

**SIMULASI DETEKSI GELATIN BABI DENGAN SENSOR SPR  
BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE *FINITE-  
DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**APRILINA EKA SARI**  
**NIM. 210604110018**



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

**HALAMAN JUDUL**

**SIMULASI DETEKSI GELATIN BABI DENGAN SENSOR SPR  
BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE *FINITE-  
DIFFERENCE TIME-DOMAIN* (FDTD)**

**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:  
APRILINA EKA SARI  
NIM. 210604110018**

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

## HALAMAN PERSETUJUAN

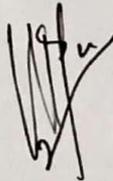
SIMULASI DETEKSI GELATIN BABI DENGAN SENSOR SPR BERBASIS  
FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-  
DOMAIN* (FDTD)

SKRIPSI

Oleh:  
Aprilina Eka Sari  
NIM. 210604110018

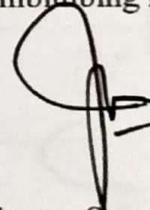
Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji  
Pada tanggal, 08 Mei 2025

Pembimbing I



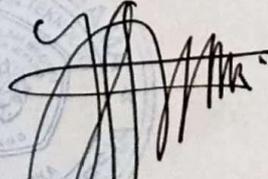
Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si  
NIP. 19870215 2023 212 031

Pembimbing II



Dr. Umaiatus Syarifah, MA  
NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui  
Ketua Program Studi



Dr. Inam Tazi, M.Si  
NIP. 19740730 200312 1 002

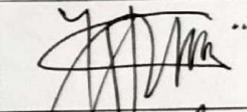
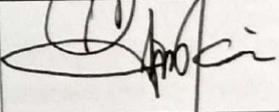
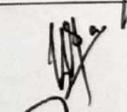
## HALAMAN PENGESAHAN

SIMULASI DETEKSI GELATIN BABI DENGAN SENSOR SPR BERBASIS  
FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE *FINITE-DIFFERENCE TIME-  
DOMAIN* (FDTD)

### SKRIPSI

Oleh:  
Aprilina Eka Sari  
NIM. 210604110018

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji  
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)  
Pada Tanggal, 20 Mei 2025

Penguji Utama :	<u>Dr. Imam Tazi, M.Si</u> NIP. 19740730 200312 1 002	
Ketua Penguji :	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji :	<u>Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si</u> NIP. 19870215 2023 212 031	
Anggota Penguji :	<u>Dr. Umayatus Syarifah, MA</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,  
Ketua Program Studi,



  
Dr. Imam Tazi, M.Si  
NIP. 19740730 200312 1 002

## PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : APRILINA EKA SARI  
NIM : 210604110018  
Jurusan : FISIKA  
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI  
Judul Penelitian : Simulasi Deteksi Gelatin Babi dengan Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)

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

Malang, 08 April 2025  
Yang Membuat Pernyataan



*Aprilina*  
Aprilina Eka Sari  
NIM. 210604110018

## **MOTTO**

Aku telah berdiri di tengah badai, tapi aku tidak runtuh. Aku percaya: badai hanyalah tamu sementara dan langit selalu tahu caranya biru kembali

“Jadi sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”  
(Q.S al – Insyirah (94): 6)

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan untuk:

- Kepada **Bapak Mulyono**, sosok tangguh yang menjadi superhero dalam hidup saya. Terima kasih atas setiap keringat dan pengorbanan yang tak pernah terlihat di balik kesederhanaan. Meski Bapak tidak pernah duduk di bangku pendidikan tinggi, Bapak justru mengantarkan anakmu untuk bisa mengenyamnya. Dalam diam Bapak mengajarkan keteguhan, dalam kerja keras Bapak menanamkan kekuatan. Gelar ini adalah buah dari langkah besar yang Bapak tempuh dengan penuh tanggung jawab dan cinta yang tak terucap.
- Kepada **Ibu Lamisri Kumalasari**, perempuan hebat yang menjadi pintu surga bagi anak-anaknya. Dalam kehangatan yang Ibu berikan, saya belajar arti ketulusan, dalam doamu yang senyap saya menemukan kekuatan. Ibu tak pernah menuntut apa-apa, tapi selalu memberi segalanya—waktu, tenaga, perhatian, kasih sayang, dan doa tanpa batas. Gelar ini bukan hanya milik saya, melainkan bagian dari cinta dan perjuangan Ibu yang tidak akan pernah mampu saya balas.
- Adikku tercinta, **Aurel Dwi Indriaswari**. Meskipun kakakmu ini sering terlihat cuek, diam, dan seolah tidak peduli, percayalah... di dalam hati selalu ada doa dan harapan agar kamu bisa tumbuh menjadi pribadi yang jauh lebih baik, lebih kuat, dan lebih bijak daripada kakakmu. Kamu adalah salah satu alasan kakak terus berjuang, karena kakak ingin kamu melihat bahwa tidak ada batas untuk bermimpi, meski jalan kita tidak selalu mudah.
- *At least, to myself **Aprilina Eka Sari** thank you for surviving the storms no one else saw.* Terima kasih kepada diriku sendiri yang telah bertahan tanpa banyak suara, tetap berjalan meski tak selalu tahu arah, dan terus berjuang ketika dunia terasa berat. *You kept going with quiet courage, and that's braver than anyone will ever know.* Hari ini bukan tentang sempurna, tapi tentang tidak menyerah. *Be proud not for how flawless the journey was, but for how fiercely you fought to finish it.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpah rahmat, taufiq dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan proposal penelitian ini dengan baik. Sholawat serta salam tercurahkan pada Nabi Muhammad SAW, yang telah menuntun manusia dari jaman kegelapan menuju jaman yang terang benderang. Semoga syafaatnya mengalir pada kita di yaumul akhir kelak. Aamiin.

Penulis mengucapkan banyak terimakasih atas terselesaikannya proposal penelitian dengan judul “Simulasi Deteksi Gelatin Babi dengan Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite Difference Time-Domain* (FDTD)”, yang mana dalam proses penyusunan proposal penelitian ini penulis mendapat banyak bimbingan, nasihat, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Ibu Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang dan selaku Dosen Penguji Ketua yang telah memberikan masukan dan kritik dalam penelitian ini.
4. Ibu Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si, selaku Dosen Pembimbing yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan sangat baik.
5. Ibu Dr. Umairyatus Syarifah, M.A., selaku Dosen Pembimbing integrasi yang telah memberikan bimbingan dan dukungan yang sangat berharga.

6. Ibu Erika Rani, M.Si, selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan masukan dan kritik konstruktif demi penyempurnaan penelitian ini.
7. Bapak Dr. Eng. Wildan Panji Tresna, M.T. atas saran dan masukan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Bapak Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd, M.Kes. selaku dosen wali atas bimbingan dan perhatiannya selama masa studi saya.
9. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
10. Kedua orang tua penulis, Bapak Mulyono dan Ibu Lamisri Kumalasari atas doa, dukungan dan kasih sayangnya yang tiada henti sepanjang perjalanan ini.
11. Adik penulis, Aurel Dwi Indriaswari, serta keluarga besar penulis yang telah menjadi sumber semangat, ketenangan, dan doa yang selalu menyertai setiap langkah dalam menyelesaikan skripsi ini.
12. Ahmad Sirul Mushlih, seseorang yang tak kalah penting kehadirannya. Terimakasih telah menjadi bagian dari perjalanan hidup penulis, dan mendampingi penulis sejak sebelum perkuliahan dimulai hingga detik ini. *You've been there since the first page of this chapter — not just watching, but walking with me. This journey is ours as much as it is mine.*
13. Efendi dan Novi Pratiwi selaku atasan penulis, atas bantuan materi, dukungan, serta arahan yang sangat berarti dalam mendukung kelancaran studi dan penyelesaian skripsi ini serta Rannesha Azzahwa Effendi yang

telah mengembalikan mood penulis saat penulis merasa capek mengerjakan skripsi ini.

14. Rekan riset penulis, Zara Azaria Suyuti, Renita Elok Pebriyanti, Khairut Tamimi, Dedi Riana, dan Firyal Hanun Nisrina yang telah membantu penulis dalam mempelajari segala hal yang berkaitan dengan penelitian penulis.
15. Sahabat penulis, Mareta Helmalia Putri, Yunita Nur Aini, Agustina Dwi Pratiwi, Ismatul Jazilah, Almaida Enggar Ashari, Annisa Rizka Fatihah, Ratna Rahayu, Liturgi Dzauqi Rahmi, Mita Virnanda, dan Anisa Fajar Nuraini yang selalu hadir dengan dukungan, canda, dan semangat di setiap proses, menjadi bagian penting yang menguatkan penulis hingga akhir perjuangan ini.
16. Yohanes Yoga, M. Safi'il Umam, Ahmad Muhtarom, Anthoq Ulayyaqin, Wahyu Gunarwan, Lingga Solehuddin, Erik Candra, M. Rochimin, Hilmy Alifatunnisa, Imelda Firdaus, Ratnatus Sa'adah, Mazidatus Sa'diyah, Anisa Frida, Lathifatuz Zahroh, dan Rizky Mu'amanah selaku teman terdekat penulis yang selalu memberikan dukungan, candaan yang menghibur, dan semangat yang tak pernah putus selama perjalanan penulis menyelesaikan skripsi ini.
17. Luky Nur Azizah, Dwi Yuliati, Lutfi Nasikha, dan Wiji Fiko Teren, serta rekan kerja penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan semangat untuk menyelesaikan skripsi penulis.
18. Kucing penulis yang selalu membangun mood, Laboratorium Geofisika yang menjadi rumah kedua selama proses ini, serta playlist dari berbagai

genre yang tak pernah gagal menjaga fokus dan semangat di tengah keheningan malam dan tekanan deadline. Kalian mungkin bukan manusia, tapi peran kalian nyata dan tidak tergantikan.

19. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu yang telah berkontribusi dalam kelancaran dan keberhasilan penulis dalam menyelesaikan studi ini.

Dalam penyusunan Skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk itu, penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi orang lain.

Malang, 25 Maret 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	Error! Bookmark not defined.
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN</b> .....	<b>v</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>مستخلص البحث</b> .....	<b>xviii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1. Gelatin .....	7
2.1.1. Definisi Gelatin .....	7
2.1.2. Karakteristik Gelatin .....	7
2.1.3. Struktur dan Komposisi Gelatin.....	8
2.1.4. Gelatin Babi.....	10
2.2. <i>Surface Plasmon Resonance</i> (SPR).....	11
2.2.1. Persamaan Maxwell .....	12
2.2.2. Gelombang Elektromagnetik.....	14
2.2.3. Fenomena Eksitasi <i>Surface Plasmons</i> (SPs).....	17
2.2.4. Karakteristik Logam Cu, Ag, dan Au.....	18
2.2.5. Sensor <i>Surface Plasmon Resonance</i> (SPR) berbasis Fiber Optik.....	19
2.2.6. Parameter Kinerja Sensor.....	27
2.3. <i>Finite-Difference Time-Domain</i> (FDTD) .....	28
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	<b>29</b>
3.1. Jenis Penelitian .....	29
3.2. Waktu dan Tempat Penelitian .....	29
3.3. Alat dan Bahan .....	29
3.3.1. Mencari Indeks Bias Gelatin Babi .....	29
3.3.2. Simulasi Perangkat Lunak ( <i>Software</i> ) .....	30
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	30
3.4.1. Mencari Indeks Bias Gelatin Babi .....	31
3.4.2. Diagram Alir pada Simulasi .....	32

3.5. Prosedur Penelitian.....	32
3.5.1. Pengumpulan Data .....	33
3.5.2. Pengukuran Indeks Bias Gelatin Babi.....	33
3.5.3. Simulasi.....	33
3.6. Pengambilan Data .....	35
3.7. Analisis Data .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>39</b>
4.1. Pengujian Indeks Bias .....	39
4.1.1. Pengukuran Komposisi Larutan Gelatin Babi.....	39
4.1.2. Pengukuran Indeks Bias Gelatin Babi.....	40
4.2. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) .....	44
4.3. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Lapisan Logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) .....	49
4.4. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Panjang Probe Sensing .....	56
4.5. Kajian Keislaman .....	62
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>67</b>
5.1. Kesimpulan.....	67
5.2. Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>69</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>73</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Struktur Kimia Gelatin .....	9
<b>Gambar 2. 2</b>	Reaksi Pembentukan Gelatin .....	9
<b>Gambar 2. 3</b>	Ilustrasi Gelombang Elektromagnetik .....	15
<b>Gambar 2. 4</b>	Konfigurasi Kretschmann untuk eksitasi plasmon permukaan pada antarmuka logam-dielektrik yang direalisasikan dalam serat optik multimode (Philosophy, 2014). .....	20
<b>Gambar 2. 5</b>	Ilustrasi Fiber Optik Model Single Mode .....	23
<b>Gambar 2. 6</b>	Pergeseran panjang gelombang resonansi dengan perubahan indeks bias medium penginderaan (Philosophy, 2014).....	23
<b>Gambar 2. 7</b>	Desain Umum Sensor SPR Berbasis Fiber Optik.....	24
<b>Gambar 2. 8</b>	Komponen utama fiber optic .....	25
<b>Gambar 2. 9</b>	Tipikal skema mekanisme set up eksperimen sensor SPR berbasis fiber optic .....	26
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram Alir Mencari Indeks Bias Gelatin Babi.....	31
<b>Gambar 3. 2</b>	Diagram Alir Simulasi .....	32
<b>Gambar 3. 3</b>	Ilustrasi pemodelan struktur desain probe sensing dengan konfigurasi forward scattering. ....	34
<b>Gambar 4. 1</b>	Grafik konsentrasi dengan nilai indeks bias gelatin babi .....	43
<b>Gambar 4. 2</b>	Spektrum transmitansi SPR untuk pengukuran $n = 1.3335$ dengan material pelapis (a) Ag, (b) Au, dan (c) Cu .....	45
<b>Gambar 4. 3</b>	Grafik Perbandingan (a) Sensitivitas dan (b) Figure of Merit dengan variasi ketebalan material logam .....	47
<b>Gambar 4. 4</b>	Spektrum transmitansi SPR pada material pelapis logam (a) Ag, (b) Au, dan (c) Cu.....	50
<b>Gambar 4. 5</b>	Kurva fitting linear antara panjang gelombang resonansi $\lambda_{SPR}$ dan refraktif indeks analisis untuk desain sensor Ag, Au, dan Cu. ....	51
<b>Gambar 4. 6</b>	Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan sensitivitas .....	52
<b>Gambar 4. 7</b>	Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan parameter figure of merit .....	54
<b>Gambar 4. 8</b>	Spektrum transmitansi SPR dengan panjang probe sensing (a) 100 $\mu\text{m}$ , (b) 200 $\mu\text{m}$ , dan (c) 300 $\mu\text{m}$ .....	58
<b>Gambar 4. 9</b>	Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan nilai sensitivitas (nm/RIU) .....	60
<b>Gambar 4. 10</b>	Grafik hubungan antara indeks bias analit dengan nilai FWHM .....	61

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b>	Data Pengukuran Indeks Bias.....	36
<b>Tabel 4. 1</b>	Komposisi larutan gelatin babi .....	40
<b>Tabel 4. 2</b>	Data hasil pengukuran indeks bias gelatin babi pada tiap variasi konsentrasi.....	42

## ABSTRAK

Sari, Aprilina Eka. 2025. **Simulasi Deteksi Gelatin Babi dengan Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)**. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si (II) Dr. Umayyatus Syarifah, M.A

---

**Kata Kunci:** Sensor Surface Plasmon Resonance (SPR), Fiber Optik, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Gelatin Babi

Sensor surface plasmon resonance (SPR) berbasis fiber optik disimulasikan untuk mendeteksi gelatin babi menggunakan pendekatan numerik metode finite-difference time-domain (FDTD). Simulasi dilakukan dengan variasi ketebalan lapisan logam Ag, Au, dan Cu pada rentang 20–100 nm, serta panjang probe sensing 100–300  $\mu\text{m}$ . Indeks bias gelatin babi diuji dalam konsentrasi 0,4–2,0% menggunakan Refraktometer Abbe. Hasil menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi gelatin babi, indeks bias meningkat, menyebabkan pergeseran panjang gelombang resonansi pada spektrum SPR. Evaluasi performa sensor dilakukan melalui parameter sensitivitas ( $S$ ), akurasi deteksi ( $DA$ ), faktor kualitas ( $QF$ ), dan figure of merit ( $FOM$ ). Sensor dengan lapisan Au 40 nm dan panjang probe sensing 100  $\mu\text{m}$  menunjukkan performa terbaik dengan sensitivitas mencapai 4266 nm/RIU. Studi ini menunjukkan bahwa desain sensor SPR berbasis fiber optik mampu mendeteksi gelatin babi secara sensitif dan selektif, serta berpotensi diterapkan dalam industri makanan dan farmasi untuk mendukung sistem jaminan halal.

## ABSTRACT

Sari, Aprilina Eka. 2025. **The Simulation of Porcine Gelatine Detection with Optical Fiber-Based SPR Sensor Using *Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method***. Thesis. Physics Study Program, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisor: (I) Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si (II) Dr. Umayyatus Syarifah, M.A

---

**Keywords:** Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensor, Optical Fiber, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), Porcine Gelatine

The simulation of optical fiber-based surface plasmon resonance (SPR) aims to detect porcine gelatine using a finite-difference time-domain (FDTD) method numerical approach. The simulation employed Ag, Au, and Cu metal layer thickness of 20–100 nm and probe sensing length of 100–300  $\mu\text{m}$ . The refractive index of porcine gelatine was tested using a concentration of 0.4–2.0% and an Abbe Refractometer. The result shows that the higher the porcine gelatine concentration, the higher the refractive index. It leads to resonance wavelength shifts on the SPR spectrum. The sensor performance evaluation employs parameters of sensitivity (S), detection accuracy (DA), quality factor (QF), and figure of merit (FOM). The 40 nm Au layer sensor and 100  $\mu\text{m}$  sensing zone length show the best performance by sensitivity of 4266 nm/RIU. The study shows that an optical fiber-based SPR sensor design can detect porcine gelatine sensitively and selectively, and it has potential application on food and pharmacy industries to support halal warranty system.

## مستخلص البحث

ساري، أبريلينا إيكّا. 2025. محاكاة الكشف عن الجيلاتين من لحم الخنزير باستخدام جهاز الاستشعار الرنين البلازمون السطحي (SPR) القائم على الألياف الضوئية باستخدام طريقة النطاق الزمني للفرق المحدود (FDTD). البحث الجامعي، قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: ويويس ساسميتانينج هداية، الماجستير؛ المشرف الثاني: أمية الشريفة، الماجستير.

---

**الكلمات الرئيسية:** جهاز استشعار رنين بلازمون سطحي (SPR)، ألياف ضوئية، طريقة نطاق زمني لفرق محدود (FDTD)، جيلاتين من لحم خنزير.

