. Cahaya berasal dari sumber cahaya eksternal (seperti lampu atau sinar matahari), yang diarahkan ke prisma sebagai komponen utama optiknya. Prisma ini terbuat dari material dengan indeks bias tinggi, seperti kaca optik, yang dirancang untuk memfokuskan, membelokkan, dan mengarahkan cahaya ke arah larutan sampel, seperti gelatin, yang diletakkan di atas prisma. Ketika cahaya melewati batas antara prisma dan larutan sampel, sebagian cahaya masuk ke larutan gelatin, sedangkan sebagian lainnya dibiaskan atau dipantulkan. Pada batas ini, jika sudut datang cahaya lebih besar dari sudut kritis, cahaya akan dipantulkan sepenuhnya ke dalam larutan gelatin, yaitu suatu fenomena yang disebut *total internal reflection*. Refleksi total ini kemudian diarahkan kembali ke prisma, sehingga menghasilkan garis batas terang-gelap di dalam bidang pandang okular refraktometer. Peneliti kemudian melihat garis batas ini melalui okular, di mana garis terang-gelap harus disejajarkan dengan skala pengukuran menggunakan knob penyesuaian. Setelah garis batas terang-gelap disejajarkan, indeks bias larutan dapat dibaca langsung pada skala analog yang terdapat pada alat. Pembacaan ini bergantung pada sudut kritis cahaya, yang mencerminkan interaksi cahaya dengan larutan. Dengan menggunakan Refraktometer Abbe analog, indeks bias dihitung secara manual tanpa sistem elektronik tambahan, sehingga hasil bergantung pada presisi kalibrasi dan keterampilan peneliti.

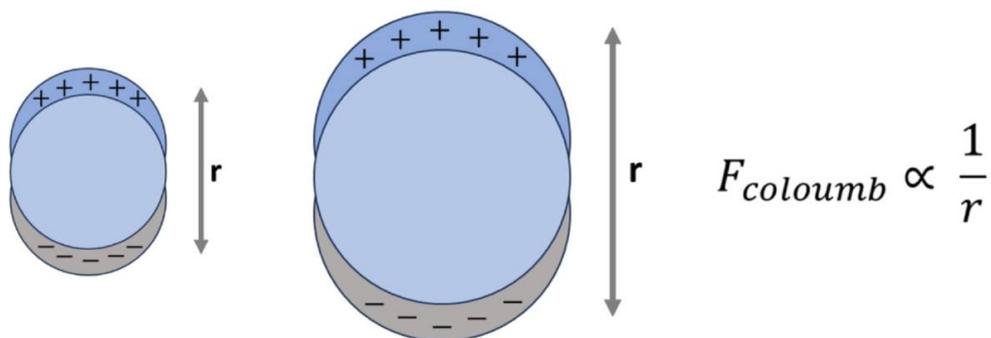
Hasil pengukuran indeks bias menunjukkan bahwa nilai indeks bias meningkat seiring bertambahnya konsentrasi. Peningkatan konsentrasi gelatin mengakibatkan densitas molekul dalam larutan menjadi lebih tinggi, sehingga lebih banyak cahaya yang berinteraksi dengan molekul-molekul tersebut. Akibatnya, laju cahaya bergerak atau merambat dalam larutan menjadi lebih lambat, yang terlihat dalam peningkatan nilai indeks bias. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Didik et al (2021). Fenomena ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah molekul dalam larutan, semakin besar pula hambatan cahaya untuk melewati medium tersebut. Sebagai contoh, pada konsentrasi gelatin sapi 0,80%, nilai indeks bias rata-ratanya adalah 1,3339, sedangkan pada konsentrasi tertinggi, yaitu 2,00%, indeks bias rata-ratanya mencapai 1,3364.

4.5.2 Pengujian Sensitivitas *Nanosphere* Emas dan Perak

Nilai sensitivitas yang lebih tinggi menandakan performa sensor yang lebih baik dalam mendeteksi perubahan indeks bias. Hal ini didukung oleh penelitian Bouhadiche dan Benghorieb (2024) yang menunjukkan bahwa nanopartikel perak (Ag) memiliki sensitivitas tertinggi dibandingkan dengan emas (Au), yaitu 93.33 nm/RIU untuk perak, dan 26 nm/RIU untuk emas. Hasil tersebut sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh peneliti, yang juga menunjukkan bahwa nanopartikel perak memiliki sensitivitas lebih tinggi dengan nilai sebesar 109,134 nm/RIU pada gelatin sapi 0,80% diameter 100 nm dibandingkan dengan nanopartikel emas dengan nilai sebesar 46,1815 nm/RIU pada jenis gelatin dan ukuran diameter yang sama. Hal ini juga terjadi pada setiap variasi konsentrasi dan diameter seperti yang tertera pada Tabel 4.5, 4.6, 4.7, dan 4.8. Luo et al. (2025), menjelaskan penyebab perak lebih sensitif daripada emas karena perak memiliki

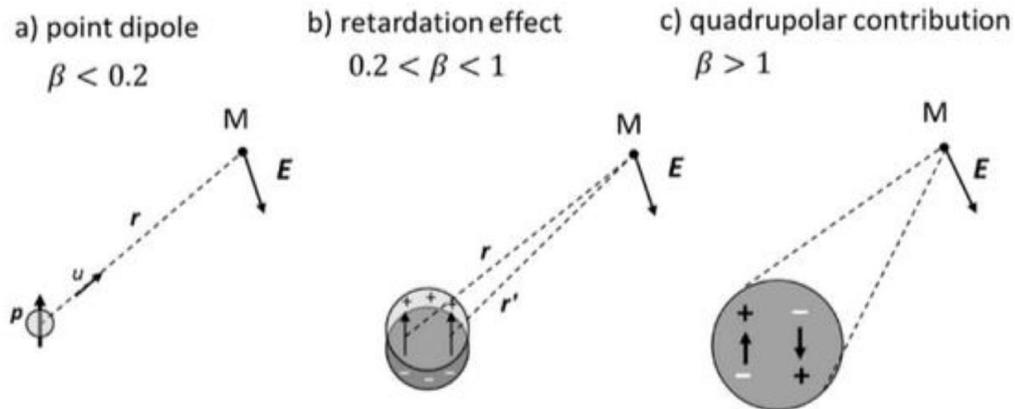
frekuensi osilasi elektron bebas yang lebih tinggi. Osilasi tersebut dapat menghasilkan resonansi plasmon yang lebih kuat dan lebih tajam dibandingkan emas.

Ketika ukuran nanopartikel bertambah, jarak antar muatan di permukaannya juga semakin besar. Hal ini menyebabkan gaya pemulih Coulomb, yaitu gaya tarik elektrostatik yang berusaha mengembalikan muatan ke posisi semula saat terjadi osilasi, menjadi lebih lemah. Karena gaya pemulih ini melemah, osilasi elektron menjadi lebih lambat, sehingga frekuensi resonansi menurun. Akibatnya, panjang gelombang resonansi bergeser ke arah merah (*redshift*), yaitu ke arah gelombang yang lebih panjang (Khoir, 2024). Fenomena ini ditunjukkan dalam Gambar 4.13, yang menggambarkan bagaimana pelemahan gaya Coulomb.



Gambar 4.13 Ilustrasi efek ketika ukuran nanopartikel semakin besar, maka gaya coloumb pada distribusi positif-negatif melemah (Khoir, 2024)

Selain pelemahan gaya Coulomb, nanopartikel yang lebih besar juga mengalami efek retardasi, yaitu keterlambatan dalam interaksi medan elektromagnetik dengan permukaan nanopartikel.