تمت محاكاة استشعار الرنين البلازمون السطحي (SPR) القائم على الألياف الضوئية للكشف عن الجيلاتين من لحم الخنزير باستخدام طريقة النطاق الزمني للفرق المحدود (FDTD). تم تنفيذ المحاكاة بتباين في سماكة طبقات المعادن **Ag** و **Au** و **Cu** في نطاق 20-100 نانومتر، بالإضافة إلى طول منطقة الاستشعار 100-300 ميكرومتر. تم اختبار معامل انكسار الجيلاتين من لحم الخنزير بتركيز يتراوح بين 0.4-2.0% باستخدام جهاز قياس انكسار الضوء من نوع أبي (Abbe). أظهرت النتائج كلما زاد تركيز الجيلاتين من لحم الخنزير، زاد معامل الانكسار، مما أدى إلى انزلاق في طول الموجة الرنانة في طيف (SPR). تم تقييم أداء الاستشعار من خلال معايير الحساسية (S)، ودقة الكشف (DA)، وعامل الجودة (QF)، ورقم الجدارة (FOM). أظهر الاستشعار الذي يحتوي على طبقة **Au** بسُمك 40 نانومتر وطول منطقة استشعار 100 ميكرومتر أفضل أداء مع حساسية تصل إلى 4266 نانومتر/RIU. أظهر هذا البحث أن تصميم استشعار الرنين البلازمون السطحي (SPR) القائم على الألياف الضوئية قادر على الكشف عن الجيلاتين من لحم الخنزير بدقة وحساسية، وله إمكانية التطبيق في صناعة المواد الغذائية والأدوية لدعم نظام ضمان الحلال.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Gelatin adalah polipeptida yang berasal dari hidrolisis kolagen yang ditemukan pada tulang dan kulit hewan, terdiri dari asam amino yang dihubungkan oleh ikatan kovalen dan peptide (Siburian et al., 2020). Gelatin diklasifikasikan menjadi dua kategori berbeda berdasarkan proses pembuatannya, yaitu tipe A dan tipe B. Gelatin tipe A diperoleh dari metode pengolahan berbasis asam, sedangkan gelatin tipe B diperoleh melalui teknik pengolahan basa. Variasi metodologi produksi yang digunakan bergantung pada bahan sumber yang digunakan untuk ekstraksi gelatin. Tipe A biasanya bersumber dari daging babi, sedangkan tipe B sebagian besar bersumber dari sapi. (Rahmawati et al., 2015).

Gelatin memiliki karakteristik khusus yang membuatnya banyak digunakan di sektor farmasi, makanan, dan kosmetik. (Kusumaningrum & Suzanti Betha, 2018). Di Indonesia khususnya dalam sektor industri farmasi dan makanan, permintaan gelatin cukup besar. Sehingga, Indonesia mengimpor gelatin dari berbagai negara seperti, Amerika Serikat, Prancis, Jerman, Brasil, Korea, China, Thailand, dan Jepang, dengan total impor sebesar 3.833.891 kg atau setara dengan 28.834.370 USD. (Utami & Muslim, 2023). Produk gelatin yang berasal dari Negara-negara tersebut sebagian besar menggunakan bahan baku berupa kulit babi. Bagi penduduk Indonesia, yang sebagian besar Muslim, gelatin yang bersumber dari bahan babi dan produk yang dihasilkan dianggap tidak memenuhi syarat untuk dikonsumsi karena kehalalannya. Selain itu, produk gelatin yang berasal dari sumber sapi dilarang untuk dikonsumsi oleh penganut agama Hindu, karena

larangan tersebut secara intrinsik terkait dengan keyakinan agama mereka. (Hassan et al., 2021). Dengan semakin meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap kehalalan produk yang dikonsumsi, kebutuhan untuk mengembangkan metode deteksi yang akurat dan cepat dalam mengidentifikasi bahan yang tidak sesuai dengan standar kehalalan, seperti gelatin yang berasal dari babi, menjadi semakin penting.

Sebagaimana disebutkan dalam QS. al-Baqarah (2): 173,

إِنَّمَا حَرَّمَ عَلَيْكُمُ الْمَيْتَةَ وَالدَّمَ وَلَحْمَ الْخِنزِيرِ وَمَا أُهْلَ بِهِ لِغَيْرِ اللَّهِ

“*Sesungguhnya Dia hanya mengharamkan atasmu bangkai, darah, daging babi, dan (daging) hewan yang disembelih dengan (menyebut nama) selain Allah.*” (Q.S. al-Baqarah (2): 173).

Ibnu Katsir menegaskan bahwa Q.S. al-Baqarah (2): 173 menunjukkan kejelasan hukum Allah tentang makanan yang diharamkan. Daging babi لَحْمَ الْخِنزِيرِ disebut secara khusus karena ia najis dan tidak layak dikonsumsi, sebagaimana yang juga ditegaskan dalam QS. Al-Ma'idah: 3 dan QS. An-Nahl: 115. Keharaman babi tidak terbatas pada dagingnya saja, melainkan mencakup seluruh bagian tubuhnya, termasuk lemaknya. Selain itu, Buya Hamka dalam tafsir Al-Azhar menyoroti bahwa daging babi diharamkan karena mengandung mudhorot bagi kesehatan, karena babi merupakan hewan yang memiliki kebiasaan hidup yang jorok, sehingga secara medis diketahui mengandung banyak penyakit yang dapat membahayakan manusia. Quraish Sihab dalam Tafsir al-Misbah juga menyatakan bahwa daging babi itu haram, yakni seluruh tubuh babi, termasuk tulang, lemak, dan kulitnya. Jadi segala sesuatu yang berasal dari babi itu haram hukumnya, seperti halnya gelatin babi. Karena gelatin babi terbuat dari tulang babi.

Metode untuk mendeteksi gelatin babi ini telah dilakukan sebelumnya oleh oleh (Pradini, 2017), menggunakan sensor QCM (Quartz Crystal Microbalance)

untuk mendeteksi gelatin babi dalam marshmallow. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa gelatin babi dan sapi dapat dibedakan berdasarkan pergeseran frekuensi yang terdeteksi oleh sensor QCM. Perbedaan frekuensi ini menunjukkan potensi penggunaan sensor QCM untuk deteksi cepat sumber gelatin dalam produk makanan. Namun, metode ini masih memiliki keterbatasan dalam hal sensitivitas dan kecepatan deteksi di lingkungan industri yang membutuhkan efisiensi tinggi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, metode deteksi berbasis *Surface Plasmon Resonance* (SPR) mulai mendapatkan perhatian luas. Teknologi SPR menawarkan kemampuan deteksi biomolekul secara real-time tanpa memerlukan pelabelan tambahan, yang membuatnya sangat menarik untuk diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk dalam mendeteksi sumber gelatin dalam produk makanan. Misalnya, penelitian (Maheswari et al., 2023), menggunakan konfigurasi Kretschmann yang dimodifikasi dengan lapisan bimetal Cu-Pt dan material 2D, menghasilkan sensitivitas tinggi untuk aplikasi deteksi. Sementara itu, penelitian lain oleh (Leal-Junior et al., 2023), menunjukkan peningkatan kinerja SPR berbasis serat optik melalui penggunaan pembelajaran mesin untuk menganalisis indeks bias dan meningkatkan sensitivitas deteksi.

Dalam konteks ini, penelitian Dedi (2023) berhasil mengembangkan sensor SPR berbasis fiber optik untuk deteksi konsentrasi glukosa dalam urine menggunakan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Dengan optimasi berbagai parameter seperti material plasmonik, ketebalan lapisan, panjang probe sensing, dan indeks refraktif, sensor ini menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dalam mendeteksi perubahan kecil pada konsentrasi glukosa. Metode FDTD menawarkan kemampuan simulasi numerik yang akurat dalam mendesain

dan mengoptimasi sensor, menjadikannya pendekatan yang ideal untuk diterapkan dalam berbagai aplikasi deteksi biomolekul.

Penelitian ini mengembangkan sensor SPR berbasis fiber optic dengan metode *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan rancang bangun sensor yang dioptimasi untuk mendeteksi gelatin babi dengan sensitivitas tinggi. Parameter kinerja sensor yang akan dievaluasi mencakup sensitivitas ( $S$ ), akurasi deteksi ( $DA$ ), faktor kualitas ( $QF$ ), dan figure of merit ( $FOM$ ). Melalui optimasi desain dan karakteristik sensor, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan metode deteksi yang lebih akurat dan efisien, serta dapat diterapkan secara praktis di industri makanan dan farmasi untuk memastikan kehalalan produk.

## **1.2. Rumusan Masalah**

1. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan variasi ketebalan lapisan logam untuk deteksi gelatin babi?
2. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan lapisan logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) untuk deteksi gelatin babi?
3. Bagaimana karakteristik sensor SPR berbasis fiber optic dengan variasi panjang probe sensing.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

1. Untuk mengetahui karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan variasi ketebalan lapisan logam dalam deteksi gelatin babi.

2. Untuk mengetahui karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan lapisan logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga) dalam deteksi gelatin babi.
3. Untuk mengetahui karakteristik sensor SPR berbasis fiber optic dengan variasi panjang probe sensing.

#### **1.4. Batasan Masalah**

1. Simulasi FDTD dalam penelitian ini menggunakan perangkat lunak Ansys Lumerical FDTD pada model 2D dengan material pelapis Perak (*Ag*), Emas (*Au*) dan Tembaga (*Cu*) yang memiliki ketebalan 20nm – 100nm dengan interval 20nm.
2. Fiber optik yang dimodelkan adalah single mode dan sumber cahaya yang diinjeksikan memiliki panjang gelombang broadband dengan rentang 400 - 1200 nm.
3. Panjang probe sensing divariasikan pada panjang 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, dan 300 $\mu$ m.
4. Parameter yang digunakan dalam analisis sensor SPR untuk mendeteksi gelatin babi adalah sensitivitas (*S*), akurasi deteksi (*DA*), faktor kualitas (*QF*) dan figure of merit (*FOM*).
5. Refraktif indeks gelatin babi hanya pada konsentrasi 0,4% - 2% dengan interval 0,2%.
6. Observasi sinyal sensor hanya terbatas pada respon optik.

## 1.5. Manfaat Penelitian

### 1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis fiber optik, memperluas pemahaman tentang penggunaan SPR untuk deteksi biomolekul seperti gelatin babi

### 2. Manfaat Praktis

Teknologi yang dikembangkan dapat digunakan secara praktis dalam industri makanan dan farmasi untuk mendeteksi kandungan gelatin babi secara cepat dan akurat, memastikan produk memenuhi standar kehalalan dan kualitas.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Gelatin**

##### **2.1.1. Definisi Gelatin**

Gelatin (*gelatos*) berasal dari bahasa latin yang berarti beku. Gelatin merupakan protein turunan yang dihasilkan dari hidrolisis kolagen pada kulit, tulang, dan tulang rawan. Gelatin dapat diperoleh melalui denaturasi kolagen dengan pemanasan. Pemanasan kolagen secara bertahap akan menyebabkan kerusakan struktur dan rantainya terpisah. Berat molekul, bentuk, dan konformasi larutan kolagen sensitive terhadap perubahan suhu yang dapat merusak makromolekulnya (Siburian et al., 2020).

##### **2.1.2. Karakteristik Gelatin**

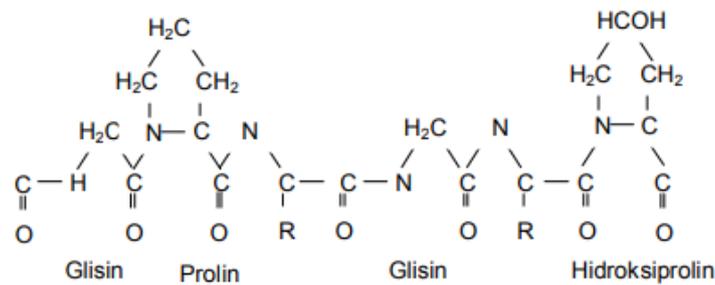
Gelatin biasanya berbentuk seperti lembaran, kepingan atau serbuk kasar sampai halus seperti gula jika dilihat sekilas. Ketika dalam keadaan kering, gelatin, stabil di udara, tetapi mudah terurai oleh mikroba jika lembab atau dalam bentuk larutan. Di pasar Eropa, gelatin yang ditujukan untuk keperluan kuliner tersedia secara komersial dalam bentuk lembaran tipis, sedangkan di Amerika Serikat, biasanya dipasarkan dalam bentuk bubuk atau granular. Warna serbuk atau granul putih atau agak kuning pucat. Pada bentuk lembaran, gelatin berwarna kuning pucat transparan. Karakteristik kelarutan gelatin menunjukkan bahwa gelatin tetap tidak larut dalam air dingin, mengalami ekspansi dan pelunakan ketika direndam dalam air, dan memiliki kapasitas untuk menyerap air secara bertahap, sebesar 5 hingga 10 kali berat awalnya. Gelatin larut dalam air panas, asam asetat 6N, dan dalam kombinasi gliserin dan air yang dipanaskan, sementara

itu tetap tidak larut dalam etanol, kloroform, eter, minyak lemak, dan minyak yang diuapkan. Dalam kondisi keasaman atau alkalinitas yang kuat, gelatin cenderung mengendap. Gelatin menunjukkan kelarutan dalam air hangat, dan setelah pendinginan hingga suhu di bawah 30 derajat Celcius. Dalam aplikasi industri, gelatin sering dikombinasikan dengan berbagai bahan baku untuk mencapai kekuatan gel yang diperlukan. (Aris et al., 2020).

Karakteristik fisikokimia gelatin pada dasarnya ditentukan oleh komposisi asam amino yang membentuk molekul gelatin. Gelatin berasal dari kolagen yang dikategorikan sebagai protein. Kerangka struktural protein kolagen sangat mirip dengan protein pada umumnya, terdiri dari tingkat struktural primer, sekunder, dan tersier. Morfologi protein kolagen berbentuk linier, mirip dengan bentuk berserat. Komposisi asam amino dalam gelatin menunjukkan kemiripan yang signifikan dengan kolagen, dengan dua pertiga asam amino penyusunnya didominasi oleh glisin. Sebaliknya, sepertiga sisa asam amino dibentuk oleh prolin dan hidrokisprolin. Asam amino dalam gelatin saling berhubungan melalui ikatan peptida (Oktaviani dkk., 2017).

### **2.1.3. Struktur dan Komposisi Gelatin**

Gelatin dibentuk oleh rangkaian 18 asam amino yang saling berhubungan, yang meliputi 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, dimana X biasanya mewakili asam amino prolin dan Y umumnya menunjukkan asam amino hidrokisprolin.

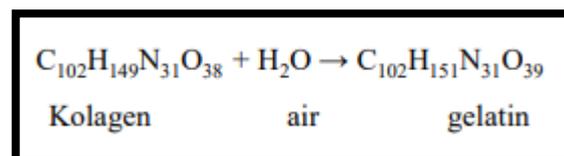


**Gambar 2. 1** Struktur Kimia Gelatin

[Sumber : (Tazwir et al., 2014)]

Struktur kimia gelatin adalah ( $C_{102}H_{151}N_{31}$ ), didalamnya adalah asam amino seperti 14% Hidroxyprolin, 16% Prolin, 26% Glysine, kandungannya tergantung dari bahan mentahnya (Chairin, 2021). Pada Gambar 2.1 dapat dilihat susunan asam amino gelatin berupa Gly-X-Y dimana X adalah asam amino prolin dan Y adalah amino hidroksiprolin (Tazwir et al., 2014). Glisin merupakan asam amino yang dominan terdapat dalam gelatin. Sekitar 25% gelatin kering mengandung prolin dan dhiroksilin yang menstabilkan struktur dari gelatin.

Kolagen mengandung kira-kira 27% glisin dan kira-kira 9% alanin, untuk presentase ini dikategorikan sebagai presentase yang lumayan tinggi. Kandungan yang dominan adalah kandungan prolin dan 4-hidroksipolin yang tinggi, yaitu asam amino yang jarang ditemukan pada protein selain pada kolagen dan elastin (Nada, 2017).



**Gambar 2. 2** Reaksi Pembentukan Gelatin

Sumber : (Suryati et al., 2017)

Gelatin dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan metodologi pembuatan yang digunakan, yaitu tipe A dan tipe B. Gelatin tipe A dibuat melalui proses pengasaman, sedangkan gelatin tipe B diperoleh dari teknik pengolahan basa. Pembuatan gelatin ini bergantung pada bahan sumber yang digunakan untuk ekstraksi gelatin. Tipe A merupakan gelatin yang bersumber dari babi, sedangkan tipe B merupakan gelatin yang diperoleh dari sumber sapi (Rahmawati et al., 2015).

#### **2.1.4. Gelatin Babi**

Indonesia melakukan pengimporan gelatin dari berbagai negara seperti, Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Brasil, Korea, Cina, Thailand dan Jepang dengan jumlah impor mencapai 3.833.891 kg atau setara dengan 28.834.370 USD (Utami & Muslim, 2023). Produk gelatin dari Negara-negara tersebut sebagian besar menggunakan bahan baku berupa kulit babi. Gelatin, yang berasal dari sumber babi, disebut sebagai non-halal atau non-Kosher dan dianggap dilarang oleh umat Islam dan Yahudi. Di Eropa, sekitar 80% gelatin yang dapat dimakan diproduksi dari kulit babi, tetapi gelatin vegetarian Halal dan Kosher, yang dibuat dari rumput laut, tulang ikan, atau sumber non-babi, juga tersedia (Alsaqri et al., 2023a).

Selain itu, Spektroskopi NIR dalam mode reflektansi yang digabungkan dengan PLS-DA dapat digunakan sebagai metode deteksi cepat, murah, dan non-destruktif untuk diskriminasi sampel es krim yang mengandung gelatin non-halal, yaitu gelatin babi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model PLS-DA dengan normalisasi vektor satuan merupakan model yang optimal, berdasarkan kompromi nilai RMSECV terendah=0,147 untuk set kalibrasi, nilai RMSEP terendah=0,098,

untuk 6 faktor dengan klasifikasi 100% di antara sampel es krim yang mengandung gelatin halal dan non-halal untuk set kalibrasi dan prediksi sampel (Alsaqri et al., 2023b).

Gelatin kulit babi mengandung konsentrasi tinggi glisin dan prolin, yang meningkatkan kapasitas pengikatan karena ikatan silang antara dua molekul asam amino (Lee & Chin, 2022). Gelatin babi yang terlarut dalam air dapat dibedakan menggunakan sensor emas QCM yang telah dilapisi dengan NiO. Hal ini ditandai dengan perbedaan yang teramati pada QCM, Dimana perubahan frekuensi bernilai positif (naik) saat pengujian pada larutan gelatin babi (Nugroho, A., dan Kurniawan, 2015). Menurut (Faziatus & Rubiyanto, 2018), sifat optis dari gelatin babi yakni, sensitif terhadap uap air didapatkan hasil dari pengukuran dapat merespon perubahan kelembaban udara dari 65% - 82% RH.

## **2.2. Surface Plasmon Resonance (SPR)**

*Surface Plasmon Resonance (SPR)* adalah sensor yang berdasar pada salah satu fenomena nano-optik yaitu resonansi antara Cahaya datang dan *gelombang surface plasmon*. Resonansi dan eksitasi gelombang *surface plasmon* terjadi pada permukaan logam dielektrik, ini disebabkan adanya elektron bebas pada bagian logam yang bersosilasi sekaligus mengkopling gelombang permukaan yang disebut *surface plasmon*. Sensor SPR bekerja dengan mendeteksi perubahan refraktif indeks sampel uji atau analit; Ketika refraktif indeks analit tersebut rendah, maka perilaku *surface plasmon*nya berubah yang menyebabkan perubahan resonansi antara surface plasmon dan cahaya datang. Pergeseran kondisi resonansi inilah yang menjadi fenomenadasar dari prinsip deteksinya. Karena sensor ini sangat sensitive terhadap perubahan pada skala nano, maka sangat berguna untuk dipalिकासikan di

berbagai bidang, salah satunya adalah untuk deteksi analit. Sensor SPR dapat digunakan untuk mendeteksi konsentrasi analit dalam sampel cairan (Tazi, 2023).

### 2.2.1 Persamaan Maxwell

Sampai saat ini, dalam elektromagnetik yang paling penting adalah persamaan Maxwell, karena prediksinya tentang keberadaan suatu gelombang yang dinamakan gelombang elektromagnetik (EM). Hingga saat ini, perangkat lunak Maxwell's equation solver berbasis mode numerik juga telah banyak dikembangkan untuk keperluan riset dan industri.

Persamaan Maxwell pertama dikenalkan pada tahun 1861 dengan memprediksi teoritis tentang keberadaan gelombang elektromagnetik (EM). Pengamatan eksperimental pertama gelombang elektromagnetik tahun 1886 oleh Hertz, persamaan Maxwell ini merupakan dasar komunikasi nirkabel modern, fotonik dan komunikasi Cahaya. Pada tahun 1861 merupakan pengenalan arus perpindahan  $\partial D/\partial t$  dalam hukum Ampere, untuk memenuhi hukum kekekalan muatan yang menghasilkan listrik dan magnet, dimana  $D$  disebut vektor perpindahan listrik. Persamaan Maxwell secara umum merupakan teori untuk gelombang dan Cahaya elektromagnetik sehingga terkenal dalam ilmu komunikasi dan optik (Wang, 2020).

Dalam teori klasik, hukum-hukum kelistrikan dan kemagnetan secara umum direpresentasikan oleh persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell merupakan sintesis dari teori dan hasil observasi. Sehingga persamaan Maxwell kumpulan dari hubungan sejumlah besaran medan listrik dan medan magnet pergeseran listrik  $\vec{D}$ , induksi medan magnet  $\vec{B}$ , kuat medan listrik  $\vec{E}$ , kuat medan magnet  $\vec{H}$ , kerapatan muatan listrik  $\rho$  dan kerapatan arus listrik  $\vec{j}$ . Maxwell memanfaatkan

dasar empiric dan teori yang dikembangkan oleh Gauss, Ampere, Faraday dan ilmuwan lainnya (Siregar, 2016).

Bagian ini banyak merujuk pada (Siregar, 2016). Kuat medan listrik  $\vec{E}$  di dalam bahan dielektrik akan menimbulkan pergeseran listrik  $\vec{D}$ , dengan hubungan

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.1)$$

Dimana  $\epsilon$  adalah permitivitas bahan dielektrik yang sama ke semua arah di dalam material. Tetapan dielektrik material didefinisikan seperti  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$  dengan  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  farad/meter merupakan permitivitas dalam ruang hampa.

Kuat medan magnet  $\vec{H}$  dalam material dielektrik akan menimbulkan induksi medan magnet  $\vec{B}$ , dengan hubungan

$$\vec{H} = \mu \vec{B} \quad (2.2)$$

Dimana  $\mu$  adalah permeabilitas material. Untuk ruang hampa  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Henry/meter. Pada persamaan (2.1) dan (2.2) disebut sebagai hubungan konstitutif material dielektrik isotropik.

Dalam teori listrik magnet ada tiga hukum dasar yang sangat penting. Pertama, hukum Faraday menggambarkan fenomena induksi elektromagnetik dimana gaya listrik dihasilkan dalam kumparan akibat variasi fluks magnet yang memotong kumparan. Kedua, hukum Ampere menyatakan bahwa integral garis medan magnet sepanjang jalur tertutup yang mengelilingi arus listrik berbanding lurus dengan besar arus tersebut. Terakhir, hukum Gauss berkaitan dengan medan listrik dan magnet; secara khusus, ini menyatakan bahwa fluks listrik yang melalui permukaan tertutup sebanding dengan total muatan listrik yang terkandung di

dalam permukaan tersebut. Sehingga persamaan Maxwell dalam satuan Standart Inetrnasional (SI) adalah sebagai berikut:

$$\oint_C \vec{F} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA \qquad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad (2.3)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \int_A \left( \vec{j} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \hat{n} dA \qquad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \qquad (2.4)$$

$$\varepsilon \int_A \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \int_V \rho dV \qquad \nabla \times \vec{D} = \rho \qquad (2.5)$$

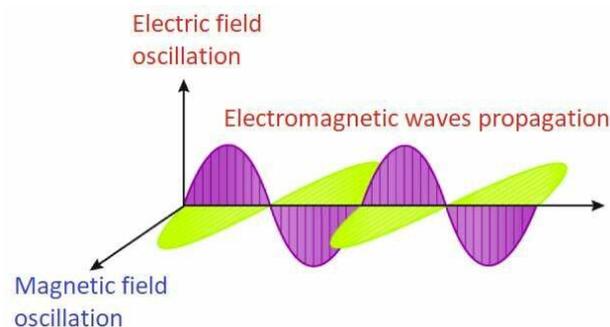
$$\int_A \vec{B} \cdot \hat{n} dA = 0 \qquad \nabla \times \vec{B} = 0 \qquad (2.6)$$

### 2.2.2 Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang memiliki kemampuan untuk merambat tanpa adanya media rambat, sekaligus mengangkut energi listrik dan magnet (elektromagnetik). Berbeda dengan gelombang biasa yang umumnya membutuhkan media rambat, gelombang elektromagnetik tidak memerlukan media rambat (seperti radiasi) (Yuliantono et al., 2023). Energi elektromagnetik merambat dalam bentuk gelombang yang dicirikan oleh beberapa sifat yang dapat diukur, khususnya: panjang gelombang, frekuensi, amplitudo, dan kecepatan. Amplitudo merupakan tinggi gelombang, kemudian panjang gelombang merupakan jarak antara dua puncak. Frekuensi merupakan jumlah gelombang yang melalui suatu titik dalam satu satuan waktu. Frekuensi bergantung pada kecepatan rambat gelombang melalui suatu medium. Mengingat kecepatan energi elektromagnetik tetap konstan (khususnya kecepatan cahaya), terdapat hubungan terbalik antara panjang gelombang dan frekuensi. Bentuk gelombang elektromagnetik hampir sama dengan bentuk gelombang transversal pada umumnya, namun pada gelombang ini terdapat muatan energi listrik dan

magnetic dimana medan listrik ( $E$ ) selalu tegak lurus terhadap medan magnet ( $B$ ) yang keduanya menuju ke arah gelombang (Maula, 2022).

Gelombang elektromagnetik dapat dicirikan sebagai transmisi energi yang diwujudkan dalam bentuk medan listrik ( $E$ ) atau medan magnet ( $M$ ) (Maula, 2022). Sejauh observasi yang dilakukan sampai saat ini, gelombang yang sering ditemui seperti cahaya matahari, gelombang mikro dari oven, cahaya lampu, dan sinar laser dikenal sebagai gelombang elektromagnetik (EM) di mana ia adalah kombinasi antara osilasi medan listrik dan medan magnet. Bagaimanapun, yang membedakan antara satu sama lain adalah frekuensi atau panjang gelombangnya (Riana, 2023). Berikut ilustrasi dari perambatan gelombang elektromagnetik dapat dilihat pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Ilustrasi Gelombang Elektromagnetik (Bhattacharjee, 2022).

Gelombang elektromagnetik dijabarkan dalam kerangka persamaan maxwell baik dalam bentuk diferensial maupun integral. Untuk menemukan solusi dari persamaan Maxwell cukup rumit untuk dilakukan. Oleh karena itu, diperlukan metodologi yang disebut komputasi elektromagnetik, yang berfungsi sebagai mekanisme pemeriksaan analitis gelombang elektromagnetik melalui teknik komputasi. Di antara berbagai metodologi

komputasi numerik, metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) paling banyak digunakan (Shabrina, 2017).

Pada bagian ini banyak merujuk pada (Tazi, 2023). Persamaan gelombang elektromagnetik diturunkan dari persamaan Maxwell. Ketika suatu material isotropic dimana  $\rho = 0, j = 0$ , sedangkan  $\varepsilon$  dan  $\mu$  berupa skalar, maka persamaan (2.3) menjadi:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \right) = - \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{E} \quad (2.7)$$

Dan persamaan (2.4) menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Karena sifat vektor maka persamaan (2.5) menjadi persamaan umum gelombang untuk kuat medan listrik:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + (\nabla \ln \mu) \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla (\vec{E} \cdot \nabla \ln \varepsilon) = 0 \quad (2.9)$$

Sedangkan persamaan gelombang untuk medan magnet adalah sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + (\nabla \ln \varepsilon) \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla (\vec{H} \cdot \nabla \ln \mu) = 0 \quad (2.10)$$

Secara sederhana persamaan (2.9) dan (2.10) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \nabla^2 \vec{H} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

Parameter – parameter penting seperti kecepatan fase dan kecepatan grup dapat diturunkan dengan mudah melalui persamaan gelombang ID, dengan

$\mathbf{E}(z,t) = E_x$  dan  $\frac{\partial}{\partial x} = 0$ . Solusi umumnya yaitu:

$$E_x(z,t) = f(z - v_p t) + g(z + v_p t) \quad (2.12)$$

Persamaan ini menjelaskan fluktuasi medan listrik yang diberikan fungsi umum  $f$  dan  $g$ , yang menjalar dalam arah sumbu  $+z$  dan  $-z$ , masing-masing.

Kecepatan fase diberikan  $v_p = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ . Untuk persamaan Maxwell time-harmonic, di mana  $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega$  dan medan listrik dan medan magnetic yang bervariasi secara sinusoidal, persamaan gelombang 1D memiliki bentuk:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0 \quad (2.13)$$

di mana  $k^2 = \omega^2 \mu\epsilon$ . Solusi umum dari persamaan ini yaitu:

$$\begin{aligned} E_x(z,t) &= \text{Re}\{(C_1 e^{jkz} + C_2 e^{-jkz}) e^{j\omega t}\} \\ &= C_1 \cos(kz - \omega t) + C_2 \cos(kz + \omega t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

di mana  $k = 2\pi/\lambda$  adalah bilangan gelombang dan  $\omega = 2\pi f$  adalah frekuensi sudut.

Persamaan tersebut menjelaskan dua sinusoidal menjalar dalam arah sumbu  $\pm z$ .

Dengan teknologi mutakhir, gelombang EM dapat dengan mudah dieksitasi secara rekayasa (engineering) untuk dimanfaatkan di dalam kehidupan sehari-hari, di antara contoh pemanfaatan eksitasi gelombang EM yang telah ada saat ini adalah radar kapal laut, Rontgen, LED, Laser, Lampu Neon, TV, peralatan elektronik seperti ponsel dan sebagainya (Riana, 2023).

### 2.2.3 Fenomena Eksitasi *Surface Plasmons* (SPs)

Eksitasi SPs terjadi jika ada interaksi antara elektron bebas dalam konduktor dan gelombang EM. Elektron bebas yang berinteraksi dengan komponen medan listrik dari gelombang EM eksternal dapat berosilasi secara kolektif dengan frekuensi osilasi yang hampir sama dengan frekuensi gelombang EM tersebut (Riana, 2023). Secara teori klasik, eksistensi SPs bergantung pada model permitivitas dielektrik material plasmoniknya. Kemudian, model tersebut dapat diaplikasikan pada persamaan Maxwell, yang kemudian memberikan solusi

dispersi relasi SPs. Munculnya fenomena plasmonik membawa kemajuan dan inovasi pada berbagai bidang terapan.

#### 2.2.4 Karakteristik Logam Cu, Ag, dan Au

Faktor yang mempengaruhi kinerja penginderaan sensor SPR adalah film logam. Ketahanan yang kuat terhadap bahan kimia dan oksidasi menjadikan emas (Au) pilihan yang menarik untuk sensor SPR yang ditandai dengan stabilitas tinggi. Namun, kehilangan emas yang tinggi yang melekat mengorbankan sensitivitas dan resolusi penginderaan karena lebar spektrum yang luas. Sebaliknya, perak (Ag) memungkinkan kerugian rendah untuk meningkatkan sensitivitas dan resolusi penginderaan karena bagian permitivitas imajiner yang kecil, tetapi rentan terhadap oksidasi dan juga mudah membentuk perak sulfida (Du & Zhao, 2017).

Tembaga (Cu), Perak (Ag), dan Emas (Au) adalah logam transisi yang memiliki sifat listrik dan optik yang baik sehingga banyak dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi elektronik, maupun optoelektronika. Secara mekanika kuantum, Cu memiliki konfigurasi elektron  $[\text{Ar}] 4s^1 3d^{10}$ , sedangkan Ag dan Au adalah  $[\text{Kr}] 5s^1 4d^{10}$  dan  $[\text{Xe}] 6s^1 4f^{14} 5d^{10}$ , masing-masing. Konfigurasi elektron ketiga logam tersebut masuk ke dalam pengecualian aturan Madelung (di mana secara prediktif ketiga logam tersebut memiliki konfigurasi elektron Cu:  $[\text{Ar}] 4s^2 3d^9$ , Ag:  $[\text{Kr}] 5s^2 4d^9$ , dan Au:  $[\text{Xe}] 6s^2 4f^{14} 5d^9$ ). Menariknya, ketiga logam tersebut memiliki satu elektron di 4s yang mana adalah elektron valensi yang menyebabkannya menjadi konduktif (Mauludi et al., 2024). Secara sifat elektronik, Cu memiliki densitas elektron  $8.47 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ , sedangkan untuk Ag dan Au yaitu  $5.86 \times 10^{22}/\text{cm}^3$  dan  $5.90 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ , dengan konduktivitas yang

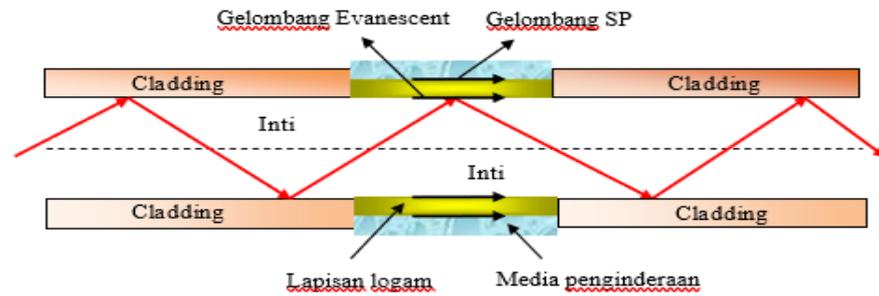
tinggi untuk Cu, Ag, dan Au masing masing yaitu  $\sigma_{Cu} = 64.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ ,  $\sigma_{Ag} = 66.7 \times 10^6 \text{ S/m}$ , dan  $\sigma_{Au} = 49.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ .

Secara eksperimental, refraktif indeks dan permittivitas material Cu, Ag dan Au, di daerah panjang gelombang 400 – 1200 nm, telah diukur oleh beberapa pekerjaan terdahulu (Mauludi et al., 2024). Beruntungnya, model data eksperimental dapat didekati dengan menggunakan *metode finite-difference time-domain* (FDTD), sebagaimana yang dilakukan oleh (Huang et al., 2022a).

Dari hasil kajian pustaka ini, logam Cu, Ag, dan Au adalah kandidat yang baik dalam mengeksitasi SPPs karena memenuhi syarat-syarat material yang dapat mengeksitasi SPs. Ketiga material tersebut dipertimbangkan untuk digunakan sebagai coating logam untuk desain sensor SPR berbasis fiber optik.

### **2.2.5 Sensor *Surface Plasmon Resonance* (SPR) berbasis Fiber Optik**

Dalam fiber optik yang khas, pemanduan cahaya terjadi melalui fenomena pemantulan internal total pada antarmuka inti-selubung. Gelombang evanescent dihasilkan dalam selubung fiber, yang merambat di sepanjang antarmuka inti-selubung. Medan evanescent ini meluruh secara eksponensial di wilayah cladding. Karena sifat-sifat ini, prisma besar dalam konfigurasi Kretschmann dapat digantikan oleh inti serat optik. Dalam sensor SPR berbasis serat optik, sedikit cladding dihilangkan dari bagian tengah serat dan lapisan logam tipis seperti emas, perak ataupun tembaga dilapisi ke inti telanjang. Media yang diperlukan untuk diindera ditempatkan dalam kontak dengan lapisan logam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 Karena distribusi intensitas panjang gelombang dipertahankan dalam fiber optik (Philosophy, 2014).



**Gambar 2. 4** Konfigurasi Kretschmann untuk eksitasi plasmon permukaan pada antarmuka logam-dielektrik yang direalisasikan dalam serat optik multimode (Philosophy, 2014).

Kunci dalam mengeksitasi SPP dengan konfigurasi Kretschman adalah vektor gelombang dari insiden cahaya harus sama dengan vektor gelombang dari SPP. Kondisi utama ini secara matematis dapat ditulis sebagai (Ashrafi & Mohanty, 2022)  $k_{inc} = k_{sp}$ .

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_d \sin \theta_{SPR} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m^2 \epsilon_a^2}{\epsilon_m^2 + \epsilon_a^2}} \quad (2.15)$$

Dimana  $n_d$  adalah indeks bias dielektrik di sekitar antarmuka,  $\theta_{SPR}$  adalah sudut resonansi SPR,  $\epsilon_m$  dan  $\epsilon_a$  menunjukkan masing-masing nilai bagian nyata logam dan konstanta dielektrik medium.

SPR berbasis fiber optik dibentuk dengan mengombinasikan sensor fiber optik dengan prinsip SPR. Pada dasarnya, fenomena SPR pada fiber optik tidak jauh berbeda dengan fenomena SPR yang terjadi pada media prisma. Yang membedakan antara keduanya adalah sumber cahaya. Sumber cahaya yang dipropagasikan pada sensor SPR serat optik merupakan sumber polikromatik yang terpandu dalam serat optik, sedangkan pada SPR prisma menggunakan sumber monokromatik. Serat SPR dapat setara dengan superposisi refleksi SPR beberapa

prisma. Oleh karena itu, sensor serat optik berbasis SPR dapat digunakan untuk mendeteksi konsentrasi glukosa.

Sejak diperkenalkannya teknik SPR dalam penelitian teknologi serat optik, sensor SPR serat optik telah mengalami kemajuan yang signifikan. Jorgenson dan Yee pada tahun 1993 melaporkan salah satu sensor serat optik pertama yang menggunakan prinsip SPR. Dalam penelitiannya, mereka memvariasikan karakteristik utama platform penginderaan, seperti ketebalan dan indeks bias lapisan logam dan juga dimensi daerah reaktif sensor yang memberikan perubahan pada spektrum transmisi. Sampai saat ini, banyak perangkat berbasis SPR telah dilaporkan dan fenomena tersebut menjadi salah satu referensi penting dalam penginderaan biokimia. Analisis secara literatur sensor berbasis SPR dalam serat optik silika tanpa lapisan penyangga antara inti serat dan film emas, akan mempermudah untuk mengingat secara singkat beberapa aspek mendasar dari perambatan sinar cahaya dalam serat optik di mana plasmon permukaan tereksitasi (Zainuddin dkk., 2019).