Gambar 4.14 Ilustrasi efek ukuran pada nanopartikel, a) ukuran partikel sangat kecil sehingga dianggap dipol, b) ukuran nanopartikel lebih besar sehingga efek retardasi diperhitungkan, dan c) ketika ukuran partikel lebih besar hingga muncul efek multipol (Khoir, 2024)

Gambar 4.14 mengilustrasikan bagaimana ukuran nanopartikel mempengaruhi distribusi muatan dan medan elektromagnetiknya. Pada ukuran partikel yang sangat kecil, distribusi muatan masih berupa dipol sederhana (Gambar 4.14a), di mana medan elektromagnetik bekerja secara seragam. Namun, seiring bertambahnya ukuran, medan mulai mengalami efek retardasi (Gambar 4.14b), di mana medan elektromagnetik tidak lagi merespons secara seragam di seluruh nanopartikel, menyebabkan penundaan dalam eksitasi elektron. Jika ukurannya bertambah semakin besar lagi, distribusi muatan berkembang menjadi multipol (Gambar 4.14c), yang menghasilkan pola medan yang lebih kompleks. Interferensi antar muatan multipol ini membuat pergeseran spektral semakin besar, meningkatkan sensitivitas terhadap variasi indeks bias medium sekitarnya. Namun, meskipun nanopartikel yang lebih besar cenderung memiliki sensitivitas lebih tinggi dalam mendeteksi perubahan indeks bias, ada batasan tertentu. Jika ukurannya terlalu besar, redaman optik dapat meningkat, yang dapat mengurangi efisiensi resonansi plasmonik (Pluchery & Bryche, 2023).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sensor LSPR sangat dipengaruhi oleh ukuran dan jenis material nanopartikel. Oleh karena itu, peningkatan diameter nanopartikel dapat meningkatkan sensitivitasnya, sehingga lebih efektif untuk aplikasi sensor LSPR untuk deteksi gelatin.

4.5.2 Pengujian Karakteristik *Absorption Cross Section* dan *Scattering Cross Section*

Penambahan gelatin sapi atau babi menghasilkan perubahan pada indeks bias medium di sekitar nanopartikel logam. Karena fenomena LSPR sangat sensitif terhadap perubahan indeks bias, nilai *absorption cross section* dan *scattering cross section* juga ikut berubah. *Cross section*, baik *absorption* maupun *scattering*, adalah parameter yang menggambarkan seberapa besar interaksi cahaya dengan material. *Absorption cross section* merepresentasikan kemampuan material untuk menyerap energi cahaya pada panjang gelombang tertentu. Sementara *scattering cross section* merepresentasikan kemampuan material dalam menyebarkan cahaya. Kedua parameter ini mencerminkan respons material terhadap cahaya. Ketika gelatin ditambahkan ke dalam sistem, interaksi molekul-molekul gelatin dengan nanopartikel logam memengaruhi lingkungan optik di sekitar nanopartikel. Perubahan ini berdampak pada nilai *cross section* yang terdeteksi.

Hasil pengujian *cross section* menunjukkan perbedaan karakteristik pada tiap jenis dan konsentrasi antara gelatin sapi dan babi. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan struktur molekuler dan kandungan protein, yang menentukan bagaimana gelatin berinteraksi dengan cahaya. Seperti yang telah dijelaskan pada penelitian Singh (2024), komposisi molekuler dan struktur protein dalam gelatin berperan dalam menentukan karakteristik penyerapan dan hamburan cahaya, sehingga

menghasilkan pola spektral yang berbeda. Berdasarkan hasil pengujian *cross section* juga didapatkan bahwa intensitas *cross section* pada gelatin babi memiliki nilai yang lebih tinggi daripada gelatin sapi, baik pada *absorption cross section* maupun *scattering cross section*. Hal ini disebabkan oleh struktur molekulnya yang lebih padat sehingga indeks bias meningkat, membuat λ_{LSPR} bergeser ke arah *redshift* (gelombang yang lebih panjang) (Senbo et al, 2016).

4.6 Integrasi Penelitian dengan Al-Qur'an

Dalam Islam, kehalalan suatu bahan ditentukan berdasarkan asal-usulnya. Salah satu bahan yang sering menjadi perhatian adalah gelatin, yang umum digunakan dalam berbagai produk konsumsi. Gelatin dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk sapi dan babi. Gelatin yang berasal dari babi lebih sering digunakan karena lebih murah dan mudah diperoleh. Menurut laporan dari Reportlinker International pada tahun 2020, produksi gelatin yang berasal dari babi adalah yang terbesar, yaitu sebesar 42,9% dibandingkan dengan sapi yaitu sebesar 28,7%. Hal ini menimbulkan kekhawatiran bagi umat Muslim dalam memastikan kehalalan suatu gelatin, karena dalam Al-Qur'an telah disebutkan secara tegas bahwa Allah SWT mengharamkan babi sebagaimana yang disebutkan dalam Surat Al-Maidah ayat 3:

حُرِّمَتْ عَلَيْكُمُ الْمَيْتَةُ وَالدَّمُ وَحُلْمُ الْخِنْزِيرِ وَمَا أُهْلِيَ لِعَيْبٍ لِّلَّهِ بِهِ

Artinya: “Diharamkan bagimu (memakan) bangkai, darah, daging babi, (daging hewan) yang disembelih atas nama selain Allah.” (Q.S. Al-Mā'idah (5): 3).

Menurut Tafsir Al-Wajiz, ayat ini menunjukkan bahwa daging babi dan bagian tubuh lainnya, seperti tulang, lemak, serta produk turunannya adalah haram

(Prakasa, 2024). Pemahaman tersebut sudah sesuai dengan bahasa orang Arab yang menganggap bahwa penyebutan kata لَحْمٌ sudah mencakup keseluruhan tubuh hewan tersebut (Ibnu Katsir, n.d., pp. 182-183). Hal inilah yang mendasari keputusan Majelis Ulama Indonesia (MUI), yang menyatakan bahwa pemanfaatan babi dan turunannya sebagai produk konsumsi adalah haram, serta tidak ada toleransi sedikitpun (Sari & Syamsurizal, 2024). Dengan demikian, gelatin babi meskipun telah diolah hingga berubah karakteristiknya tetap haram untuk dikonsumsi karena merupakan produk turunan dari kulit, tulang, dan jaringan ikat pada hewan babi.

Kesulitan dalam membedakan gelatin yang berasal dari sapi dan babi akibat kesamaan sifat fisiknya, menjadi tantangan dalam memastikan kehalalannya. Kondisi ini menunjukkan betapa pentingnya pengembangan metode deteksi yang akurat. Oleh karena itu, perkembangan teknologi terus dimanfaatkan dalam pengembangan sensor dengan berbagai variasi parameter untuk memperoleh kinerja deteksi yang optimal.

Dalam penelitian ini, dilakukan deteksi untuk membedakan gelatin sapi dan babi menggunakan sensor *Localized Surface Plasmon Resonance* (LSPR) dengan *nanosphere* Au (emas) dan Ag (perak), serta metode komputasi berbasis *Metallic Nanoparticles Boundary Element Method* (MNPBEM). Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan bahwa perbedaan antara kedua jenis gelatin ini dapat dibedakan secara numerik. Adanya perbedaan ini membuktikan bahwa sensor yang memanfaatkan fenomena LSPR dapat dikembangkan untuk digunakan sebagai alat deteksi, sehingga dapat membantu masyarakat dalam membedakan gelatin sapi dan babi.

Imam Syafi'i pernah mengatakan bahwa seseorang yang menginginkan dunia, akhirat, maupun keduanya harus dengan ilmu. Hal ini menunjukkan seberapa pentingnya ilmu dalam ajaran Islam (Haryono et al, 2024). Dalam Surat Al-Mujadilah ayat 11, Allah SWT. berfirman:

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ

Artinya: “Allah akan meninggikan derajat orang-orang yang beriman di antara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.” (Q.S. Al-Mujadilah (58): 11).

Zubdatut Tafsir Min Fathil Qadir menjelaskan bahwa Allah SWT mengangkat derajat orang yang beriman dan berilmu dengan kemuliaan di dunia dan pahala di akhirat. Kata الْعِلْمُ (ilmu) dalam ayat ini masih dalam konteks umum yang tidak hanya menunjukkan ilmu agama, tetapi juga mencakup ilmu lain. Berdasarkan hal tersebut, para mufasir modern berpendapat bahwa ayat-ayat tentang ilmu harus mencakup dua aspek, yaitu religius dan ilmiah, tanpa meninggalkan salah satunya (Sabarni, 2024). Lebih lanjut, Tafsir Li Yaddabbaru Ayatih menjelaskan bahwa Al-Qur'an mengajak umat manusia untuk meneliti alam semesta dan mengungkapkan rahasianya, sehingga dengan demikian kita dapat lebih mengenal pencipta-Nya.