Dipertimbangkan perambatan semua sinar terpandu di dalam serat menggunakan sumber polikromatik. Cahaya dari sumber terkolimasi ke salah satu ujung serat pada titik aksial. Distribusi daya sinar yang dipandu dalam serat dengan ' $\theta$ ' sebagai sudut sinar dengan garis normal terhadap antarmuka inti-kelongsong diberikan oleh (Gupta, 2016).

$$dP \propto \frac{n_1 \sin \theta \cos \theta}{(1 - n_1^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (2.16)$$

Jika semua sinar terpandu diluncurkan pada ujung masukan serat, maka daya yang ditransmisikan pada ujung keluaran serat diberikan oleh

$$P_{trans} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_P^{N_{ref}}(\theta) \frac{n_1 \sin \theta \cos \theta}{(1-n_1^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} \frac{n_1 \sin \theta \cos \theta}{(1-n_1^2 \cos^2 \theta)^2} d\theta} \quad (2.17)$$

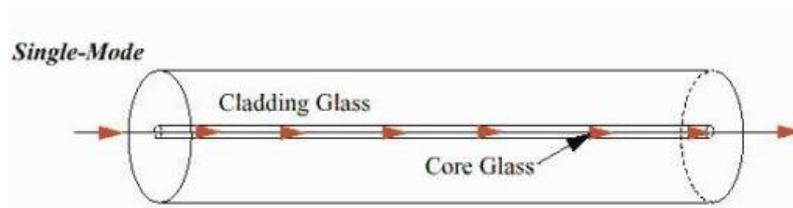
$\theta_{cr}$  adalah sudut kritis terhadap normal antarmuka inti-kelongsong sedangkan  $\theta_{cr}$  hingga  $90^\circ$  adalah rentang sudut datang sinar dengan antarmuka normal ke antarmuka inti-kelongsong untuk sinar terpandu (TIR). TIR adalah kondisi penting untuk menghasilkan gelombang evanescent dan karenanya merangsang plasmon permukaan. Selanjutnya, ' $N_{ref}$ ' adalah jumlah total pantulan yang dilakukan oleh suatu sinar di wilayah penginderaan serat. Untuk sinar dengan sudut ' $\theta$ ', dapat ditulis:

$$N_{ref}(\theta) = \frac{L}{D \tan \theta} \quad (2.18)$$

$$\theta_{cr} = \sin^{-1} n_{cl}/n_1 \quad (2.19)$$

L dan D masing-masing adalah panjang daerah penginderaan dan diameter inti serat.  $\theta_{cr}$  adalah sudut kritis serat optik sedangkan  $n_{cl}$  dan  $n_1$  adalah RI kelongsong dan inti serat.  $R_p$  menyajikan rasio refleksi cahaya terpolarisasi-p. Hanya cahaya terpolarisasi-p yang dapat mengeksitasi plasma permukaan, sedangkan cahaya terpolarisasi-s tidak berkontribusi terhadap SPR (Gupta, 2016).

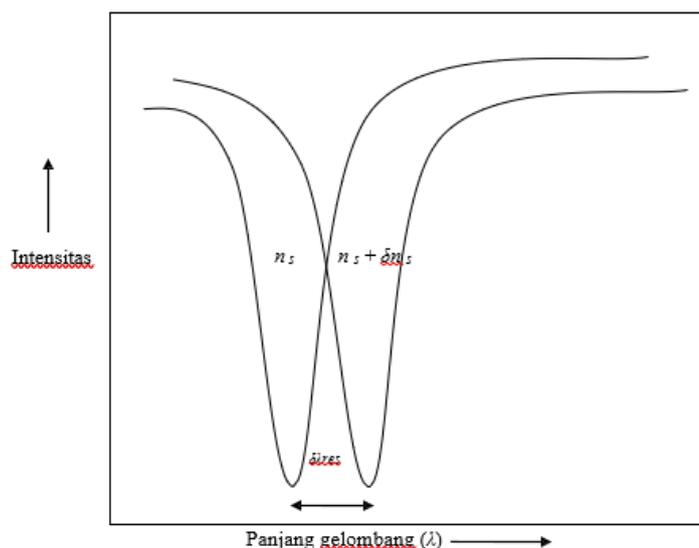
Fiber optik dengan model *single mode* cara kerjanya sama dengan model *multimode* hanya berbeda pada perambatan cahaya. Pada model *single mode* ini cahaya hanya merambat dalam satu mode saja yaitu sejajar dengan sumbu fiber optik seperti ilustrasi yang tertera pada gambar 2.5 (Hanif & Arnaldy, 2017).



**Gambar 2. 5** Ilustrasi Fiber Optik Model Single Mode

Sumber : (Hanif & Arnaldy, 2017).

Pada sensor SPR berbasis fiber optik, sudut resonansi ( $\theta_{res}$ ) ditentukan sesuai dengan indeks bias medium penginderaan ( $n_s$ ). Perubahan kecil dalam indeks bias medium penginderaan  $\delta n_s$  menggeser sudut resonansi sebesar  $\delta\theta(res)$ . (Philosophy, 2014).

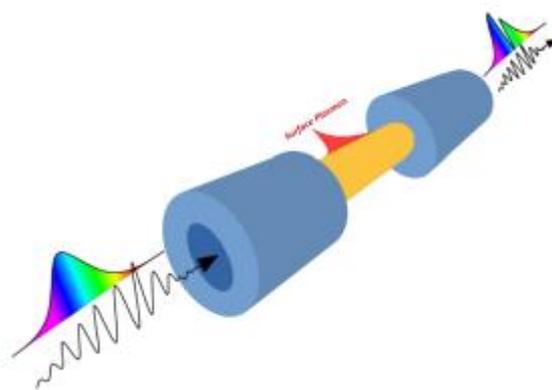


**Gambar 2. 6** Pergeseran panjang gelombang resonansi dengan perubahan indeks bias medium penginderaan (Philosophy, 2014).

Dengan demikian, sensitivitas sensor SPR bergantung pada pergeseran sudut resonansi (interogasi sudut) atau panjang gelombang resonansi (interogasi panjang gelombang) dengan perubahan indeks bias media penginderaan. Semakin besar pergeseran, semakin baik sensitivitas sensor SPR. Untuk menentukan sensitivitas sensor berbasis SPR, dua kurva SPR diplot untuk dua nilai indeks bias

medium penginderaan yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Pada peningkatan indeks bias media penginderaan dengan jumlah  $\delta n_s$ , panjang gelombang resonansi juga bergeser sebesar  $\delta \lambda_{res}$ . (Philosophy, 2014).

Perubahan refraktif indeks pada bagian dielektrik akan menyebabkan perubahan pada kondisi resonansi yang menyebabkan pergeseran sudut resonansi (Torino et al., 2017). Dengan demikian, fenomena resonansi ini (SPR) dapat dikembangkan menjadi sensor, misal untuk mendeteksi gelatin babi, karena perubahan konsentrasi gelatin babi dapat mengubah refraktif indeks larutan.



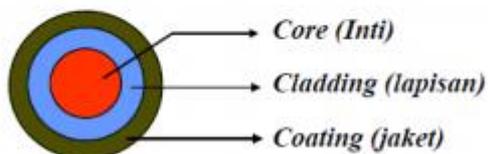
**Gambar 2. 7** Desain Umum Sensor SPR Berbasis Fiber Optik (Tazi, 2023).

Pada dasarnya, mekanisme sensor SPR berbasis fiber optik serupa dengan yang berbasis prisma, hanya saja sumber cahaya yang berinteraksi dengan antarmuka dielektrik-logam berasal dari cahaya yang terpandu di dalam fiber optic. Modulasi yang digunakan dalam fiber optic adalah panjang gelombang. Mekanismenya yaitu cahaya polikromatik diinjeksikan ke dalam Core kemudian terpandu dalam fiber optik. Ketika cahaya mencapai area sensing (area yang terkelupas dan terlapisi film logam), maka eksitasi *surface plasmon* terjadi di daerah itu; Ketika konstanta propagansi cahaya datang cocok dengan konstanta propagasi *surface plasmon*, di panjang gelombang tertentu. Sehingga dalam

spektrum transmisi akan terlihat pita gelap d panjang gelombang tertentu yang disebut panjang gelombang resonansi (Tazi, 2023). Ini serupa dengan konfigurasi Kretschmann (lihat Gambar 2.4), di mana gelombang evanescent dari efek TIR pada fiber optik dapat mengeksitasi SPs karena keberadaan film material plasmonik yang melapisi core fiber optik.



*Struktur Dasar Serat Optik*



*Struktur Dasar Serat Optik*

**Gambar 2. 8** Komponen utama fiber optic

Sumber : (Topani et al., 2017).

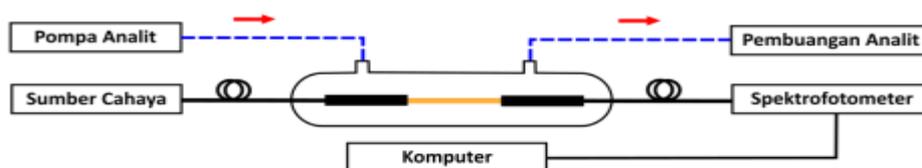
Terdapat tiga komponen utama dalam fiber optik di antaranya: Core, Cladding, dan Jacket. Fungsi dari setiap komponen tersebut yaitu: Core dan Cladding berfungsi untuk memandu cahaya yang diinjeksikan. Ketika cahaya dari core menabrak cladding dengan sudut yang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya dipantulkan dan kemudian pantulan berulang terus menerus hingga cahaya dapat dipandu dari suatu titik ke titik yang lain sesuai jalur fiber optic. Sedangkan fungsi dari Jacket adalah melindungi dari intervensi lingkungan (Verma et al., 2015). Refraktif indeks core dan cladding dibuat berbeda yang karenanya dapat membangun fenomena TIR, sehingga cahaya dapat terpandu dari suatu titik awal ke titik akhir yang diinginkan sesuai waveguide yang sedang dikonsiderasikan.

Fenomena TIR dalam fiber optik menjadikan cahaya dapat terjaga dan berpropagasi di dalam struktur fiber optik (tidak terjadi refraksi).

Alasan mengapa Sensor SPR berbasis fiber optik dapat mendeteksi perubahan analit adalah karena fenomena TIR menghasilkan vektor gelombang evanescent yang memiliki nilai sama dengan konstanta propagasi SPs. Sehingga, SPs dapat tereksitasi dan karakteristik SPs bergantung pada refraktif indeks analit.

Secara singkat, cahaya dengan panjang gelombang broadband diinjeksikan ke dalam fiber optik, kemudian cahaya menuju ke daerah sensing di mana antarmuka logam-analit berada, sedemikian sehingga gelombang SPs tereksitasi karena resonansi di mana ini ditunjukkan dengan adanya reflektansi minimum di panjang gelombang tertentu dalam spektrum transmisi pada spektrofotometer. Perubahan refraktif indeks analit akan merubah konstanta propagasi SPs yang tereksitasi tersebut yang kemudian menyebabkan berubahnya kondisi resonansi. Sehingga, perubahan analit dapat dideteksi dengan melihat pergeseran kurva spektrum transmisi.

Tipikal set-up eksperimen diwakili oleh Gambar 2.9. Komponen penting sensor ini terdiri dari sumber cahaya, fiber optik dengan probe sensingnya, chamber analit, pompa analit, tempat pembuangan analit, spektrofotometer, dan komputer di mana setiap komponen memiliki fungsinya masing-masing.



**Gambar 2. 9** Tipikal skema mekanisme set up eksperimen sensor SPR berbasis fiber optic (Huang et al., 2022b).

Sumber cahaya diinjeksikan ke dalam fiber optik. Kemudian, pompa microinjection berfungsi untuk mendorong atau menginjeksikan analit ke chamber analit di mana terdapat probe sensing, tentu saja fungsi probe sensing adalah untuk mengindera analit yang sedang diuji. Kemudian spektrum cahaya yang melewati probe sensing akan mengalami perubahan (yang di dalam chamber sebelumnya adalah background menjadi analit) saat dibaca oleh spectrometer akan ada pergeseran kondisi resonansi. Kemudian data dapat dianalisis menggunakan personal computer (PC).

### 2.2.6 Parameter Kinerja Sensor

Performa sensor SPR berbasis optik bergantung pada beberapa parameter di antaranya yaitu sensitivitas (*sensitivity*), selektivitas (*selectivity*), deteksi limit (*limit of detection*), akurasi deteksi (*detection accuracy*), resolusi (*resolution*), repeabilitas (*repeability*), reproduksibilitas (*reproducibility*), derau (*noise*), daerah kerja (*range*), waktu respons (*response time*), linearitas (*linearity*), *drift*, *quality factor*, dan *figure of merit*. Namun, dalam simulasi, tidak semua karakteristik dapat diukur, sehingga bagian ini hanya membahas beberapa karakteristik yang dapat diukur di penelitian ini, seperti sensitivitas (*sensitivity*), akurasi deteksi (*detection accuracy*), faktor kualitas (*quality factor*), dan *figure of merit* (Cruz et al., 2023).

Sensitivitas didefinisikan sebagai perubahan yang terukur pada sinyal keluaran yang bergantung pada perubahan satuan dalam besaran analit yang diukur. Pada sensor SPR berbasis fiber optik dengan interogasi panjang gelombang sensitivitas ( $S$ ) dikalkulasi dengan formula pada Persamaan 2.15 Akurasi deteksi ( $DA$ ) memiliki makna seberapa akurat sensor dapat mendeteksi

analit (atau konsentrasi analit). Formula  $DA$  diwakilkan oleh Persamaan 2.16, di mana mendefinisikan rasio antara perubahan panjang gelombang resonansi dan full width half maximum ( $FWHM$ ), dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar perubahan panjang gelombang resonansi dan semakin sempit  $FWHM$  maka dapat dikatakan akurasinya semakin baik. Yang ketiga adalah, faktor kualitas ( $QF$ ) yang mendefinisikan bahwa jika sensitivitas sensor tinggi dan  $FWHM$  sensor sempit maka kualitas keluaran sensor tersebut tinggi, formula  $QF$  diwakilkan oleh Persamaan 2.17. Sedangkan untuk *figure of merit* ( $FOM$ ), parameter yang ada pada formula FOM adalah  $S$ ,  $FWHM$ , dan transmitansi minimum (Persamaan 2.18). Dapat dilihat bahwa semakin tinggi  $S$ , semakin sempit  $FWHM$ , dan semakin dalam transmitansi minimum  $T_{min}$  (pada  $\lambda_{SPR}$ ), maka FOM sensor dapat dinilai tinggi (Mauludi et al., 2024).

$$S = \frac{\Delta\lambda_{SPR}}{\Delta n} \quad (2.20)$$

$$DA = \frac{\Delta\lambda_{SPR}}{FWHM} \quad (2.21)$$

$$QF = \frac{S}{FWHM} \quad (2.22)$$

$$FOM = QF \times (1 - T_{SPR}) \quad (2.23)$$

### 2.3. *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD)

Metode FDTD awalnya diusulkan oleh Yee pada tahun 1965, mewakili pendekatan komputasi yang melibatkan diskritisasi dimensi temporal dan spasial, menghasilkan algoritma rekursif yang bergantung pada waktu dan menghasilkan solusi untuk medan magnet. dan medan listrik diturunkan dari persamaan Maxwell (Shabrina et al., 2018). *Finite-difference time-domain* (FDTD) adalah metode numerik untuk menyelesaikan persamaan Maxwell di geometri dan material yang

kompleks yang menjadikan persamaan Maxwell sulit untuk dipecahkan menggunakan metode analitik. Metode ini dipelopori oleh Kane S. Yee seorang matematikawan yang lahir pada tahun 1934 (Ashidiq, 2022).

Metode FDTD adalah teknik yang sangat luas diterapkan dan kuat untuk elektromagnetik komputasional. Lumerical menyatakan bahwa jumlah studi yang menggunakan perangkat lunak komersial FDTD tumbuh lebih cepat dari 50% per tahun. Karena kemampuannya untuk menangani struktur dan bahan yang kompleks, metode FDTD telah menjadi alat yang sangat penting dalam *nanophotonics* dan *nanoplasmonics* selama dekade terakhir (Lesina et al., 2015).

FDTD adalah metode yang rigorous dan sangat powerful untuk memodelkan komponen optik yang memiliki struktur skala nano. Metode ini sangat mudah untuk dimengerti karena menggunakan prosedur sederhana dan secara langsung mengikuti bentuk diferensial persamaan Maxwell. Kelebihan lain adalah metode ini, dalam FDTD tradisional, menyelesaikan persamaan Maxwell seseorang tidak perlu menggunakan aljabar linear dan sebagainya. Bagaimanapun, metode ini membutuhkan waktu yang cukup lama dalam waktu komputasinya dan membutuhkan memori yang besar (Riana, 2023).

Program perangkat lunak FDTD dibuat untuk menganalisis jenis dan kandungan logam berat. Logam berat diidentifikasi menggunakan sensor berbasis serat optik *surface plasmon resonance* (SPR) dengan deposisi beberapa logam (material plasmonik) yaitu Ag, Au dan Cu. Metode FDTD mudah dipahami dan diperpanjang (Mauludi et al., 2024).

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Jenis Penelitian**

Jenis penelitian ini merupakan sebuah penelitian kuantitatif dengan simulasi yang bertujuan untuk mencari performa optimal desain sensor fiber optik berbasis SPR (dengan studi kasus pengukuran gelatin babi) berdasarkan perbandingan nilai  $S$ ,  $DA$ ,  $QF$  dan  $FOM$ . Parameter yang dioptimalkan adalah material dan ketebalan lapisan. Penelitian ini adalah studi simulasi menggunakan perangkat lunak Maxwell's equation solver berbasis metode *finite-difference time-domain* (FDTD), Ansys Lumerical FDTD.

#### **3.2 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Instrumentasi Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Waktu penelitian dimulai dari 1 Desember 2024 – 31 Maret 2025.

#### **3.3 Alat dan Bahan**

Pada penelitian ini menggunakan beberapa alat dan bahan dalam proses pengambilan nilai indeks bias dan simulasi perangkat lunak (*Software*). Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan diantaranya adalah:

##### **3.3.1. Mencari Indeks Bias Gelatin Babi**

Alat dan bahan yang digunakan untuk mencari indeks bias adalah sebagai berikut:

1. Gelatin Babi
2. Aquades
3. Refraktometer Abbe

4. Neraca / Timbangan
5. Hot Plate
6. Pipet
7. Pengaduk
8. Botol
9. Sarung Tangan

### **3.3.2. Simulasi Perangkat Lunak (*Software*)**

Alat dan bahan yang digunakan untuk simulasi adalah sebagai berikut:

1. Laptop
2. Ansys Lumerical FDTD
3. Origin

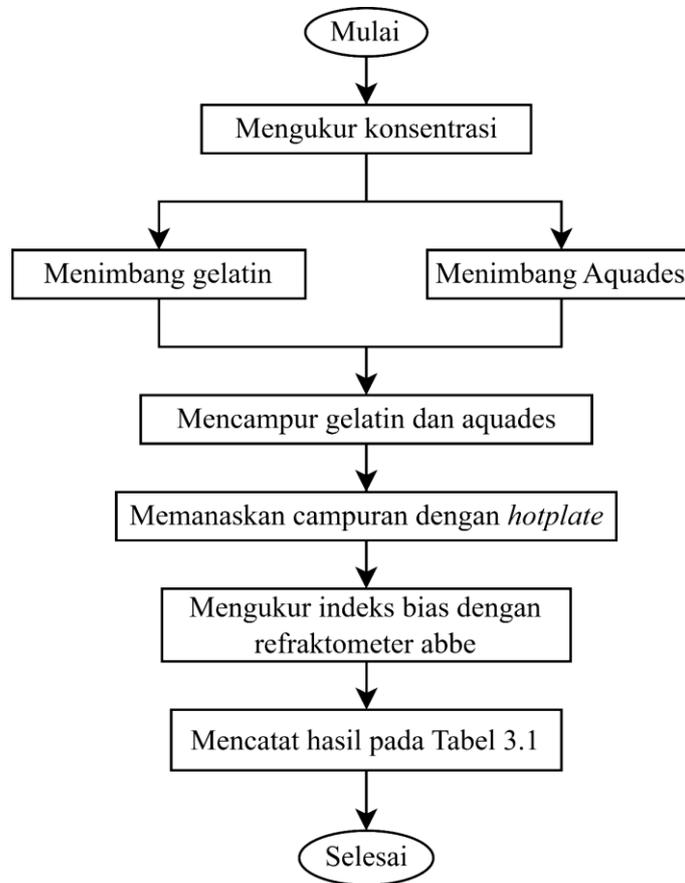
### **3.4. Diagram Alir Penelitian**

Penelitian simulasi deteksi gelatin babi dengan sensor SPR berbasis fiber optik menggunakan metode FDTD ini memiliki diagram alir penelitian atau tahap penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mempermudah dalam proses penelitian.

Adapun diagram alir penelitian sebagai berikut:

### 3.4.1. Mencari Indeks Bias Gelatin Babi

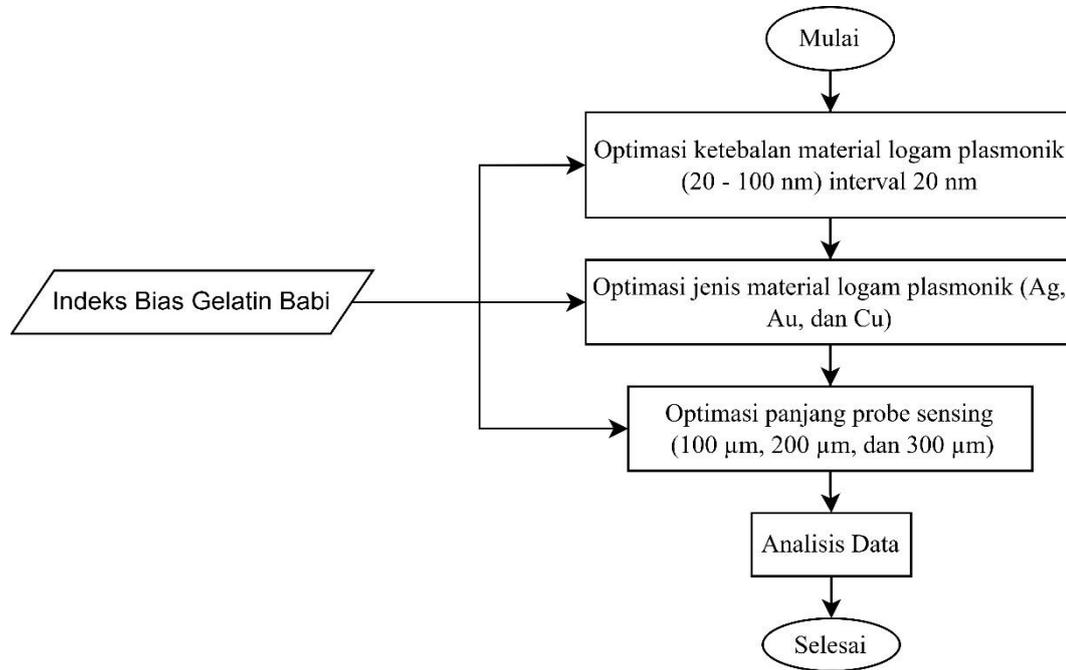
Berikut diagram alir untuk mencari indeks bias gelatin babi:



**Gambar 3. 1** Diagram Alir Mencari Indeks Bias Gelatin Babi

### 3.4.2. Diagram Alir pada Simulasi

Berikut diagram alir pada simulasi penelitian ini:



**Gambar 3. 2** Diagram Alir Simulasi

### 3.5. Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan komputasi dengan pendekatan *Finite Difference Time Domain* (FDTD) untuk memodelkan fenomena SPR pada logam yang berinteraksi dengan gelatin. Terdapat beberapa proses yang dilakukan pada penelitian ini, diantaranya:

### 3.5.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan dengan pengambilan indeks bias gelatin babi menggunakan alat Refraktometer Abbe, pencarian material dan ketebalan yang lebih sensitif untuk SPR berbasis FDTD ini dengan melihat nilai panjang gelombang yang dihasilkan berdasarkan perhitungan performa sensor.

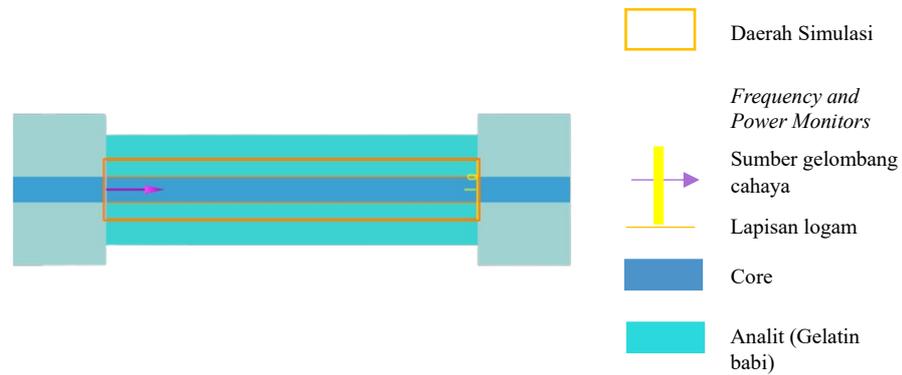
### 3.5.2. Pengukuran Indeks Bias Gelatin Babi

1. Memakai peralatan seperti sarung tangan, untuk meminimalisir terkena Najis dari percikan gelatin babi.
2. Menimbang gelatin babi dan aquades untuk konsentrasi 0,4% - 2% dengan interval 0,2% menggunakan neraca digital.
3. Mencampur gelatin babi dengan aquades pada *glass beaker*.
4. Memanaskan larutan yang sudah dicampur menggunakan *hot plate*.
5. Menyiapkan alat Refraktometer Abbe.
6. Menggunakan pipet untuk mengambil larutan gelatin babi, kemudian diletakkan pada prisma refraktometer.
7. Menutup prisma kemudian melihat nilai indeks bias yang tertera pada skala melalui lensa refraktometer.
8. Mencatat nilai indeks bias serta melakukan 3 kali pengulangan pada setiap konsentrasi gelatin babi yang berbeda-beda.

### 3.5.3. Simulasi

Simulasi menggunakan *Finite Difference Time Domain* (FDTD) pada aplikasi Ansys Lumerical. Langkah simulasi pada FDTD adalah:

1. Merancang desain SPR sebagai berikut:



**Gambar 3. 3** Ilustrasi pemodelan struktur desain probe sensing dengan konfigurasi forward scattering.

2. Mengatur parameter simulasi (seperti daerah simulasi, mesh, boundary condition, dsb) menggunakan objek *Simulation*.
3. Mengatur parameter sumber gelombang cahaya yang diinjeksikan (seperti panjang gelombang, geometri, mode, dsb) menggunakan objek *Source*.
4. Mencari ketebalan lapisan logam yang paling optimal sesuai alur optimasi yaitu 20nm, 40nm, 60m, 80nm, dan 100nm.
5. Mencari jenis logam yang paling optimal dengan data eksperimen permitivitas material plasmonic Ag (Perak) merujuk Palik (1985), Au (Emas) merujuk Johson and Christy (1972), dan Cu (Tembaga) merujuk Hageman skk., (1975) yang tersedia di Ansys Lumerical FDTD pada objek material.
6. Mencari panjang daerah simulasi sebagai panjang probe sensing ditetapkan sesuai alur optimasi yaitu 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , dan 300  $\mu\text{m}$ .

7. Memasukkan nilai indeks bias gelatin babi dengan konsentrasi 0%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,0%, 1,2%, 1,4%, 1,6%, 1,8%, dan 2,0% pada objek *Analit-up*.
8. Menjalankan program simulasi untuk menentukan panjang gelombang menggunakan object *Run*.
9. Memvisualisasikan hasil dalam bentuk txt dan grafik pada menu *Transmission*.

### **3.6. Pengambilan Data**

Penelitian ini dilakukan dengan pengukuran indeks bias serta pengukuran nilai peforma kinerja sensor.

1. Pengukuran indeks bias gelatin babi

Langkah pertama dalam pengambilan data adalah mengukur indeks bias dari gelatin babi dengan konsentrasi 0%, 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1%, 1,2%, 1,4%, 1,6%, 1,8%, dan 2% menggunakan alat Refraktometer Abbe dengan pengulangan sebanyak 3 kali. Setiap data yang diperoleh dari pengukuran ini akan dicatat pada tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Data Pengukuran Indeks Bias

Konsentrasi	Indeks Bias Gelatin Babi			
	1	2	3	Rata-rata
0,0%				
0,40%				
0,60%				
0,80%				
1,%				
1,20%				
1,40%				
1,60%				
1,80%				
2%				

2. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi ketebalan material pelapis logam

Setelah indeks bias diperoleh, langkah berikutnya adalah pengambilan data puncak resonansi pada variasi jenis logam pelapis; Emas (*Au*), Perak (*Ag*), dan tembaga (*Cu*) dengan masing-masing ketebalan logam 20nm – 100nm untuk mengetahui ketebalan material yang optimal menggunakan indeks bias gelatin babi. Dalam pengambilan data ini dilakukan dengan analit gelatin babi sebesar 0,4% yaitu 1.3335.

3. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi material pelapis logam palsmonik.

Berdasarkan ketebalan yang telah didapatkan, dicari material yang paling optimal antara Ag, Au, dan Cu menggunakan analit gelatin babi 0% - 2% untuk mendapatkan trend yang baik agar bisa dilakukan analisis.

4. Pengukuran karakteristik sensor SPR dengan variasi panjang daerah simulasi (probe sensing)

Apabila sudah didapatkan ketebalan logam dan material yang optimal, langkah selanjutnya adalah menentukan panjang probe sensing yang optimal dengan variasi 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , dan 300  $\mu\text{m}$ .

### 3.7. Analisis Data

Setelah didapatkan panjang gelombang dilakukan analisis data untuk mengevaluasi kinerja sensor SPR berbasis fiber optik dalam mendeteksi gelatin babi menggunakan metode FDTD. Parameter utama yang dianalisis meliputi sensitivitas (S), deteksi akurasi (DA), faktor kualitas (QF), dan figure of merit (FOM).

1. Analisis parameter kinerja sensor SPR dengan variasi ketebalan material pelapis

Menentukan ketebalan optimal, dilakukan variasi ketebalan mulai dari 20 nm hingga 100 nm dengan interval 20nm. Setiap ketebalan diuji terhadap dua konsentrasi gelatin (0,40% dan 2,00%) untuk melihat pengaruhnya terhadap parameter kinerja sensor.

2. Analisis parameter kinerja sensor SPR dengan variasi ketebalan

Untuk memperoleh material pelapis yang paling optimal dalam mendeteksi gelatin babi, dilakukan analisis terhadap berbagai variasi material pelapis sensor SPR berbasis fiber optik dengan parameter kinerja sensor. Material dengan sensitivitas tinggi menunjukkan kinerja optimal dalam meningkatkan kemampuan deteksi sensor.

3. Analisis parameter kinerja sensor SPR dengan variasi panjang probe sensing

Probe sensing merupakan bagian dari sensor yang berinteraksi langsung dengan sampel gelatin. Oleh karena itu, panjang probe sensing yang optimal

sangat penting untuk meningkatkan sensitivitas deteksi. Dalam penelitian ini, panjang probe sensing divariasikan antara 100 mikrometer hingga 300 mikrometer untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap performa sensor.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian terdiri dari dua tahapan, yaitu pengujian indeks bias dan simulasi sensor SPR berbasis fiber optic menggunakan metode FDTD. Setiap tahap merupakan suatu proses dalam memahami karakteristik sensor SPR (*Surface Plasmon Resonance*) untuk mendeteksi gelatin babi.

#### 4.1. Pengujian Indeks Bias

*Surface Plasmon Resonance* (SPR) sangat sensitive terhadap perubahan indeks bias medium di sekitar lapisan logam. Indeks bias ini secara langsung memengaruhi interaksi antara medan elektromagnetik dengan permukaan logam dalam fenomena SPR, yang pada akhirnya menentukan posisi panjang gelombang resonansi. Pada penelitian ini, gelatin dengan berbagai konsentrasi digunakan sebagai medium yang melapisi permukaan sensor SPR berbasis fiber optic. Variasi indeks bias dari gelatin akan memengaruhi cara cahaya merambat dalam fiber optic, sehingga menggeser panjang gelombang resonansi SPR. Untuk mengetahui nilai indeks bias pada setiap konsentrasi gelatin, dilakukan pengukuran menggunakan Refraktometer Abbe. Tahapan penelitian ini terdiri dari dua langkah, yaitu pembuatan sampel gelatin dengan konsentrasi tertentu dan pengukuran indeks bias menggunakan Refraktometer Abbe.

##### 4.1.1. Pengukuran Komposisi Larutan Gelatin Babi

Dalam penelitian ini, larutan gelatin babi dibuat dengan melarutkan gelatin babi ke dalam aquades dengan variasi konsentrasi 0,4% hingga 2% dengan interval 0,2%. Setiap larutan dibuat dengan total massa 10gram, sehingga massa gelatin dan aquades dihitung menggunakan rumus berikut:

$$m_{gelatin} = \left( \frac{C}{100} \right) \times m_{total}$$

$$m_{aquades} = m_{total} - m_{gelatin}$$

di mana :

$m_{gelatin}$  = massa gelatin babi (gram)

$C$  = konsentrasi gelatin babi dalam persen (%)

$m_{total}$  = total massa larutan, yaitu 10 gram

$m_{aquades}$  = massa aquades (gram)

Contoh perhitungan untuk konsentrasi 0,4% adalah sebagai berikut:

$$m_{gelatin} = \left( \frac{0,4}{100} \right) \times 10 = 0,04 \text{ gram}$$

$$m_{aquades} = 10 - 0,04 = 9,96 \text{ gram}$$

Larutan ini kemudian dicampurkan dengan cara dipanaskan pada hot plate, sehingga gelatin dapat larut dengan sempurna. Adapun komposisi larutan gelatin babi dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 4. 1** Komposisi larutan gelatin babi

No	Konsentrasi (%)	Massa Gelatin (g)	Massa Aquades (g)
1	0,40%	0,04	9,96
2	0,60%	0,06	9,94
3	0,80%	0,08	9,92
4	1,00%	0,10	9,90
5	1,20%	0,12	9,88
6	1,40%	0,14	9,86
7	1,60%	0,16	9,84
8	1,80%	0,18	9,82
9	2,00%	0,20	9,80

#### 4.1.2. Pengukuran Indeks Bias Gelatin Babi

Pengukuran indeks bias dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai indeks bias pada berbagai konsentrasi gelatin babi. Indeks bias merupakan parameter

penting dalam sensor SPR berbasis fiber optik karena mempengaruhi posisi puncak resonansi. Semakin tinggi konsentrasi gelatin babi, indeks bias larutan akan semakin meningkat, yang dapat memengaruhi respons sensor. Indeks bias gelatin babi diukur menggunakan Refraktometer Abbe, yang bekerja berdasarkan prinsip pembiasan cahaya saat melewati dua medium dengan indeks bias yang berbeda. Alat ini menggunakan prisma optik sebagai komponen utama yang berfungsi untuk membelokkan dan memfokuskan cahaya. Cahaya dari sumber eksternal, seperti lampu atau sinar matahari, diarahkan ke prisma. Saat cahaya mencapai batas antara prisma dan larutan sampel (gelatin babi), sebagian cahaya dibiaskan ke dalam larutan, sementara sebagian lainnya dipantulkan. Jika sudut datang cahaya lebih besar dari sudut kritis, terjadi refleksi total, yang menghasilkan garis batas terang-gelap di bidang pandang okular refraktometer. Garis batas ini kemudian disejajarkan dengan skala pengukuran menggunakan knob penyesuaian. Setelah posisi garis batas terang-gelap disesuaikan, nilai indeks bias dapat dibaca langsung pada skala analog alat. Karena alat ini dihitung secara manual, sehingga hasilnya bergantung pada presisi kalibrasi dan keakuratan dalam membaca oleh peneliti.