Seseorang yang tidak hanya menuntut ilmu tetapi juga menyebarkannya akan memberikan manfaat yang lebih luas dalam masyarakat karena dapat membimbing menuju pemahaman yang benar (Haryono et al, 2024). Penelitian ini dilakukan untuk memberikan manfaat bagi diri sendiri dan orang lain. Penulis tidak hanya belajar dan memperdalam pemahaman dalam bidang sains, tetapi juga turut serta dalam memberikan solusi bagi masyarakat, khususnya dalam deteksi kehalalan

gelatin sapi dan babi. Semakin luas ilmu ini disebarkan, semakin besar pula manfaat yang didapatkan, baik untuk kepentingan dunia maupun sebagai bagian dari ibadah yang berpahala di sisi Allah SWT.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menjawab rumusan masalah yang diajukan, di mana didapatkan bahwa:

1. Sensitivitas *nanosphere* emas dan perak dalam deteksi gelatin dengan sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM didapatkan bahwa *nanosphere* perak dengan ukuran 100 nm memiliki sensitivitas tertinggi terhadap medium gelatin sapi dan babi, dengan nilai 109,134 nm/RIU pada gelatin sapi konsentrasi 0,80%; 108,323 nm/RIU pada gelatin sapi konsentrasi 2,00%; 109,102 nm/RIU pada gelatin babi 0,80%; dan 108,2912 nm/RIU pada gelatin babi 2,00%.
2. Karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* gelatin sapi dan babi menunjukkan pola yang berbeda secara numerik. Nilai *absorption cross section* pada gelatin sapi yaitu 21423,2675 nm² pada konsentrasi 0,80% dan 21414,1765 nm² pada konsentrasi 2,00% di mana lebih tinggi dibandingkan gelatin babi yaitu 21423,1397 nm² pada 0,80% dan 21413,5583 nm² pada 2,00%. Adapun nilai *scattering cross section* pada gelatin sapi yaitu 58713,0858 nm² pada konsentrasi 0,80% dan 58709,6834 nm² pada konsentrasi 2,00%, yang juga lebih tinggi dibandingkan gelatin babi yaitu 58712,8553 nm² pada 0,80% dan 58709,5829 nm² pada 2,00%.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan analisis yang telah dilakukan, beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Meningkatkan kompleksitas simulasi dengan mempertimbangkan interaksi antar partikel. Saat ini, simulasi LSPR menggunakan MNPBEM hanya berfokus pada satuan partikel tunggal, sehingga belum menganalisis efek kolektif antar partikel dalam sistem plasmonik. Untuk itu, penelitian berikutnya dapat menggunakan metode yang sama, yaitu *Boundary Element Method* (BEM), tetapi diterapkan dalam *Software* Ansys Lumerical untuk mengevaluasi interaksi antar partikel dalam sistem multi-nanopartikel.
2. Selain material emas dan perak, dapat dilakukan eksplorasi terhadap material plasmonik lain, seperti material tembaga (Cu). Material ini berpotensi untuk digunakan dalam deteksi gelatin dengan metode LSPR.

Kesimpulan Akhir penelitian ini membuktikan bahwa sensor berbasis LSPR menggunakan MNPBEM dapat digunakan untuk mendeteksi sumber gelatin dengan sensitivitas tinggi. *Nanosphere* perak dengan ukuran 100 nm memiliki sensitivitas tertinggi dalam deteksi gelatin, sementara karakteristik *absorption cross section* dan *scattering cross section* gelatin sapi lebih tinggi dibandingkan gelatin babi.

Dengan pengembangan lebih lanjut, metode ini berpotensi menjadi alternatif dalam deteksi halal-haram dalam industri pangan dan farmasi, serta dapat

diterapkan pada bidang lain yang memerlukan sensor optik dengan sensitivitas tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdassah, M. (2017). Nanopartikel dengan Gelasi Ionik. *Farmaka*, 15(1), 45-52.
- Amir, H., Fariborz, Renata, J., & Joseph, S. (2015). How important is $i\epsilon$ in QFT? *arXiv: High Energy Physics – Phenomenology*, doi: 10.1142/S0217751X15500712
- Aji, G. S. (2024). *Studi Respon Spektrum Localized Surface Plasmon Resonance Berbasis Serat Optik Mode Refleksi pada Gelatin Sapi dan Babi* (Tesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Akimov, Y. A. (2024). Mie scattering theory: A review of physical features and limitations. *arXiv*, 1-9.
- Alipal, J., Mohd Pu'ad, N. A. S., Lee, T. C., Nayan, N. H. M., Sahari, N., Basri, H., Idris, M. I., & Abdullah, H. Z. (2019). A Review of Gelatin: Properties, Sources, Process, Application, and Commercialisation. *Materials Today: Proceedings*, 42, 240-250.
- Anwar, A., Minhaz, A., Khan, N. A., Kalantari, K., Aifi, A. B. M., & Shah, M. R. (2018). Synthesis of Gold Nanoparticles Stabilized by a Pyrazinium Thioacetate Ligand: A New Colometric Nanosensor for Detection of Heavy Metal Pd(II). *Sensors and Actuators B; Chemical*, 257, 875-881.
- Arfan, A. R. (2017). *Sintesis Nanopartikel Perak Menggunakan Ekstrak Hidroid Aglaophenia cupressina Lamouroux sebagai Bioreduktor dan Uji Potensinya sebagai Antibakteri* (Skripsi). Universitas Hassanuddin.
- Aris, E. S., Jumiono, A., & Akil, S. (2020). Identifikasi Titik Kritis Kehalalan Gelatin. *Jurnal Pangan Halal*, 2(1), 17-22.
- Ariyanta, A. H. (2014). Preparasi Nanopartikel Perak dengan Metode Reduksi dan Aplikasinya sebagai Antibakteri Penyebab Luka Infeksi. *JURNAL MKMI*, 36-42.
- Badi'ah, H. I. & Qomariyah, A. (2023). Potensi Nanopartikel Emas (AuNp) sebagai Sensor Kolometri untuk Deteksi Asam Sialat. *Jurnal Filsafat, Sains, Teknologi, dan Sosial Budaya*, 29(4), 7-12.
- Bhalla, N. & Shen A. Q. (2024). Localized Surface Plasmon Resonance Sensing and its Interplay with Fluidics. *Langmuir*, 40(19), 9842-9854.
- Bonatti, L., Gil, G., Giovannini, T., Corni, S., & Cappelli, C. (2020). Plasmonic Resonances of Metal Nanoparticles: Atomistic vs. Continuum Approaches. *Front Chem*, 8, 340.
- Bouhadiche, A. & Benghorieb, S. (2024). Oxide Coated Noble Metal Nanoparticles in Biosensors: Analytical Modeling and Discrete Dipole Approximation Method. *Physics of the Solid State*, 66(09), 299-312.
- Cahyanto, T. & Suryani, Y. (2019). *Deteksi Kandungan DNA Babi pada Bakso Jajanan Anak Sekolah Dasar di Kota Bandung dengan Teknik PCR* (Laporan