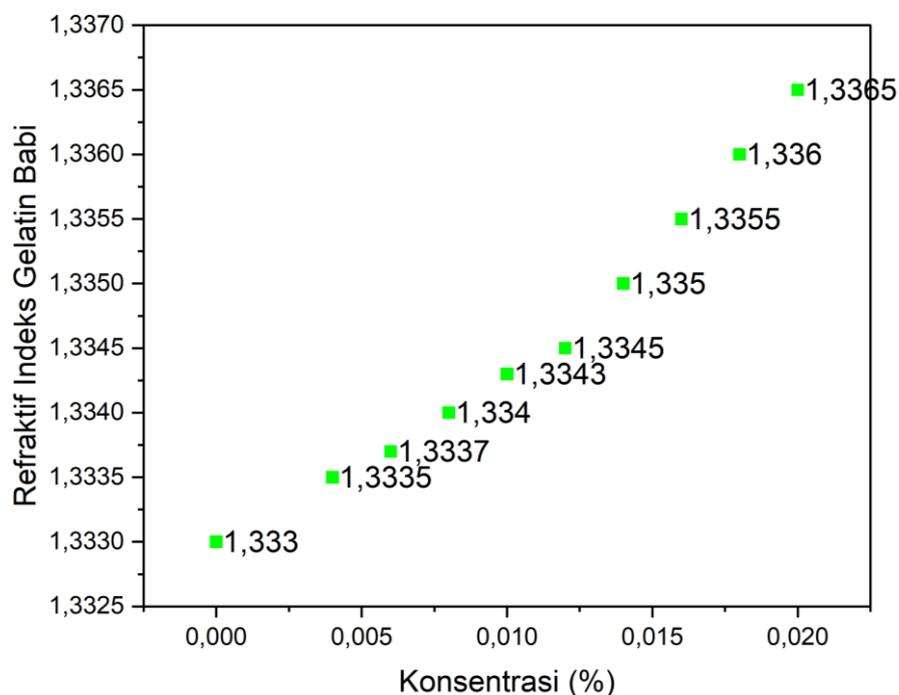
Konsentrasi gelatin babi yang diuji berkisar dari 0,4% hingga 2% dengan interval 0,2%. Setiap nilai indeks bias yang diperoleh dicatat, kemudian dihitung rata-ratanya untuk meningkatkan akurasi data. Hasil pengukuran indeks bias untuk setiap variasi konsentrasi gelatin babi disajikan dalam Tabel 4.2

**Tabel 4. 2** Data hasil pengukuran indeks bias gelatin babi pada tiap variasi konsentrasi

No	Konsentrasi	Indeks Bias Gelatin Babi			
		1	2	3	Rata - rata
1	0,00%	1,3328	1,3330	1,3332	1,333
2	0,40%	1,3333	1,3335	1,3337	1,3335
3	0,60%	1,3336	1,3338	1,3339	1,3337
4	0,80%	1,3341	1,3339	1,3340	1,3340
5	1,00%	1,3344	1,3342	1,3343	1,3343
6	1,20%	1,3345	1,3346	1,3344	1,3345
7	1,40%	1,3350	1,3349	1,3351	1,3350
8	1,60%	1,3356	1,3354	1,3355	1,3355
9	1,80%	1,3361	1,3359	1,3360	1,3360
10	2,00%	1,3366	1,3365	1,3364	1,3365

Pengukuran indeks bias dilakukan untuk mengetahui perubahan nilai indeks bias larutan dengan berbagai konsentrasi gelatin babi. Hasil pengukuran indeks bias gelatin babi dengan konsentrasi 0,00% hingga 2,00% ditampilkan dalam Tabel 4.2. Berdasarkan data yang diperoleh, indeks bias larutan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya konsentrasi gelatin babi. Pada konsentrasi 0,00% (tanpa gelatin babi), indeks bias larutan tercatat sebesar 1,333, yang sesuai dengan nilai indeks bias air murni. Seiring meningkatnya konsentrasi gelatin babi dari 0,40% hingga 2,00%, indeks bias larutan juga meningkat secara bertahap dari 1,3335 hingga 1,3365. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak gelatin babi yang terlarut dalam larutan, semakin tinggi indeks biasnya.

Grafik konsentrasi dengan nilai rata-rata indeks bias gelatin babi disajikan sebagai berikut:



**Gambar 4. 1** Grafik konsentrasi dengan nilai indeks bias gelatin babi

Berdasarkan plot grafik dapat dilihat bahwa nilai indeks bias meningkat seiring peningkatan konsentrasi. Kenaikan indeks bias ini disebabkan oleh perbedaan sifat optik antara air dan gelatin babi, di mana gelatin memiliki indeks bias lebih tinggi dibandingkan air. Dengan meningkatnya konsentrasi gelatin babi dalam larutan, kepadatan optik larutan juga bertambah sehingga menyebabkan perubahan lintasan cahaya yang melewatinya. Perubahan indeks bias akibat variasi konsentrasi gelatin babi dapat memengaruhi puncak resonansi pada SPR, sehingga indeks bias ini berperan sebagai parameter utama dalam optimasi sensor SPR untuk deteksi gelatin babi.

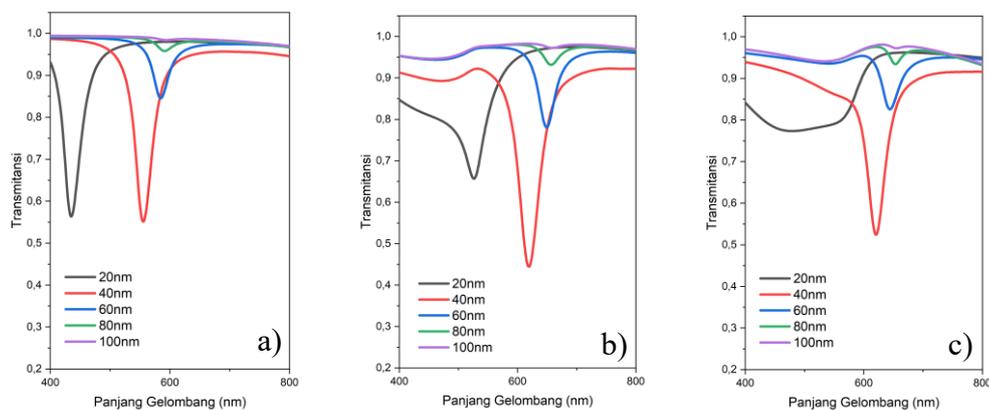
Hasil pengukuran indeks bias menunjukkan bahwa nilai indeks bias meningkat seiring bertambahnya konsentrasi gelatin babi. Pada konsentrasi 0,4% indeks bias larutan tercatat sebesar 1,3335, sedangkan pada konsentrasi 2% indeks bias rata – ratanya mencapai 1,3365 (Tabel 4.2). Peningkatan konsentrasi gelatin 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. Hal ini sejalan dengan teori yang dikemukakan oleh Faizatuz & Rubiyanto (2018). Peningkatan ini disebabkan adanya perubahan sifat optik larutan akibat interaksi antara molekul gelatin dan air, yang mengubah cara cahaya merambat dalam medium tersebut. Selain itu, penelitian ini juga sejalan dengan teori Selain itu, teori dari Kusumaningrum & Suzanti Betha (2018) bahwa konsentrasi zat terlarut dalam larutan berpengaruh pada interaksi cahaya dengan molekul-molekul dalam larutan. Semakin tinggi konsentrasi gelatin, semakin padat molekul-molekulnya, yang menghambat laju perambatan cahaya, sehingga menyebabkan peningkatan indeks bias larutan. Kedua teori ini menggarisbawahi bagaimana peningkatan konsentrasi gelatin mempengaruhi perubahan sifat optik larutan dan meningkatkan indeks biasnya.

#### **4.2. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Ketebalan Lapisan Logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga)**

Penelitian ini dilakukan dengan menyimulasikan sensor SPR menggunakan software ANSYS Lumerical FDTD. Desain dasar sensor menggunakan core serat optik, panjang probe sensing 100mikrometer, dan konsnetrasi analit berupa gelatin

babi ditunjukkan dengan nilai refraktif indeks dari 1.3335 hingga 1.3365. Simulasi dilakukan bertahap, diawali dengan optimasi ketebalan masing-masing logam. Kemudian dilanjutkan dengan optimasi material logam yang cocok untuk deteksi gelatin babi pada sensor SPR berbasis fiber optik. Desain probe dilewatkan pada panjang gelombang 400-1200 nm dan memakan waktu *running* 30-45 menit tiap variasi desain.

Simulasi dilakukan untuk menentukan ketebalan material pelapis logam yang memberikan respons terbaik terhadap SPR. Material yang diuji meliputi perak (Ag), Emas (Au), dan Tembaga (Cu) dengan ketebalan 20nm, 40nm, 60nm, 80nm, dan 100nm. Dengan menggunakan konsentrasi 0,4%, refraktif indeksnya 1.3335. Berikut merupakan plot grafik dari simulasi trasmitansi yang menggambarkan pergeseran panjang gelombang berdasarkan variasi ketebalan material pelapis logam.

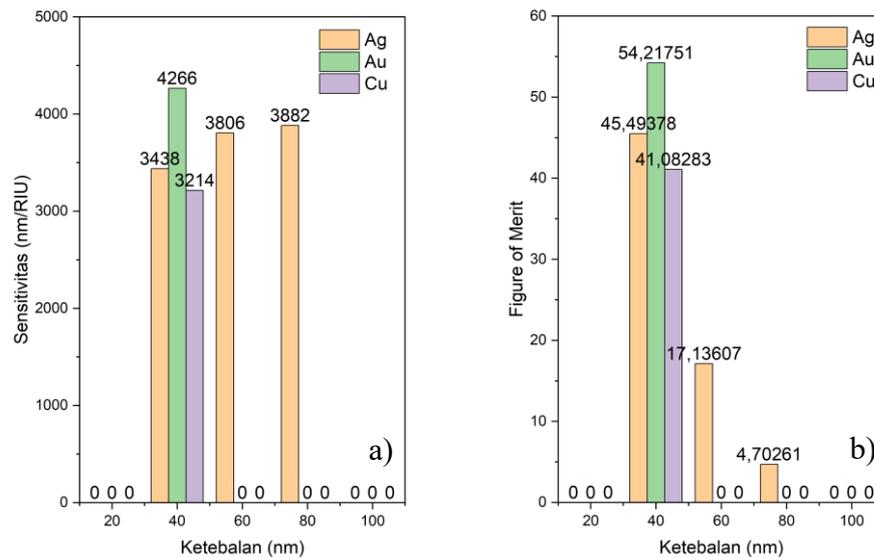


**Gambar 4. 2** Spektrum transmitansi SPR untuk pengukuran  $n = 1.3335$  dengan material pelapis (a) Ag, (b) Au, dan (c) Cu

Dalam Gambar 4.1, menunjukkan terjadinya transmittansi minimum yang seperti jurang (dip) pada panjang gelombang tertentu dikarenakan oleh efek SPR, dimana konstanta propagasi cahaya datang dan  $S_{ps}$  bernilai sama. Kurva

dikelompokkan berdasarkan jenis material logam. Hasil perhitungan menunjukkan tebal lapisan Ag, Au, dan Cu, menunjukkan bahwa dip semakin dangkal. Semua material menunjukkan pendangkalan dimulai dari 60nm – 100nm. Di sisi lain, material Cu pada ketebalan 20nm tidak menimbulkan dip, sedangkan material Ag dan Au di 20nm memiliki dip yang lebih dangkal daripada Ag dan Au di ketebalan 40nm. Selain itu, letak panjang gelombang resonansi bergeser kearah kanan seiring tebalnya lapisan material plasmonik, hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Mendes et al., 2024). Penyebab bergesernya  $\lambda_{SPR}$  seiring bertambahnya ketebalan lapisan disebabkan efektif indeks SPs bergantung pada ketebalan lapisan material plasmonik, di mana efektif indeks SPs mempengaruhi konstanta propagasinya yang tentu mempengaruhi posisi  $\lambda_{SPR}$  (Riana, 2023).

Berdasarkan hasil pergeseran panjang gelombang pada setiap ketebalan, didapatkan nilai sensitivitas dan figure of merit untuk mendukung optimasi ketebalan material pelapis logam. Berikut grafik hubungan antara ketebalan dengan sensitivitas dan figure of merit.



**Gambar 4. 3** Grafik Perbandingan (a) Sensitivitas dan (b) Figure of Merit dengan variasi ketebalan material logam

Berdasarkan analisis karakteristik sensor SPR dengan variasi ketebalan didapatkan nilai sensitivitas, deteksi akurasi, kualitas faktor, dan figure of merit menggunakan rumus 2.20 sampai 2.23. Salah satu parameter yang paling penting dari sensor SPR adalah sensitivitas, dimana nilainya bergantung pada jenis ketebalan lapisan material plasmonik. Gambar 4.2 (a) menunjukkan bahwa sensitivitas dengan ketebalan 40nm untuk semua material lebih tinggi, karena nilai sensitivitas tertinggi sebesar 4266 nm/RIU untuk material Au dan pada material Ag dan Cu memiliki nilai sensitivitas sebesar 3438 nm/RIU dan 3214 nm/RIU untuk ketebalan 40nm dibandingkan dengan ketebalan lainnya, seperti ketebalan 60nm dan 80nm hanya material Ag saja yang mempunyai nilai sensitivitas sebesar 3806 nm/RIU dan 3882 nm/RIU, sedangkan di ketebalan 20nm dan 100nm tidak terdapat nilai sensitivitas sama sekali untuk semua material. Artinya, tidak ada perubahan panjang gelombang di ketebalan tersebut, sehingga nilai sensitivitasnya 0 nm/RIU.

Selain nilai sensitivitas, parameter yang mendukung yaitu nilai FoM (Figure of Merit) karena nilai FoM ini merupakan gabungan dari semua parameter yang ada seperti Sensitivitas, Deteksi Akurasi, dan Faktor Kualitas. Pada Gambar 4.2 (b) menunjukkan hubungan antara ketebalan dengan nilai FoM yakni, nilai FoM tertinggi diduduki oleh material Au pada ketebalan 40nm, selain itu material Ag dan Cu di ketebalan 40nm juga memiliki nilai FoM yang tinggi dibandingkan dengan ketebalan 60nm dan 80nm yang hanya memiliki nilai FoM sebesar 17,13607 dan 4,70261 pada material Ag saja. Sedangkan di ketebalan 20nm dan 100nm memiliki nilai FoM sebesar 0.

Berdasarkan analisis spektrum transmisi dengan panjang gelombang, nilai sensitivitas, dan figure of merit, penulis menyimpulkan bahwa ketebalan material logam plasmonic yang paling optimal adalah 40nm. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Tazi et al., 2024), yang menjelaskan bahwa ketebalan lapisan logam yang terlalu tipis atau terlalu tebal dapat mengurangi efisiensi eksitasi plasmon. Karena, jika lapisan terlalu tipis (20nm), interaksi antara medan evanescent dan electron bebas pada permukaan logam menjadi kurang optimal, sehingga eksitasi surface plasmon tidak maksimal. Sebaliknya, jika lapisan terlalu tebal (80nm atau lebih), sebagian besar cahaya yang masuk akan terserap oleh logam, menyebabkan pelebaran spektrum resonansi dan berkurangnya sensitivitas sensor.

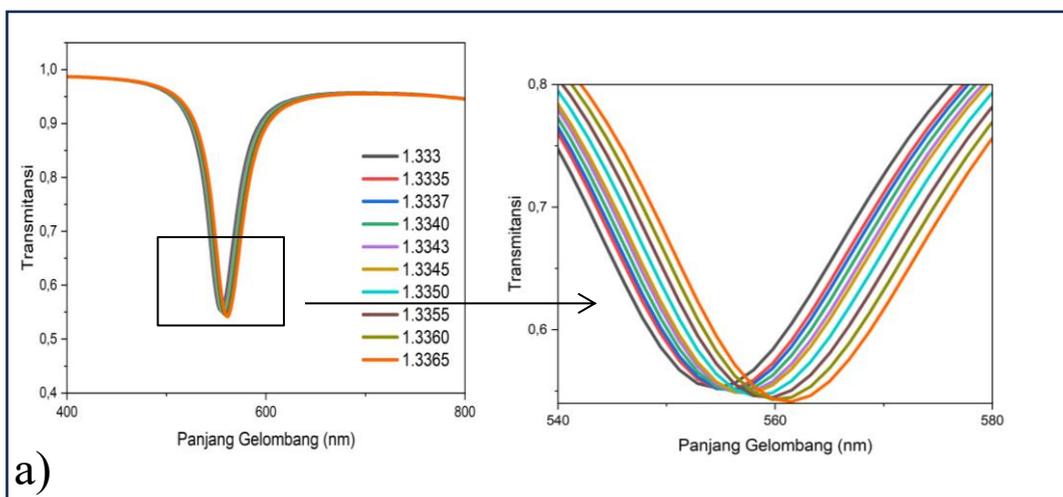
Oleh karena itu, ketebalan 40nm dipilih sebagai ketebalan optimal karena mampu menghasilkan respons SPR dengan sensitivitas tertinggi dalam deteksi gelatin babi. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Zhang & Pu,

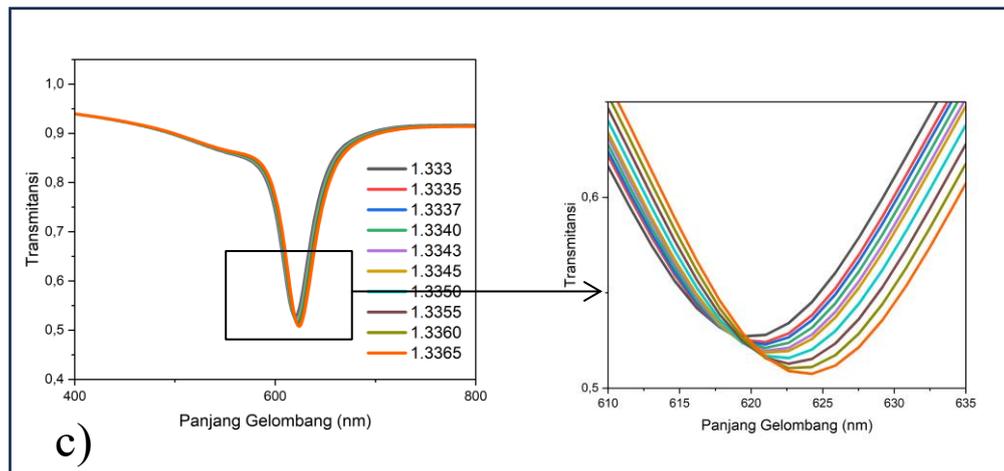
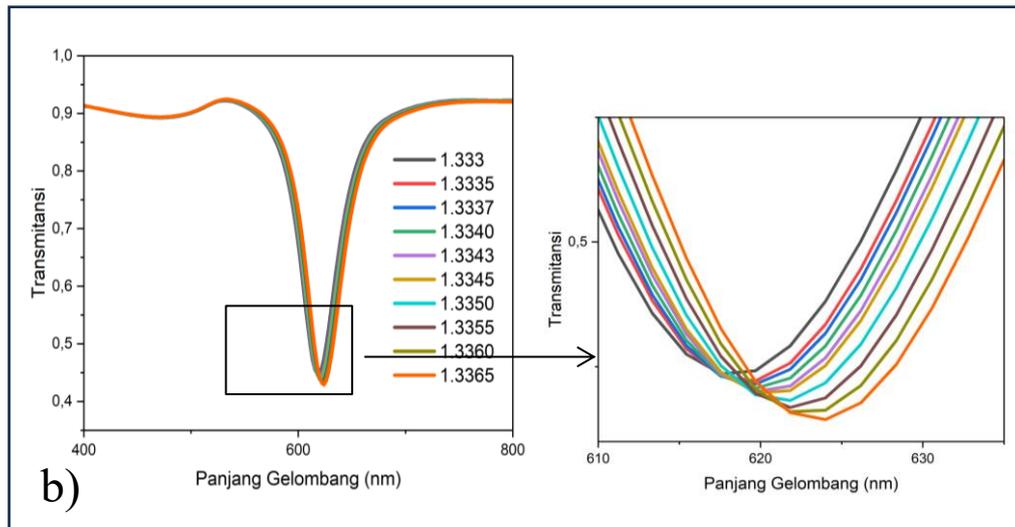
2019) bahwa ketika ketebalan 40nm menghasilkan respon resonansi yang tajam dan sensitif.

#### 4.3. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Lapisan Logam Ag (perak), Au (emas), dan Cu (tembaga)

Simulasi dilakukan untuk membandingkan peformas logam Ag, Au, dan Cu di ketebalan 40nm. Analit yang digunakan adalah gelatin babi dengan konsentrasi 0,4% hingga 2% dengan interval 0,2% , dengan pembanding indeks bias aquades yang memiliki konsentrasi 0%. Hal ini bertujuan untuk mengamati apakah perubahan konsentrasi di tingkat terendah memiliki pola yang sama dengan di tingkat tertinggi.