- Penelitian). Universitas Islam Sunan Gunung Djati Bandung. Diakses pada 17 Maret 2025, dari <https://digilib.uinsgd.ac.id/31080/1>
- Chauhan, M. & Singh, V. K. (2021). Review on Recent Experimental SPR/LPPR Based Fiber Optic Analyte Sensors. *Optical Fiber Technology*, 64.
- Chen, J., Yuan, D., Yang, R., & Xaing, J. (2024). Multi-Domain Wavelet Boundary Element Method for Calculating Two-Dimensional Stress Intensity Factors. *Heliyon*, 10(8), e29423.
- Dan, E. (2020). *Maxwell's Equations*. doi: 10.2307/j.ctt2111gdt.9
- Didik, L. A., Safarwadi, I., & Muslimah. (2021). Pengukuran Indeks Bias Larutan Untuk Mengetahui Kadar Gula Dalam Tebu dengan Menggunakan Metode Difraksi Fraunhofer Celah Tunggal. *KONSTAN*, 6(1), 35-42. <https://jurnalkonstan.ac.id/index.php/jurnal/article/download/68/66/?utm>
- Djuhana, D. (2020, December 22). *I-4 Lecture Klaster "Materials Science and Engineering" edisi ke-4* [Video]. Youtube. <https://www.youtube.com/live/abgIgFEWcko>
- Eryılmaz, H. S., Işık, B. Ş., & Demircan, E. (2017). Origin Determination and Differentiation of Gelatin Species of Bovine, Porcine, and Piscine Through Analytical Methods. *Turkish Journal of Agriculture. Agrifood Science*. <http://www.agrifoodscience.com/index.php/TURJAF/article/view/1077>
- Fazrin, E. I., Naviardianti, A. I., Wyantuti, S., Gaffar, S., & Hartati, Y. W. (2020). Review: Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Emas (AuNP) serta Konjugasi AuNP dengan DNA dalam Aplikasi Biosensor Elektrokimia. *PendIPA*, 4(2), 21-39.
- Flesch, J., Kappen, M., Drees, C., You, C., & Piehler J. (2020). Self-Assembly of Robust Gold Nanoparticle Monolayer Architectures for Quantitative Protein Interaction Analysis by LSPR Spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412, 3413-3422.
- Gezgin, S. Y., Kepceoglu, A., Gundogdu, Y., Zongo, S., Zawadzka, A., Kilic, H. S., & Sahraoui, B. (2020). Effect of Ar Gas Pressure on LSPR Property of Au Nanoparticles: Comparison of Experimental and Theoretical Studies. *Nanomaterials (Basel)*, 10(6), 1071.
- Gharibshahi, L. (2017). *Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles by Thermal Treatment Method in Universiti Putra Malaysia* (Tesis). Universiti Putra Malaysia.
- Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to Electrodynamics*. Wiley.
- Guminiak, M., Kaminski, M., Lenartowicz, A., & Przychodzy, M. (2023). Stochastic Vibrations of a System of Plates Immersed in Fluid Using a Coupled Boundary Element, Finite Element, and Finite Difference Methods Approach. *Materials (Basel)*, 16(9), 3583.
- Hassan, N., Ahmad, T., Zain, N. M., & Awang, S. R. (2021). Identification of

- Bovine, Porcine, and Fish Gelatin Signatures Using Chemometrics Fuzzy Graph Method. *Scientific Reports. Nature*.
<https://www.nature.com/articles/s41598-021-89358-2>
- Husni, P., Putriana, N. A., & Wicaksono, I. A. (2017). Metode Deteksi Kandungan Babi dan Alkohol dalam Eksipien Farmasi dan Produk Obat untuk Menjamin Kehalalan Sediaan Obat. *Majalah Farmasetika*, 2(1), 1-7.
- Ibnu Katsir. (n.d.). *Tafsir Ibnu Katsir Juz 6* (B. Abubakar & H. A. Abubakar, Trans.). Sinar Baru Algesindo, pp. 182-183.
- Jeffrey, R. L. & Ridgeway, S. (2020). Analysis of the Experiment Defining the Dielectric Constant. *Indiana University Mathematics Journal*, doi: 10.1512/IUMJ.2020.69.7967
- Kartini, W. P., Saputra, E., Mayesmy, R. H., & Firdaus, M. L. (2020). Review Nanomaterial sebagai Sensor Melamin dan Zat Aditif Lainnya Secara Kolometri. *Journal of Science Education*, 2(3), 98-106.
- Kasiram, M. (2017). *Metodologi penelitian: Kualitatif–Kuantitatif*. Malang: UIN-Mailiki Press.
- Kaye, S., Zeng, Z., Sanders, M., Chittur, K., Koelle, P. M., Manne, U., Lin, Y., & Wei, J., (2017). Label-Free Detection of DNA Hybridization with A Compact LSPR-based Fiber-Optic Sensor. *Analyst*, 142(11), 1974-1981.
- Khoir, A. (2024). *Identifikasi Properti Optik pada Nanopartikel Emas dan Perak dalam Fenomena Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) Menggunakan Simulasi MNPBEM* (Skripsi). UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Lee, S., Song, H., Ahn, H., Kim, S., Choi, J., & Kim, K. (2021). Fiber-Optic Localized Surface Plasmon Resonance Sensors Based on Nanomaterials. *Sensors*, 21(3), 819.
- Liu, L., Wang, H., Sulemana, H., Xie, B., & Gao, L. (2023). Detection of Alpha Fetoprotein Based on AIEgen Nanosphere Labeled Aptamer Combined with Sandwich Structure of Magnetic Gold Nanocomposites. *Biosensors (Basel)*, 13(3), 351.
- Liu, Y., Zhang, N., Li, P., Yu, L., Chen, S., Zhang, Y., Jing, Z., & Peng, W. (2019). Low-Cost Localized Surface Plasmon Resonance Biosensing Platform with a Response Enhancement for Protein Detection. *Nanomaterials*, 9(7), 1019.
- Locarno, M. & Brinks, D. (2023). Analytical Calculation of Plasmonic Resonances in Metal Nanoparticles: A Simple Guide. *Am. J. Phys*, 91(7), 538. DOI: <https://doi.org/10.1119/5.0094967>
- Luo, C., Tian, M., Cui, Y., & Ma, X. (2025). Applications and Progress of Localized Surface Plasmon Resonance in Detections with Single-molecule Sensitivity. *Acta Chimica Sinica*, 83(1): 60-71.
- Mardhiyah, R., Hidayati, & Masril. (2014). Analisis Rambatan Gelombang Elektromagnetik dalam Fiber Optik Menggunakan Pendekatan Finite

- Difference Metoda Laasonen. *Pillar of Physics*, 4, 9-16.
- Mirau, P. A., Smith, J. E., Chavez, J. L., Hagen, A., Kelley-loughnane, N., & Naik, R. R. (2017). Structured DNA Aptamer Interaction with Gold Nanoparticles.
- Muttaqien, S. E., Khoris, I. M., Pambudi, S., & Park, E. Y. (2023). *Sensors*, 23(1), 160.
- Nam, H., Lillehoj, H. S., & Lee, Y. (2025). Development of Antigen-Capture Enzyme-linked Immunoassay for Chicken Interleukin-34. *Developmental & Comparative Immunology*. ISSN: 0145-305X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dci.2025.105331>
- Nan, M., Darmawan, B. A., Go, G., Zheng, S., Lee, J., Kim, S., Lee, T., Choi, E., Park, J., & Bang, D. (2023). Wearable Localized Surface Plasmon Resonance-Based Biosensor with Highly Sensitive and Direct Detection of Cortisol in Human Sweat. *Biosensors*, 13(2), 184.
- Noer, Z. & Dayana, I. (2021). *Buku Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Bogor: Guepedia.
- Nurjannah. (2022). *Nanopartikel Emas (Au), Perak (Ag), dan Bimetalik Au-Ag: Sintesa dan Aplikasinya pada Reaksi Hidrogenasi 4-Nitrophenol esis*. Universitas Hassanuddin.
- Nuryadin, B. W. (2020). *Pengantar Fisika Nanomaterial: Teori dan Aplikasi*. Bandung: Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Djati.
- Octaviana, Y., Zakir, M., & Raya, I. (2016). Sintesis Nanopartikel Emas dengan Bioreduktor Ekstrak Daun Belimbing Wuluh (*Averrhoa bilimbi* L) yang Dimodifikasi 2,4,6-Triitol-1,3,5-Triazin untuk Sensor Melamin. *Hasanuddin University Repository*.
- Palani, S., Kenison, J. P., Sabuncu, S., Huang, T., Civitci, F., Esener, S., & Nan, X. (2023). Multispectral Localized Surface Plasmon Resonance (msLSPR) Reveals and Overcomes Spectral and Sensing Heterogeneities of Single Gold Nanoparticles. *ACS Nano*, 17(3), 2266-2278. DOI: 10.1021/acsnano.2c08702
- Paul, C. A., Ion, C., Marilena, S., & George-Marian, V. (2014). FEM Analysis of the Magnetic Field for B-H Relationship Evaluation. doi: 10.1109/ISFEE.2014.7050592
- Pluchery, O., & Bryche, J. (2023). *An Introduction To Plasmonics*. World Scientific Publishing Company. <https://books.google.co.id/books?id=h1jcEAAAQBAJ>
- Prajna, N. D. & Sinha, R. K. (2024). Shape-controlled Synthesis and Bulk Refractive Index Sensitivity Studies of Gold Nanoparticles for LSPR-based Sensing. *Plasmonics*, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02387-1>
- Prakasa, A. B. (2024). *Saran Virtual untuk Pemilihan karakter Terbaik pada Game "Awat Tersesat" Menggunakan Metode Oreste Berbasis Keterampilan Pemain* (Skripsi). UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.

- Priyo, W. (2017). Nanopartikel adalah partikel berukuran sangat kecil, berkisar antara 1 hingga 100 nanometer. *Majalah Farmasetika*, 2(4), 1-3.
- Puspitaningrum, Y. (2015). *Deteksi DNA Gelatin Sapi dan Gelatin Babi pada Simulasi Gummy Vitamin C Menggunakan Real-Time PCR untuk Analisis Kehalalan* (Skripsi). UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Roddu, A. K. (2021). *Sintesis Nanopartikel Emas dan Perak Menggunakan Bioreduktor Ekstrak Daun Okra (*Abelmoschus Esculentus* (L.) Moench) dan Aplikasinya dalam Desain Sensor Gula Darah* (Tesis). Universitas Hassanuddin.
- Sanders, M., Lin, Y., Wei, J., Bono, T., & Lindquist, R. G. (2014). An enhanced LSPR fiber-optic nanoprobe for ultrasensitive detection of protein biomarkers. *Biosensors and Bioelectronics*, 61, 95-101.
- Sari, I. D. (2021). *Diferensiasi Gelatin Babi dan Gelatin Sapi serta Campurannya Menggunakan Metode SPME-GCMS dan Analisis Multivariat* (Skripsi). Institut Pertanian Bogor.
- Sari, W. P. & Syamsurizal, S. (2024). Problematika Xenotransplansi Organ Babi ke Manusia Menurut Perspektif Hukum Islam: *Systematic Literature Review*. *JSI: Jurnal Studi Islam*, 13(1), 88-103. DOI: 10.33477/jsi.v13i1.6511.
- Saputra, F. R. (2014). *Aplikasi Metode SDS-PAGE (Sodium Dodecyl Sulphate Poly Acrylamide Gel Electrophoresis) untuk Mengidentifikasi Sumber Gelatin pada Kapsul Keras* (Skripsi). UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Sasmitaloka, K. S., Miskiyah, M., & Juniawati, J. (2017). Kajian Potensi Kulit Sapi sebagai Bahan Dasar Produksi Gelatin Halal. *Buletin peternakan*, 41(3), 328-337.
- Shabaninezhad, M., & Ramakrishna, G. (2019). Theoretical Investigation of Size, Shape, and Aspect Ratio Effect on the LSPR Sensitivity of Hollow-Gold Nanoshells. *Journal of Chemical Physics*, 150(14).
- Shihab, M. Q. (2002). *Tafsir Al-Mishbah: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Qur'an* (Jilid 7, hlm. 420-421). Lentera Hati.
- Shin, H. (2019). Time-Harmonic Convention of $\text{Exp}(-i\omega t)$ Can be Preferable to $\text{Exp}(+i\omega t)$ (L). *Journal of the Acoustical Society of America*, doi: 10.1121/1.5127184
- Shrestha, Y. K. & Shrestha, K. S. (2023). Fundamentals of Colometry. *Advances in Colometry*.
- Singh, A. (2024). Development of bio-based PVA/gelatin film extracted from Hilsa Ilisha fish. *Research Square*. <https://www.researchsquare.com/article/rs-5453893/latest>
- Soares, L., Csáki, A., Jatschka, J., Fritzsche, W., Flores, O., Franco, R., & Pereira, E. (2014). Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) biosensing using gold nanotriangles: Detection of DNA hybridization events at room-temperature. *Analyst*, 1(1), 1-11.

- Tan, A. J. Y., Ng, S. M., Stoddart, P. R., & Chua, H. S. (2024). Theoretical Model and Design Considerations of U-Shaped Fiber Optic Sensors: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 20(24), 14578-14589. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3011173
- Tushar, K., Kamlesh, S., & Nohar, S. D. (2024). Localized Surface Plasmon Resonance (LSPR) of Nanomaterials for Colorimetric Detection: A Review. *Current Indian science*, 02 doi: 10.2174/012210299x281976240527072849
- Ugwu, K. C., Mbajiorgu, C. C., Okonkwo, W. I., & Ani, A. O. (2018). Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Portable Hand-held Refractometer. *NIJOTECH*, 37(2), 537-542.
- Utama, S. W. (2018). *Fabrikasi Au@TiO₂ dengan Variasi Diameter Emas Nanosphere Melalui Metode Penambahan Al(NO₃)₃ dan NaCl untuk Aplikasi DSSC (Dye- Sensitized Solar Cell)* (Skripsi). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wahyuddin, Afriannsyah, Zainuddin, Z., & Duyo, R. A. (2023). Analisis Kuat Medan Listrik Dan Intensitas Medan Magnet Dengan Menggunakan Jenis Kawat Terhadap Nominal Diameter Penghantar. *Jumptech*, 2(3), 239-245.
- Wibowo, W. A. (2024). Pengertian dan Penggunaan Turbidity Meter. *Multimeter-digital*. <https://multimeter-digital.com/pengertian-dan-penggunaan-turbidity-meter.html>.
- Youlanda, H. (2016). *Ekstraksi dan Evaluasi Gelatin dari Kulit Sapi yang telah Mengalami Proses Buang Bulu Menggunakan Hidrolisis Asam* (Skripsi). UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Yu, C., Fushuo, W., Shuo, Z., Shuquan, C., Xiaodan, H., Xiaohong, Z., Peigen, Z., & Haiqian, Z. (2024). γ -Radiation-Induced in-situ Formation of TiC/MXene Nanocomposites for Superior Electromagnetic Wave Absorption. *Composites Communications*, 50, 102027-102027. doi: 10.1016/j.coco.2024.102027
- Yuliani, Putra, S. F. S., & Emmawati, A. (2024). Komparasi metode presto dan perendaman dalam larutan asam klorida serta kombinasinya dengan papain sebagai pretreatment produksi gelatin kulit sapi. *Journal of Tropical AgriFood*, 5(2), 112-118.
- Zainul, R. (2024). *Penggunaan Elektrokimia pada Desain Elektroda Konduktivitas Tinggi*. Depok: Rajawali Pers.
- Zamroni, A. (2013). Pengukuran Indeks Bias Zat Cair Melalui Metode Pembiasan Menggunakan Plan Paralel. *Jurnal Fisika*, 3(2), 108-111. <https://journal.unnes.ac.id/nju/jf/article/viewFile/3818/3505>
- Zhang, H., Zhou, X., Li, X., Gong, P., Zhang, Y., & Zhao, Y. (2023). Recent Advancements of LSPR Fiber-Optic Biosensing: Combination Methods, Structure, and Prospects. *Biosensors*, 13(3), 405.
- Zilhada, Kusumaningrum, F., & Betha, O. S., (2018). Diferensiasi Gelatin Sapi dan Gelatin Babi pada Gummy Vitamin C Menggunakan Metode Kombinasi Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Principal Component