Berikut merupakan grafik hasil simulasi transmitansi yang menggambarkan pergeseran panjang gelombang berdasarkan variasi material pelapis logam plasmonik.

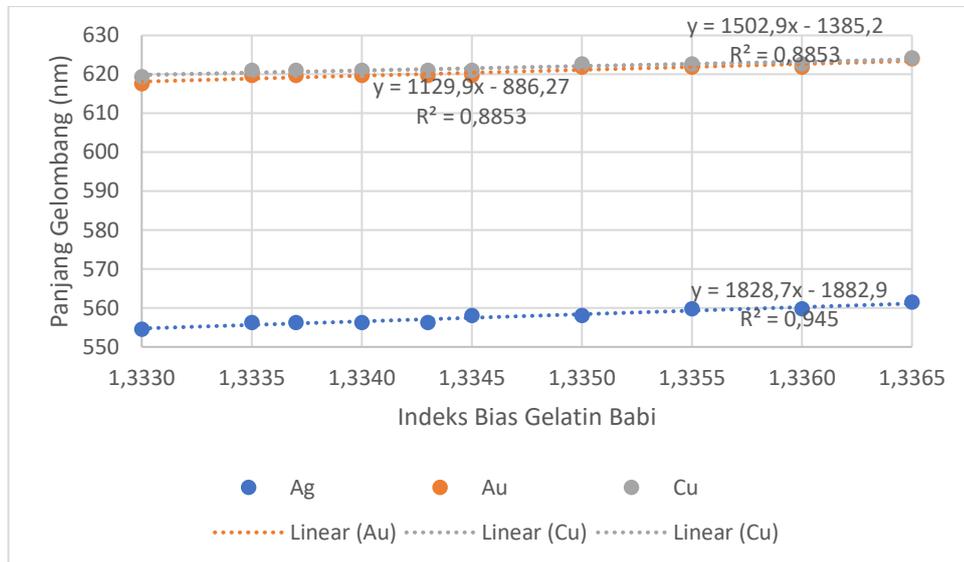




**Gambar 4. 4** Spektrum transmittansi SPR pada material pelapis logam (a) Ag, (b) Au, dan (c) Cu

Berdasarkan grafik, transmittansi minimum yang mendekati nol dimiliki material logam Au, yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 (b). Selain itu, panjang gelombang tiap logam mengalami pergeseran ke kanan seiring bertambahnya nilai indeks bias. Untuk rentang indeks bias, dipertimbangkan plot panjang gelombang sebagai fungsi dari indeks bias analit yang menunjukkan hubungan linier sensor SPR dengan performa terbaik akan memerlukan pergeseran panjang gelombang terbesar.

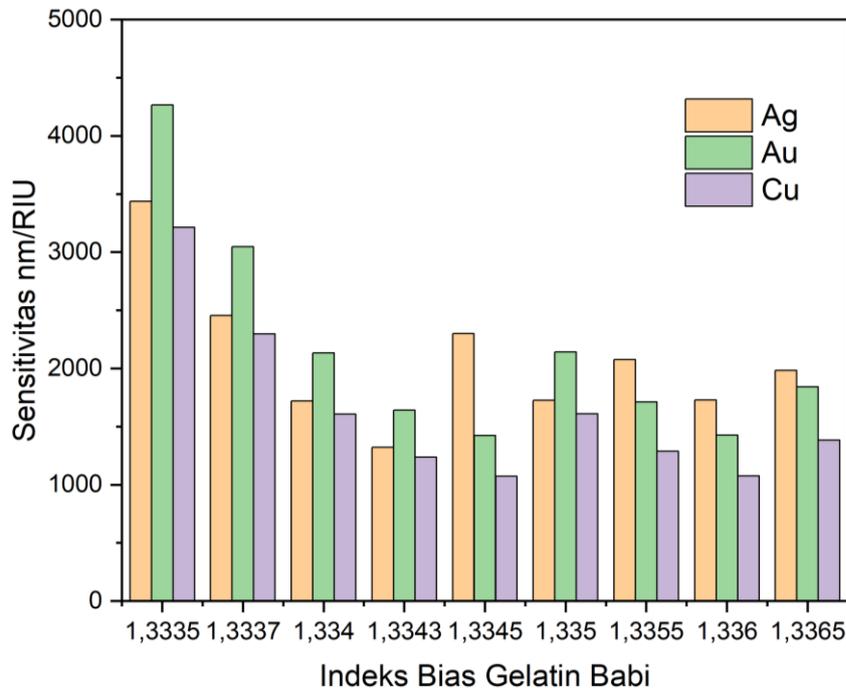
Plot grafik hubungan antara nilai indeks bias dengan panjang gelombang disajikan sebagai berikut:



**Gambar 4.5** Kurva fitting linear antara panjang gelombang resonansi  $\lambda_{SPR}$  dan refraktif indeks analis untuk desain sensor Ag, Au, dan Cu

Sensor SPR dengan performa terbaik akan memberikan pergeseran panjang gelombang terbesar, berdasarkan Gambar 4.5 material Ag memiliki pergeseran panjang gelombang yang besar dilihat dari hubungan linier antara indeks bias analit dengan panjang gelombang. Untuk menentukan material yang optimal tidak hanya dilihat dari plot grafik hubungan linier saja, akan tetapi harus dipertimbangkan dari parameter kinerja sensor seperti nilai sensitivitas, deteksi akurasi, kualitas faktor, dan *figure of merit* sesuai dengan rumus 2.20 sampai 2.23

Grafik hubungan antara semua variasi indeks bias gelatin babi dengan nilai sensitivitas disajikan sebagai berikut:



**Gambar 4. 6** Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan sensitivitas

Grafik yang disajikan pada Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan sensitivitas yang dihasilkan oleh sensor SPR berbasis fiber optik untuk tiga material yang diuji, yaitu perak (Ag), emas (Au), dan tembaga (Cu). Dalam grafik ini, sensitivitas diukur dalam nm/RIU, yang menunjukkan sejauh mana perubahan indeks bias berpengaruh terhadap perubahan panjang gelombang yang terdeteksi oleh sensor.

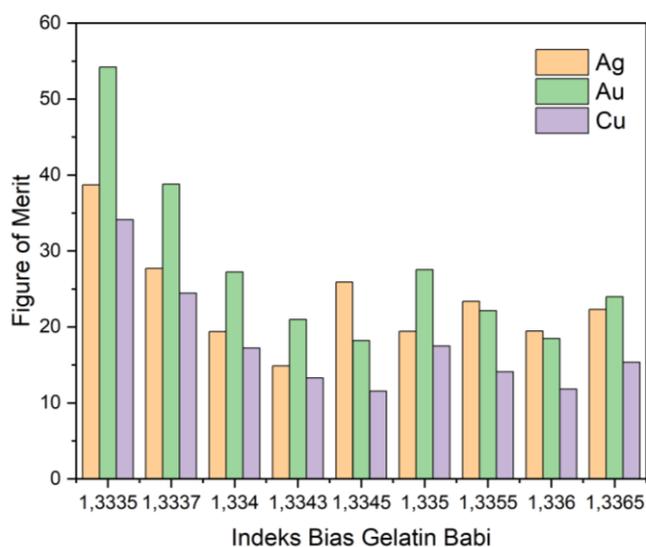
Berdasarkan Gambar 4.6, terlihat bahwa pada rentang indeks bias rendah (sekitar 1,3335 hingga 1,3343), material emas (Au) menunjukkan sensitivitas tertinggi dibandingkan Ag dan Cu. Misalnya, pada indeks bias 1,3335, Au memiliki

sensitivitas sebesar 4266 nm/RIU, sementara Ag dan Cu masing-masing hanya mencapai 3438 nm/RIU dan 3214 nm/RIU. Nilai ini menunjukkan bahwa emas sangat responsif terhadap perubahan kecil pada indeks bias, sehingga sangat ideal digunakan dalam aplikasi sensor SPR untuk deteksi konsentrasi rendah atau nilai indeks bias yang kecil, seperti pada tahap awal pendeteksian gelatin babi. Namun, seiring meningkatnya indeks bias hingga mendekati 1,3365, terlihat bahwa performa emas mulai menurun, dan justru perak (Ag) menunjukkan stabilitas dan sensitivitas yang cenderung lebih tinggi. Misalnya, pada indeks bias 1,3365, Ag memiliki sensitivitas sebesar 1983,43 nm/RIU, sedikit lebih tinggi dari Au (1841,14 nm/RIU) dan jauh lebih tinggi dibandingkan Cu (1384,29 nm/RIU). Tren ini menunjukkan bahwa perak menjadi lebih optimal digunakan pada konsentrasi atau indeks bias yang lebih tinggi, karena kemampuannya dalam mempertahankan sensitivitas meskipun respons awalnya lebih rendah dibandingkan emas. Sementara itu, tembaga (Cu) secara keseluruhan menunjukkan sensitivitas yang paling rendah di seluruh rentang indeks bias yang diuji. Hal ini menandakan bahwa Cu kurang efektif dalam mendeteksi perubahan indeks bias yang halus, sehingga kurang ideal untuk digunakan dalam aplikasi sensor SPR yang menuntut akurasi dan sensitivitas tinggi, baik pada konsentrasi rendah maupun tinggi.

Berdasarkan hasil analisis grafik pada gambar 4.6, Berdasarkan hasil analisis sensitivitas terhadap variasi indeks bias gelatin babi, dapat disimpulkan bahwa emas (Au) merupakan material paling optimal untuk digunakan pada rentang indeks bias rendah, karena menunjukkan sensitivitas tertinggi hingga 4266 nm/RIU pada indeks bias 1,3335. Sementara itu, perak (Ag) menunjukkan performa yang lebih stabil dan unggul pada indeks bias yang lebih tinggi, dengan sensitivitas mencapai

1983 hingga 2299 nm/RIU. Hal ini menjadikan Ag lebih sesuai untuk aplikasi sensor SPR pada konsentrasi gelatin babi yang lebih tinggi. Karena sensitivitas merupakan parameter yang paling utama, secara langsung parameter ini mencerminkan kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan indeks bias analit secara akurat (Mauludi et al., 2024). Semakin besar nilai sensitivitasnya maka sensor lebih peka terhadap keberadaan gelatin babi. Selain nilai sensitivitas, untuk menentukan material yang optimal dapat didukung dari nilai figure of merit, karena menggabungkan beberapa aspek yang berhubungan dengan kinerja sensor secara keseluruhan.

Grafik hubungan antara semua variasi indeks bias gelatin babi dengan nilai figure of merit disajikan sebagai berikut:



**Gambar 4. 7** Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan parameter figure of merit

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.7, terlihat bahwa material emas (Au) memberikan nilai Figure of Merit (FOM) tertinggi pada sebagian besar nilai indeks bias yang diuji, terutama pada rentang 1,3335 hingga 1,3343. Nilai FOM tertinggi

tercatat sebesar 54,19 pada indeks bias 1,3335, diikuti oleh nilai tinggi lainnya seperti 38,80 pada 1,3337 dan 27,23 pada 1,3340. Hal ini menunjukkan bahwa emas sangat efektif dan efisien dalam mendeteksi perubahan kecil pada indeks bias gelatin babi, sehingga menjadi pilihan material yang paling optimal untuk aplikasi sensor SPR berbasis serat optik yang membutuhkan resolusi deteksi tinggi. Sementara itu, perak (Ag) menunjukkan performa yang cukup baik dan stabil pada berbagai indeks bias. Meskipun tidak melampaui performa emas, perak tetap mempertahankan nilai FOM yang relatif tinggi dan konsisten, seperti 38,71 pada indeks bias 1,3335, 27,68 pada 1,3337, dan 25,89 pada 1,3345. Konsistensi ini menjadikan perak sebagai alternatif yang andal untuk sistem sensor SPR, terutama ketika mempertimbangkan kestabilan. Berbeda halnya dengan tembaga (Cu), yang secara umum menunjukkan nilai FOM paling rendah di antara ketiga material. Nilai FOM tertinggi yang dicapai Cu adalah 34,11 pada indeks bias 1,3335, namun secara keseluruhan nilainya cenderung rendah, terutama pada indeks bias menengah ke atas seperti 11,54 pada 1,3345 dan 11,81 pada 1,3360. Rendahnya nilai FOM ini menandakan bahwa tembaga memiliki kemampuan deteksi yang kurang tajam, dan kurang sensitif terhadap perubahan kecil pada indeks bias analit, sehingga kurang direkomendasikan untuk aplikasi sensor SPR yang membutuhkan akurasi tinggi.

Penelitian oleh (Meng et al., 2017) menunjukkan bahwa material dengan sensitivitas tinggi menghasilkan FOM yang lebih besar, terutama dalam aplikasi sensor SPR yang memerlukan deteksi perubahan indeks bias yang sangat kecil. FOM yang tinggi menunjukkan bahwa material tersebut lebih optimal dalam memberikan deteksi yang akurat dan responsif terhadap perubahan kecil pada medium penginderaan.

Pengujian karakteristik sensor SPR berbasis fiber optik dengan variasi material pelapis logam bertujuan untuk menentukan material yang paling optimal dalam mendeteksi perubahan indeks bias akibat keberadaan gelatin babi. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan parameter kinerja sensor, material emas (Au) menunjukkan performa paling unggul dibandingkan dengan perak (Ag) dan tembaga (Cu) dalam mendeteksi perubahan indeks bias gelatin babi. Keunggulan emas terlihat dari nilai sensitivitas tertinggi sebesar 4266 nm/RIU pada konsentrasi 0,40%, serta nilai deteksi akurasi, faktor kualitas, dan figure of merit (FOM) yang lebih tinggi dibandingkan material lainnya.

Dalam penelitian ini, menunjukkan bahwa sensor dengan pelapis emas menghasilkan resonansi yang lebih tajam dan akurat, serta pergeseran panjang gelombang yang stabil pada beberapa titik indeks bias, menandakan kemampuannya dalam merespons perubahan indeks bias dengan baik. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh (Zhang & Pu, 2019), yang menyatakan bahwa emas memiliki konstanta propagasi surface plasmon yang lebih baik, sehingga lebih responsif terhadap perubahan indeks bias medium.

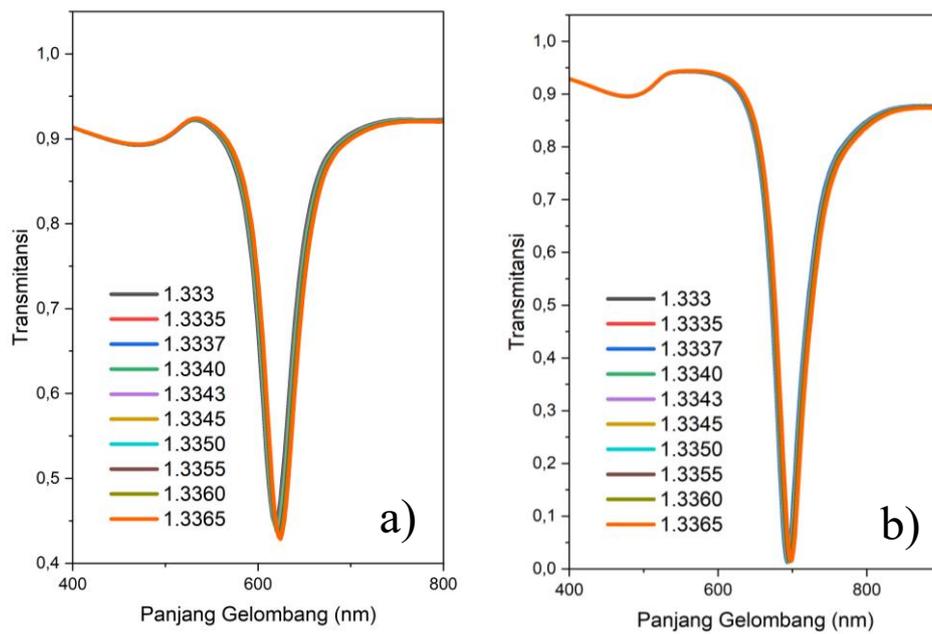
Dengan mempertimbangkan baik dari aspek teori maupun hasil simulasi numerik, dapat disimpulkan bahwa emas merupakan material pelapis logam paling efektif dan sensitif dalam deteksi gelatin babi menggunakan sensor SPR berbasis fiber optik pada konsentrasi rendah.

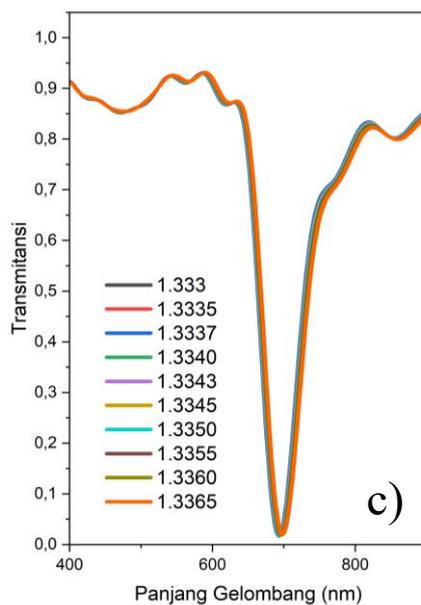
#### **4.4. Pengujian Karakteristik Sensor SPR Berbasis Fiber Optik dengan Variasi Panjang Probe Sensing**

Panjang probe sensing merupakan area dimana gelombang plasmon permukaan berinteraksi dengan indeks bias analit, yang dalam hal ini adalah gelatin

babi. Panjang probe sensing divariasikan dari 100, 200, dan 300  $\mu\text{m}$ . Lapisan Au memiliki ketebalan 40nm, dan analit yang digunakan mengikuti Tabel 4.2. Dari hasil simulasi, panjang probe sensing memiliki pengaruh pada parameter peforma sensor.