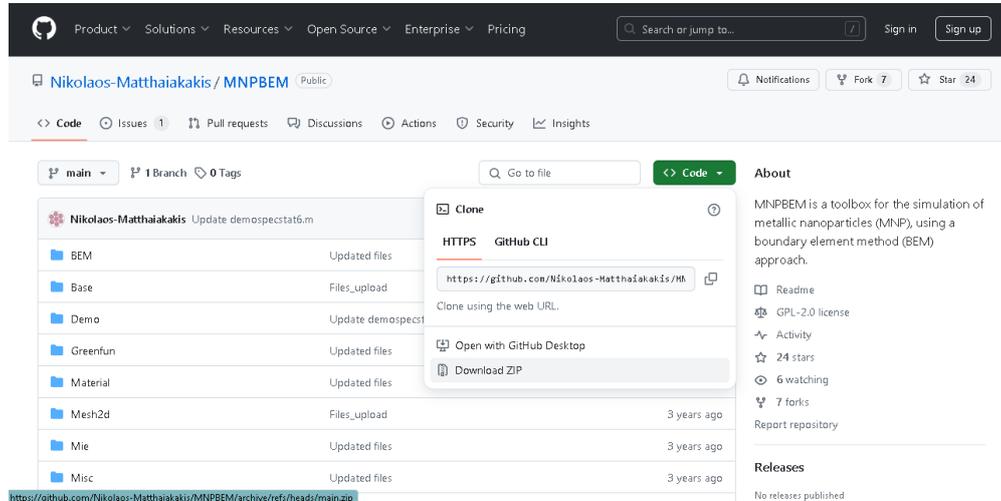
Analysis (PCA). *Pharmaceutical Sciences and Research (PSR)*, 5(2), 90-96.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Langkah simulasi LSPR

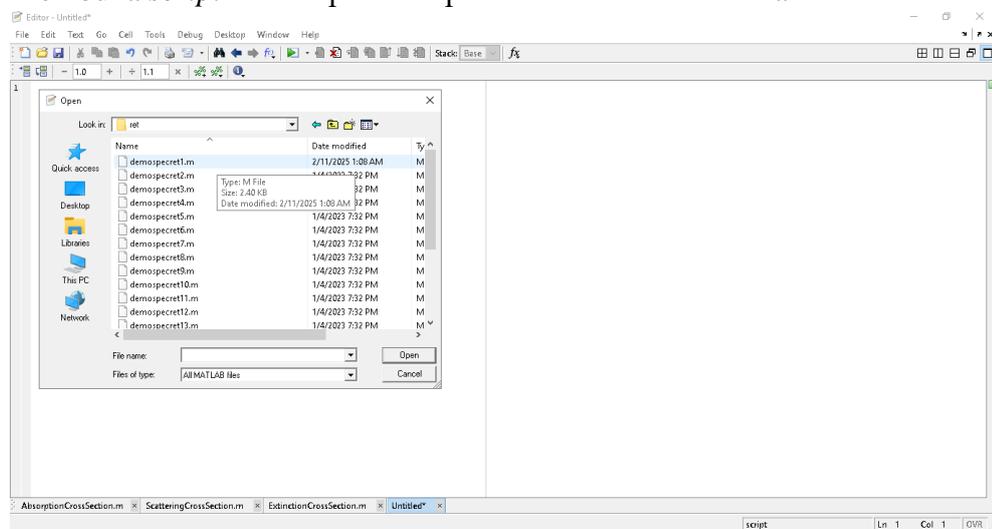
1. Mengunduh MNPBEM *toolbox* melalui *website* GitHub



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* “*demospectr1*” pada folder MNPBEM-main



```

Editor - C:\Users\User\Downloads\MNPBEM-main\MNPBEM-main\Demo\planewave\demosecret1.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
- 1.0 + 1.1 x
This file uses Cell Mode. For information, see the rapid code iteration video, the publishing video, or help.
1 % DEMOSCRET1 - Light scattering of metallic nanosphere.
2 % For a metallic nanosphere and an incoming plane wave, this program
3 % computes the scattering cross section for different light wavelengths
4 % using the full Maxwell equations, and compares the results with Mie
5 % theory.
6 %
7 % Runtime on my computer: 7.4 Sec.
8 %
9 %% initialization
10 % options for BEM simulation
11 op = bemoptions('sim', 'ret', 'interp', 'curv');
12
13 % table of dielectric functions
14 epstab = (epsconst(1.3339), epstable('gold.dat'));
15 % diameters of sphere
16 diameters = 10:10:100;
17 % light wavelength in vacuum
18 ones = linspace(200, 900, 40);
19 % initialize figure
20 figure;
21 hold on;
22 % colors for plotting
23 colors = lines(length(diameters));
24 % loop over each diameter
25 for d_idx = 1:length(diameters)
26     d = diameters(d_idx);
27     %% initialize sphere
28     p = comparticle(epstab, (trisphere(144, d)), [2, 1], 1, op);
29
30     %% BEM simulation
31     % set up BEM solver

```

5. Memodifikasi script tersebut sesuai dengan simulasi yang dibutuhkan

```

Editor - C:\Users\User\Documents\SKRIPSI\CODING\AbsorptionCrossSection.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
- 1.0 + 1.1 x
This file uses Cell Mode. For information, see the rapid code iteration video, the publishing video, or help.
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 epstab = (epsconst(1.3339), epstable('silver.dat'));
9
10 % Diameter of the sphere
11 diameter = 100;
12
13 % Light wavelength in vacuum
14 ones = linspace(200, 900, 40);
15
16 % Initialize figure
17 figure;
18 hold on;
19
20 % Initialize sphere
21 p = comparticle(epstab, (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(ones), 2);

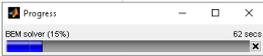
```

6. Menjalankan program

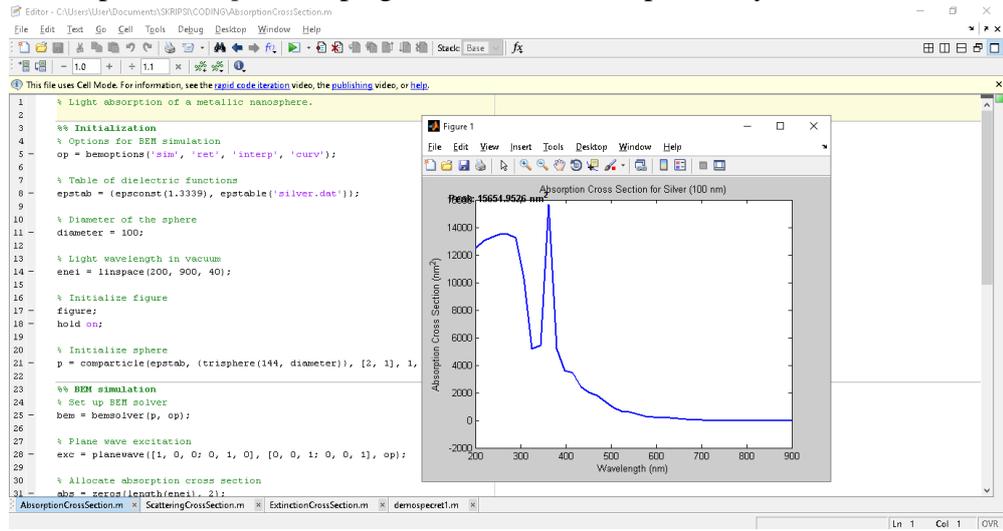
```

Editor - C:\Users\User\Documents\SKRIPSI\CODING\AbsorptionCrossSection.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
- 1.0 + 1.1 x
This file uses Cell Mode. For information, see the rapid code iteration video, the publishing video, or help.
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 epstab = (epsconst(1.3339), epstable('silver.dat'));
9
10 % Diameter of the sphere
11 diameter = 100;
12
13 % Light wavelength in vacuum
14 ones = linspace(200, 900, 40);
15
16 % Initialize figure
17 figure;
18 hold on;
19
20 % Initialize sphere
21 p = comparticle(epstab, (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(ones), 2);

```



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



8. Mencatat data untuk analisis lebih lanjut

Lampiran 2

Source Code Simulasi

1. Demo simulasi “*specret1*” sebelum dimodifikasi

```

% DEMOSPECRET1 - 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;
```

Lampiran 3

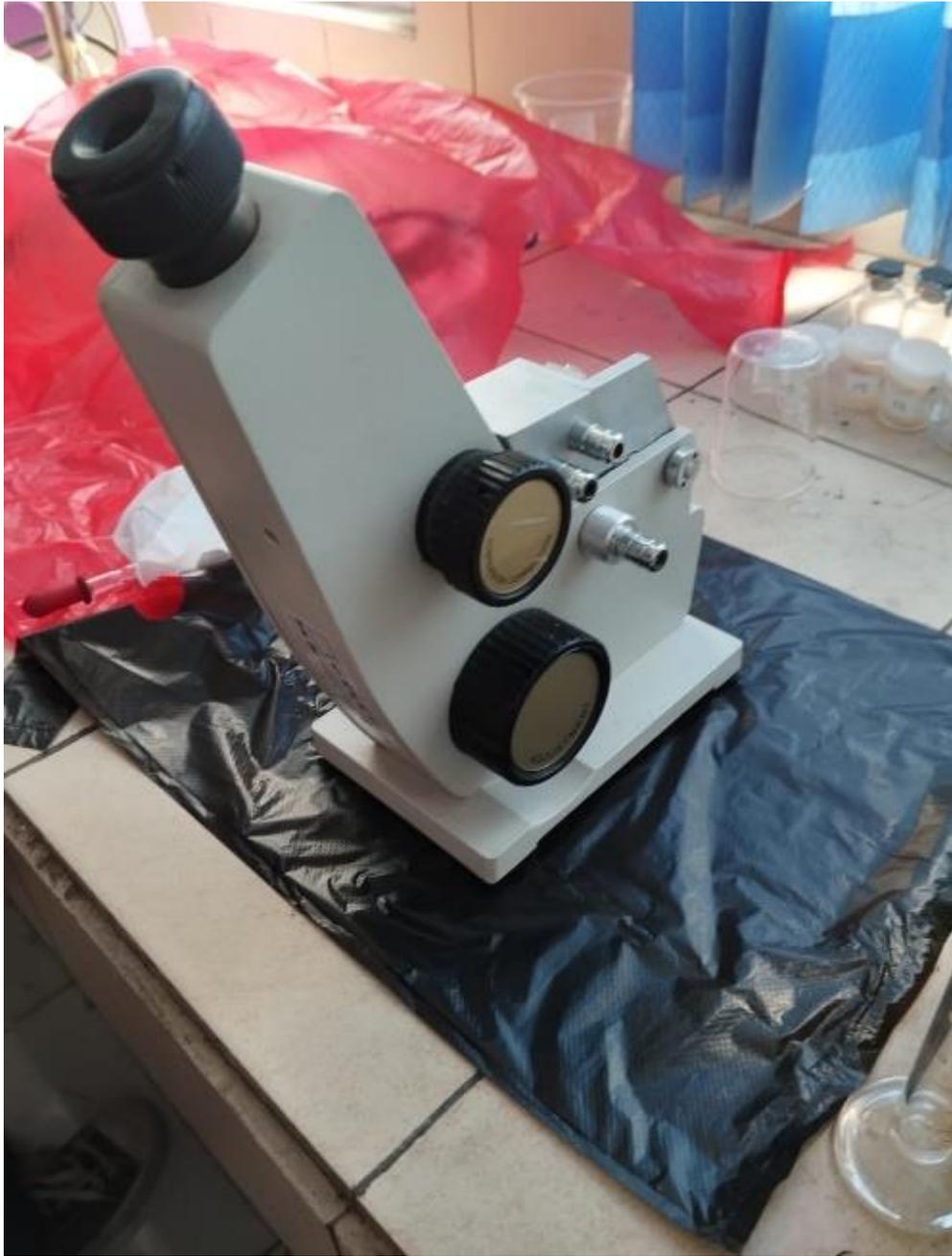
Dokumentasi penelitian

1. Menimbang gelatin dan aquades



2. Mengukur indeks bias larutan gelatin



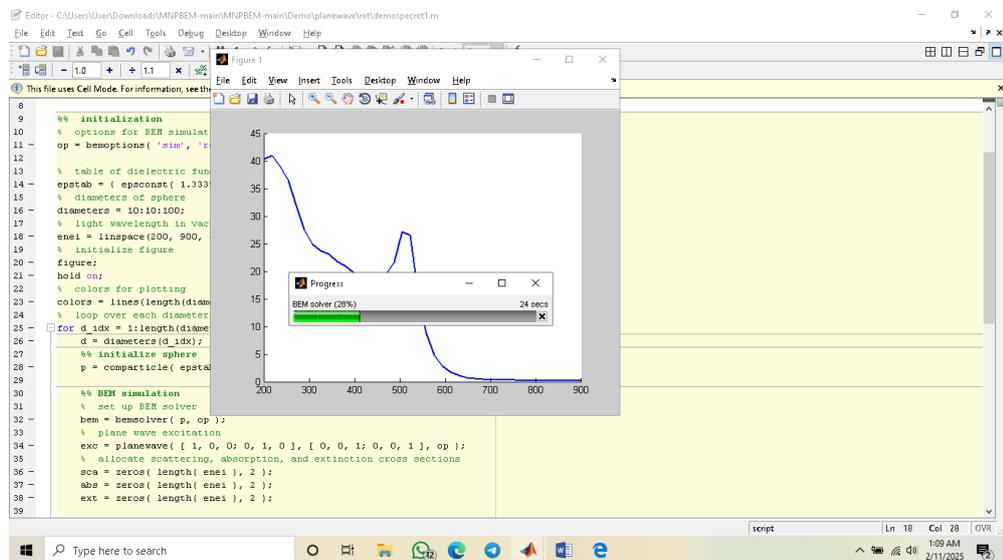


3. Data input, proses simulasi, dan output running program

```

8
9 %% initialization
10 % options for BEM simulation
11 op = bemoptions( 'sim', 'ret', 'interp', 'curv' );
12
13 % table of dielectric functions
14 epstab = ( epsconst( 1,3339 ), epstable( 'gold.dat' ) );
15 % diameters of sphere
16 diameters = 10:10:100;
17 % light wavelength in vacuum
18 enei = linspace(200, 900, 1000);
19 % initialize figure
20 figure;
21 hold on;
22 % colors for plotting
23 colors = lines(length(diameters));
24 % loop over each diameter
25 for d_idx = 1:length(diameters)
26     d = diameters(d_idx);
27     %% initialize sphere
28     p = comparticle( epstab, ( trisphere( 144, d ) ), [ 2, 1 ], 1, op );
29
30     %% BEM simulation
31     % set up BEM solver
32     bem = bemsolver( p, op );
33     % plane wave excitation
34     exc = planewave( [ 1, 0, 0; 0, 1, 0 ], [ 0, 0, 1; 0, 0, 1 ], op );
35     % allocate scattering, absorption, and extinction cross sections
36     sca = zeros( length( enei ), 2 );
37     abs = zeros( length( enei ), 2 );
38     ext = zeros( length( enei ), 2 );
39

```



5. Perhitungan dan pengolahan data

REVISI BAB 4 DATA - Excel

Formula Bar: $= (D14-G14)/(E14-H14)$

| Diameter nanosphere | Gelatin sapi 0,80% | | | | Udara | | Sensitivitas (nm/RIU) | |
|---------------------|--------------------|--------|-------------|-------------|--------|-------------|-----------------------|---------|
| | λ resonansi | | Indeks bias | λ resonansi | | Indeks bias | Emas | Perak |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 513.91 | 366.77 | 1.3339 | 506.91 | 354.85 | 1 | 20.9644 | 35.6993 |
| 20 | 514.61 | 368.87 | 1.3339 | 507.61 | 355.56 | 1 | 20.9644 | 39.8622 |
| 30 | 516.72 | 371.67 | 1.3339 | 507.61 | 356.96 | 1 | 23.0907 | 44.0551 |
| 40 | 516.72 | 375.88 | 1.3339 | 508.31 | 359.76 | 1 | 25.1873 | 48.2779 |
| 50 | 518.12 | 381.48 | 1.3339 | 509.71 | 362.56 | 1 | 25.1873 | 56.6637 |
| 60 | 520.92 | 387.79 | 1.3339 | 511.11 | 366.77 | 1 | 29.3801 | 62.953 |
| 70 | 523.02 | 394.79 | 1.3339 | 512.51 | 372.37 | 1 | 31.4765 | 67.1459 |
| 80 | 526.53 | 403.9 | 1.3339 | 514.61 | 377.98 | 1 | 35.6993 | 77.628 |
| 90 | 530.73 | 413.71 | 1.3339 | 517.42 | 383.58 | 1 | 39.8622 | 90.2366 |
| 100 | 535.64 | 427.03 | 1.3339 | 520.22 | 390.59 | 1 | 46.1815 | 109.134 |

| Diameter nanosphere | Gelatin sapi 2,00% | | | Udara | | Sensitivitas (nm/RIU) | | |
|---------------------|--------------------|--------|-------------|-------------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | λ resonansi | | Indeks bias | λ resonansi | | Indeks bias | Emas | Perak |
| | Emas | Perak | | Emas | Perak | | | |
| 10 | 513.91 | 367.47 | 1.3364 | 506.91 | 354.85 | 1 | 20.8086 | 37.5149 |
| 20 | 514.61 | 368.87 | 1.3364 | 507.61 | 355.56 | 1 | 20.8086 | 39.566 |

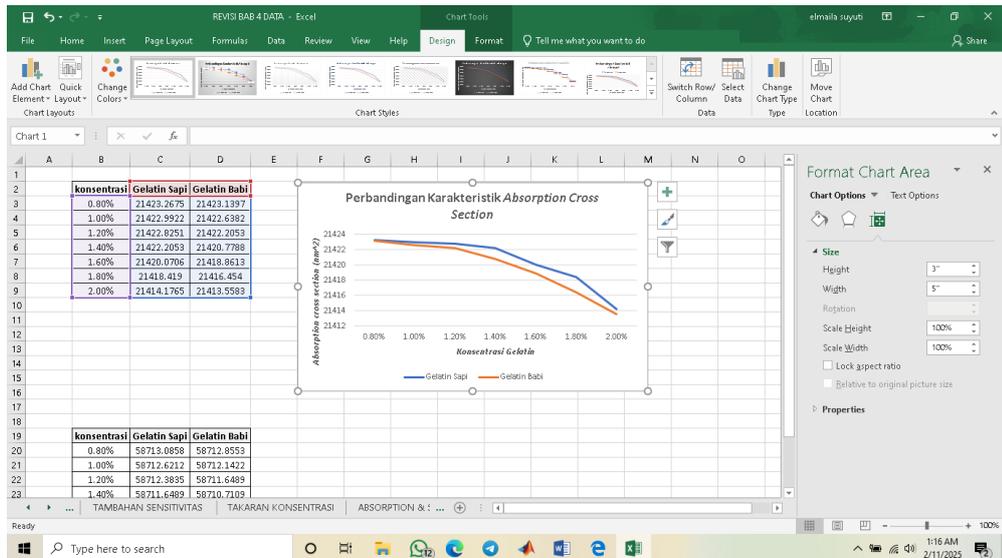
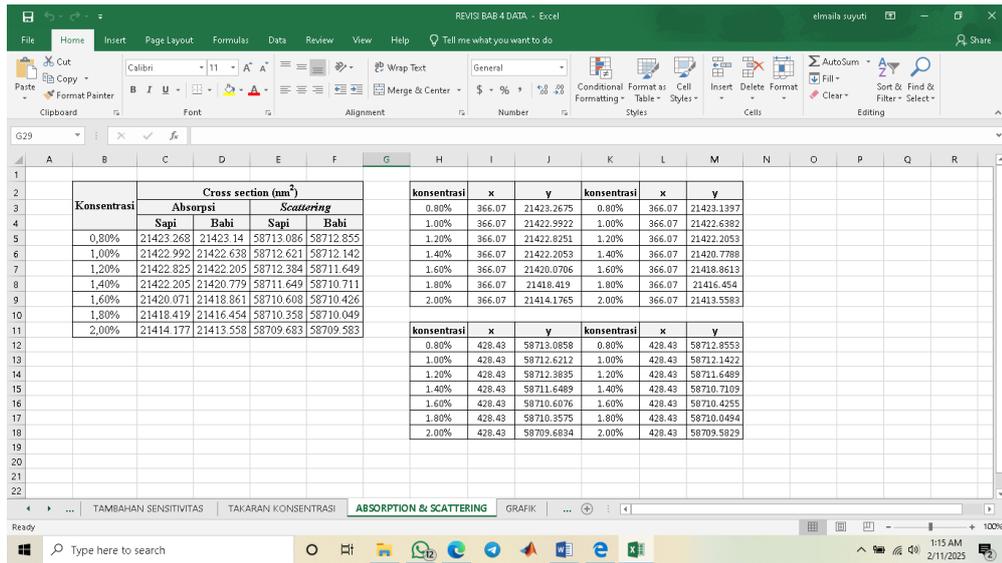
TAMBAHAN SENSITIVITAS TAKARAN KONSENTRASI ABSORPTION & SCATTERING GRAFIK

Copy of REVISI BAB 4 DATA(AutoRecovered) - Excel

Formula Bar: L85

| No | Konsentrasi (%) | Massa Gelatin (g) | Massa Aquades (g) |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,80% | 0,08 | 9,92 |
| 2 | 1,00% | 0,10 | 0,90 |
| 3 | 1,20% | 0,12 | 9,88 |
| 4 | 1,40% | 0,14 | 9,86 |
| 5 | 1,60% | 0,16 | 9,84 |
| 6 | 1,80% | 0,18 | 9,82 |
| 7 | 2,00% | 0,20 | 9,80 |

REVISI SENSITIVITAS TAMBAHAN SENSITIVITAS SIDANG SKRIPSI TAKARAN KONSENTRASI



Lampiran 4

Bukti Konsultasi Skripsi



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 : 210604110071
 Nama : ZARA AZARIA SUYUTI
 Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
 Jurusan : FISIKA
 Dosen Pembimbing 1 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si
 Dosen Pembimbing 2 : Dr. ERNA HASTUTI, M.Si
 Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : DETEKSI GELATIN SAPI DAN BABI DENGAN NANOSPHERE Au (EMAS) DAN Ag (PERAK) BERBASIS LOCALIZED SURFACE PLASMON RESONANCE (LSPR) MENGGUNAKAN METALLIC NANOPARTICLES BOUNDARY ELEMENT METHOD (MNPBEM)

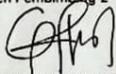
IDENTITAS BIMBINGAN

| No | Tanggal Bimbingan | Nama Pembimbing | Deskripsi Proses Bimbingan | Tahun Akademik | Status |
|----|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------|
| 1 | 22 Agustus 2024 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | Konsultasi Judul | Ganjil 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 2 | 05 September 2024 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | BAB I: Pendahuluan | Ganjil 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 3 | 17 Oktober 2024 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | BAB II: Tinjauan Pustaka | Ganjil 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 4 | 07 November 2024 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | BAB III: Metode Penelitian | Ganjil 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 5 | 05 Desember 2024 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | Revisi Seminar Proposal | Ganjil 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 6 | 16 Januari 2025 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | BAB IV: Hasil dan Pembahasan | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 7 | 06 Februari 2025 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | BAB V: Penutup | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 8 | 17 Februari 2025 | Dr. ERNA HASTUTI, M.Si | Integrasi Al-Qur'an BAB I dan IV | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 9 | 27 Februari 2025 | Dr. ERNA HASTUTI, M.Si | Integrasi Al-Qur'an BAB IV | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 10 | 04 Maret 2025 | Dr. ERNA HASTUTI, M.Si | Integrasi Al-Qur'an BAB II dan IV | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 11 | 06 Maret 2025 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | Revisi Seminar Hasil | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |
| 12 | 18 Maret 2025 | WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si | Revisi Sidang Skripsi | Genap 2024/2025 | Sudah Dikoreksi |

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Malang, 21 April 2025

Dosen Pembimbing 2



Dr. ERNA HASTUTI, M.Si

Dosen Pembimbing 1



WIWIS SASMITANINGHIDAYAH, M.Si

Kajur. Akaprodri,