Grafik spektrum transmitansi SPR dengan setiap variasi panjang probe sensing disajikan sebagai berikut:



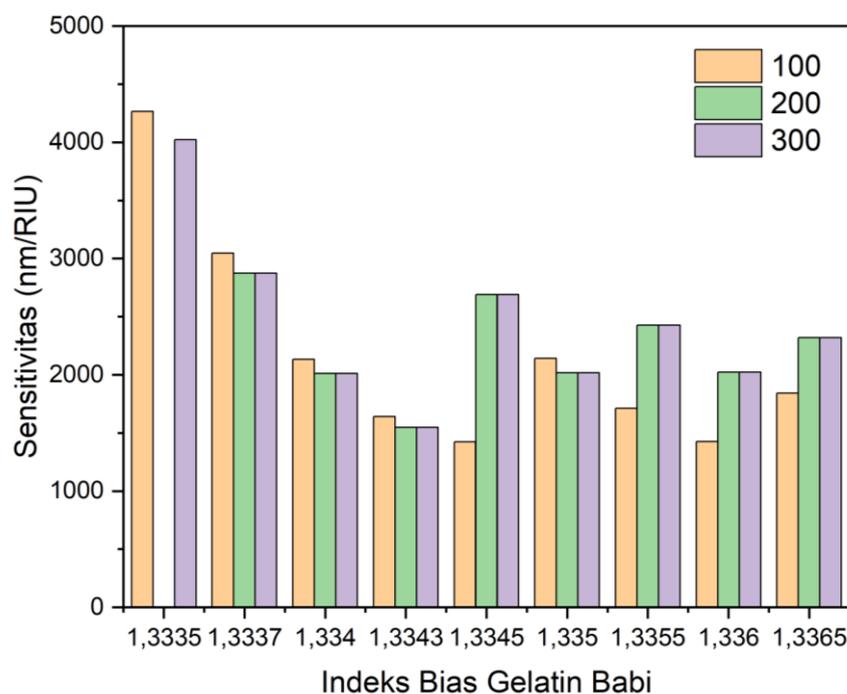


**Gambar 4. 8** Spektrum transmittansi SPR dengan panjang probe sensing (a) 100  $\mu\text{m}$ , (b) 200  $\mu\text{m}$ , dan (c) 300  $\mu\text{m}$

Berdasarkan Gambar 4.8 (a), terlihat bahwa pada panjang probe sensing 100  $\mu\text{m}$ , sensor SPR mengalami resonansi pada panjang gelombang yang lebih pendek, yaitu 617,556 nm hingga 624 nm. Hal ini menunjukkan bahwa probe sensing yang lebih kecil mempengaruhi pengaturan resonansi pada gelombang plasmon. Pada panjang probe sensing yang lebih kecil, interaksi antara cahaya dan lapisan logam lebih terbatas, yang mengarah pada pergeseran resonansi yang lebih kecil pada panjang gelombang. Oleh karena itu, resonansi SPR pada 100  $\mu\text{m}$  lebih sensitif terhadap perubahan kecil dalam indeks bias, tetapi tidak mampu mendeteksi perubahan besar pada konsentrasi atau perubahan indeks bias yang lebih tinggi. Pada gambar 4.8 (b) panjang probe sensing 200  $\mu\text{m}$  dan gambar 4.8 (c) panjang 300  $\mu\text{m}$ , terlihat bahwa resonansi terjadi pada panjang gelombang yang lebih panjang, yaitu 692,909 nm hingga 701,025 nm.

Pada simulasi ini,  $T_{min}$  untuk panjang probe sensing 100  $\mu\text{m}$  sebesar 0,447158. Sedangkan pada panjang 200  $\mu\text{m}$  dan 300  $\mu\text{m}$  lebih dalam sebesar 0,01507 dan 0,01818. Hasil simulasi ini, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Riana, 2023) yang menyatakan bahwa semakin panjang probe sensing semakin dalam  $T_{min}$ , ini terjadi di setiap pengukuran indeks bias analit. Probe sensing yang lebih besar memberikan resonansi yang lebih. Resonansi yang lebih lebar ini berhubungan dengan interaksi yang lebih kuat antara cahaya dan lapisan logam, yang memungkinkan sensor untuk mendeteksi perubahan lebih besar dalam indeks bias dengan lebih akurat. Probe sensing yang lebih besar juga memungkinkan sensor untuk mendeteksi pergeseran panjang gelombang yang lebih besar, yang meningkatkan sensitivitas sensor terhadap perubahan analit.

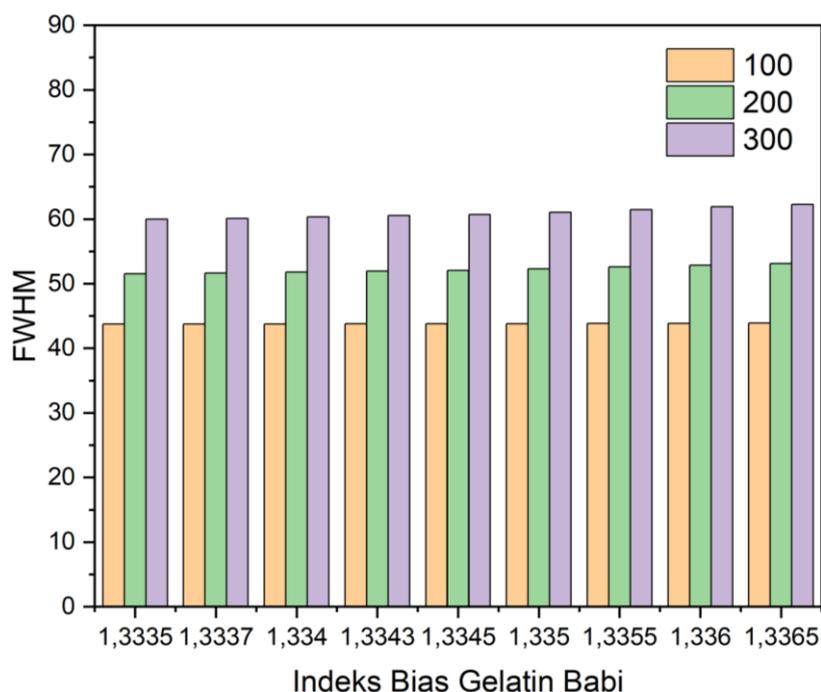
Namun, perlu dilakukan analisis menggunakan karakteristik performa sensor, seperti sensitivitas, deteksi akurasi, faktor kualitas, dan *figure of merit* untuk menentukan optimasi panjang probe sensing. Berikut disajikan grafik hubungan antara indeks bias gelatin dengan nilai sensitivitas:



**Gambar 4. 9** Grafik hubungan antara indeks bias gelatin babi dengan nilai sensitivitas (nm/RIU)

Berdasarkan Gambar 4.9, panjang probe sensing 100  $\mu\text{m}$  menunjukkan sensitivitas tertinggi dibandingkan panjang 200  $\mu\text{m}$  dan 300  $\mu\text{m}$  pada sebagian besar rentang indeks bias gelatin babi. Sensitivitas tertinggi tercatat pada indeks bias 1,3335 dengan panjang probe 100  $\mu\text{m}$  yaitu sebesar 4266 nm/RIU, sementara pada panjang 300  $\mu\text{m}$  sebesar 4022 nm/RIU, dan pada 200  $\mu\text{m}$  sensitivitasnya nol, karena puncak resonansi yang dihasilkan tidak bergeser dibandingkan dengan kondisi awal (konsentrasi 0%). Pada indeks bias 1,3337, panjang 100  $\mu\text{m}$  juga memiliki nilai sensitivitas tertinggi yaitu 3047,14 nm/RIU, dibandingkan 2872,86 nm/RIU untuk panjang 200  $\mu\text{m}$  dan 300  $\mu\text{m}$ . Pola ini berlanjut pada indeks bias 1,3340, di mana sensitivitas panjang 100  $\mu\text{m}$  tercatat 2133 nm/RIU, lebih tinggi dibandingkan panjang 200 dan 300  $\mu\text{m}$  yang sama-sama bernilai 2011 nm/RIU. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa pada panjang probe yang lebih pendek, interaksi medan evanescent dengan analit menjadi lebih efisien dan responsif, sehingga

menghasilkan pergeseran panjang gelombang resonansi yang lebih besar. Sebaliknya, pada panjang probe yang lebih panjang seperti 200  $\mu\text{m}$  dan 300  $\mu\text{m}$ , sebagian besar energi cahaya mengalami redaman atau penyebaran, menyebabkan pergeseran resonansi yang lebih kecil atau bahkan tidak terjadi, seperti yang terlihat pada indeks bias 1,3335 untuk 200  $\mu\text{m}$ . Grafik hubungan antara indeks bias dengan FWHM disajikan sebagai berikut:



**Gambar 4. 10** Grafik hubungan antara indeks bias analit dengan nilai FWHM

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa, untuk panjang 100 mikrometer memiliki nilai FWHM yang sangat kecil, artinya sensor SPR dengan panjang 100mikrometer optimal untuk deteksi gelatin karena semakin sempit FWHM maka semakin bagus sensor tersebut untuk mendeteksi sebuah analit. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Gupta et al., 2016) yang menyatakan bahwa FWHM yang sempit pada sensor SPR berbasis fiber optik memungkinkan deteksi

perubahan kecil dalam indeks refraksi secara lebih efisien. Penulis menyimpulkan bahwa panjang probe sensing yang paling optimal adalah 100mikrometer.

#### **4.5. Kajian Keislaman**

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sensor SPR berbasis fiber optik untuk mendeteksi gelatin babi. Dalam perspektif Islam, keberadaan bahan yang berasal dari babi dalam makanan dan obat-obatan merupakan persoalan penting karena berkaitan dengan kehalalan produk yang dikonsumsi oleh umat Muslim. Oleh karena itu, penelitian ini dapat dikaitkan dengan ajaran Islam mengenai halal dan haram, serta upaya umat Islam dalam memanfaatkan teknologi untuk menciptakan sistem deteksi yang lebih akurat dan efisien.

Dalam Islam, kehalalan suatu produk tidak hanya sekedar terbebas dari zat yang diharamkan, tetapi juga harus memenuhi standar thayyib, yaitu baik, suci, dan tidak membahayakan. Para ulama mendefinisikan konsep halal dari berbagai sudut pandang. Al-Asfahani menjelaskan bahwa halal secara bahasa berarti terbuka dan terbebas, sedangkan secara istilah berarti sesuatu yang tidak dikenakan sanksi dalam penggunaannya. Al-Baghawi menekankan bahwa halal adalah sesuatu yang diperbolehkan oleh syariat karena sifatnya yang baik. Yusuf Qaradhawi mendefinisikan halal sebagai segala sesuatu yang tidak membahayakan dan diizinkan oleh Allah untuk dikerjakan, sementara Al-Sa'di lebih menyoroti bahwa kehalalan bukan hanya pada zatnya, tetapi juga cara memperolehnya, yang harus dilakukan dengan cara yang benar dan tidak melanggar aturan syariat (Syarifah, 2024). Dari berbagai pandangan ini, dapat disimpulkan bahwa makanan yang halal bukan hanya ditentukan oleh kandungan zatnya, tetapi juga cara mendapatkannya harus sesuai dengan hukum Islam.

Kehalalan sangat erat kaitannya dengan kebolehan atau larangan dalam Islam, sebagaimana ditegaskan dalam Q.S an-Nahl (16):115,

إِنَّمَا حَرَّمَ عَلَيْكُمُ الْمَيْتَةَ وَالدَّمَ وَلَحْمَ الْخِنزِيرِ وَمَا أُهْلِيَ لِعَیْرِ اللَّهِ بِهِ

“*Sesungguhnya Allah hanya mengharamkan atasmu bangkai, darah, daging babi, dan (hewan) yang disembelih dengan (menyebut nama) selain Allah.*” Q.S an-Nahl (16):115.

Q.S an-Nahl (16):115 menjelaskan larangan tegas terhadap konsumsi daging babi dan semua turunannya termasuk gelatin babi. Hal ini dikuatkan dengan Hadist Riwayat Abu Daud yang menekankan bahwa segala sesuatu yang mengandung daging babi haram.

عَنْ أَبِي هُرَيْرَةَ أَنَّ رَسُولَ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ قَالَ إِنَّ اللَّهَ حَرَّمَ الْخَمْرَ وَثَمَنَهَا وَحَرَّمَ الْمَيْتَةَ وَثَمَنَهَا وَحَرَّمَ الْخِنزِيرَ وَثَمَنَهُ

Dari Abu Hurairah bahwasanya Rasulullah shallallahu ‘alaihi wa sallam bersabda: “*Sesungguhnya Allah telah mengharamkan khamr dan hasil penjualannya dan mengharamkan bangkai dan hasil penjualannya serta mengharamkan babi dan hasil penjualannya.*” (HR. Abu Daud).

Selain itu Hadist Riwayat Muslim no.1015 yang menekankan bahwa sesuatu yang dapat diterima oleh Allah haruslah thayyib (baik dan suci).

إِنَّ اللَّهَ طَيِّبٌ لَا يَقْبَلُ إِلَّا طَيِّبًا

“*Sesungguhnya Allah itu Maha Baik dan tidak menerima kecuali yang baik*” (HR. Muslim no. 1015).

Dalam kitab Syarh Shahih Muslim, Imam An-Nawawi menjelaskan bahwa kata طَيِّبٌ (Thayyib) dalam hadis ini berarti suci, bersih, dan baik dalam segala hal. Hadis ini menunjukkan bahwa Allah hanya menerima amal, makanan, dan perbuatan yang bersih dari segala bentuk kotoran, termasuk yang diharamkan seperti riba, makanan haram, dan perbuatan maksiat. Dalam konteks makanan dan konsumsi, hadis ini menegaskan bahwa seorang Muslim wajib mengonsumsi makanan yang halal dan

baik, dan menjauhi yang haram seperti daging babi dan segala turunannya, termasuk gelatin babi.

Selain larangan dalam aspek syariat, babi juga memiliki bahaya dari sisi kesehatan. Babi dikenal sebagai hewan yang kotor karena sering mengonsumsi makanan yang tidak higienis. Selain itu, daging babi memiliki resiko terkontaminasi bakteri *Yersinia enterocolitica* yang berbahaya. Hal ini berdasarkan hasil penelitian yang diterbitkan oleh Consumer Reports. Bakteri ini jika masuk ke dalam tubuh manusia, maka akan menyebabkan demam dan penyakit pada saluran pencernaan. Adapun penyakit yang timbul yaitu seperti diare, muntah, dan kram perut (Maiyena & Mawarnis, 2022).

Dalam penelitian ini, pengembangan sensor SPR berbasis fiber optik untuk mendeteksi gelatin babi merupakan bagian dari pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi. Hal ini sejalan dengan firman Allah dalam Q.S. Al-Jatsiyah (45): 13,

وَسَخَّرَ لَكُم مَّا فِي السَّمٰوٰتِ وَمَا فِي الْاَرْضِ جَمِيعًا مِّنْهُۥ اِنَّ فِيْ ذٰلِكَ لَاٰيٰتٍ لِّقَوْمٍ يَّتَفَكَّرُوْنَ

*“Dan Dia menundukkan bagimu apa yang di langit dan apa yang di bumi semuanya, (sebagai rahmat) dari-Nya. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi kaum yang berpikir.”* Q.S. Al-Jatsiyah (45): 13.

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, Q.S. Al-Jatsiyah (45): 13 menunjukkan bahwa Allah telah menciptakan segala sesuatu di langit dan di bumi untuk kepentingan manusia, termasuk ilmu pengetahuan yang terus berkembang. Manusia diberi akal untuk memanfaatkan segala sumber daya yang ada, baik dalam bentuk fisik maupun ilmu pengetahuan, guna menciptakan kemaslahatan di dunia. Sementara itu, dalam Tafsir Al-Muyassar, dijelaskan bahwa Q.S. Al-Jatsiyah (45): 13 menjadi dorongan bagi manusia untuk berpikir, meneliti, dan memahami hukum alam yang telah Allah

tetapkan. Teknologi yang dikembangkan manusia merupakan bagian dari bentuk pemanfaatan alam yang telah Allah tundukkan untuk mereka.

Penelitian ini merupakan salah satu bentuk penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam rangka memastikan kehalalan produk yang dikonsumsi umat Islam. Dengan teknologi sensor SPR berbasis fiber optik, umat Islam dapat lebih mudah mengidentifikasi produk yang mengandung gelatin babi dan menghindarinya sesuai dengan syariat Islam. Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa sains dan Islam tidak bertentangan, melainkan saling mendukung. Islam mendorong manusia untuk menggunakan akal dan ilmu pengetahuan guna menghasilkan teknologi yang dapat memberikan manfaat bagi umat, termasuk dalam deteksi gelatin babi.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Penelitian ini berhasil menjawab rumusan masalah yang diajukan, dengan hasil sebagai berikut:

1. Variasi ketebalan material pelapis logam berpengaruh terhadap sensitivitas sensor, di mana ketebalan optimal yang diperoleh adalah 40 nm. Pada ketebalan ini, pergeseran panjang gelombang resonansi terjadi dengan nilai yang lebih signifikan dibandingkan ketebalan lainnya.
2. Sensor SPR berbasis fiber optik yang menggunakan lapisan emas (Au) menunjukkan performa paling unggul dibandingkan dengan perak (Ag) dan tembaga (Cu) dalam mendeteksi perubahan indeks bias akibat keberadaan gelatin babi pada konsentrasi rendah. Emas menghasilkan nilai sensitivitas tertinggi sebesar 4266 nm/RIU pada konsentrasi 0,40%, serta nilai deteksi akurasi, faktor kualitas, dan figure of merit (FOM) yang lebih baik dibandingkan material lainnya. Keunggulan ini didukung oleh karakteristik optik emas yang stabil dan tahan terhadap oksidasi, serta kemampuannya menghasilkan resonansi yang tajam dan konsisten.
3. Variasi panjang probe sensing menunjukkan bahwa probe sensing dengan panjang 100  $\mu\text{m}$  menghasilkan sensitivitas tertinggi, yang menunjukkan bahwa peningkatan panjang probe sensing tidak selalu meningkatkan kinerja sensor SPR dalam deteksi gelatin babi.

## 5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Untuk meningkatkan optimasi sensor SPR lebih baik menggunakan bimetal, double layer agar bisa mensensing dengan baik.
2. Menggunakan panjang probesensing dengan ukuran mm saat di eksperimen, karena untuk ukuran mikrometer akan kesulitan saat dilakukan eksperimen.

Kesimpulan akhir penelitian ini membuktikan bahwa sensor SPR berbasis fiber optic dengan metode FDTD dapat digunakan untuk mendeteksi sumber gelatin babi dengan sensitivitas tinggi. Material emas (Au) dengan ketebalan 40nm dan panjang probe sensing sebesar 100  $\mu\text{m}$  memiliki sensitivitas tertinggi dalam deteksi gelatin babi. Sehingga dalam pengembangan lebih lanjut, metode ini berpotensi menjadi alternatif dalam deteksi halal-haram dalam industri, serta dapat diterapkan pada bidang lain yang memerlukan sensor optic dengan sensitivitas tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alsaqri, S. N., Mabood, F., Boqué, R., Jabeen, F., Ahmad, A., Hussain, J., Sohail, M., Syed, M. G., Melhi, S., Shahzad, A., Khan, M. N., Al-Amri, I., Shah, R., & Din, I. U. (2023a). Rapid detection of pork gelatin in ice cream samples by using non-destructive FT-NIR spectroscopy and Partial least squares-discriminant analysis. *Food Chemistry Advances*, 2, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100215>
- Alsaqri, S. N., Mabood, F., Boqué, R., Jabeen, F., Ahmad, A., Hussain, J., Sohail, M., Syed, M. G., Melhi, S., Shahzad, A., Khan, M. N., Al-Amri, I., Shah, R., & Din, I. U. (2023b). Rapid detection of pork gelatin in ice cream samples by using non-destructive FT-NIR spectroscopy and Partial least squares-discriminant analysis. *Food Chemistry Advances*, 2(January). <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100215>
- Aris, S. E., Jumiono, A., & Akil, S. (2020). Identifikasi Titik Kritis Kehalalan Gelatin. *Jurnal Pangan Halal*, 2(1), 17–22.
- Ashidiq, A. (2022). *Optimasi Desain Kristal Fotonik pada Sel Surya Perovskite Berbasis Timbal Iodida (Mapbi3) dengan Metode Finite-Difference Time Domain (Ftdt) pada Simulasi Ansys Lumerical*.
- Bhattacharjee, P. (2022). *Foundation of Electromagnetic Waves*. 7, 143–148.
- Chairin, A. (2021). *Sifat Fungsional dan Kimia Gelatin Kulit Sapi Hasil Hidrolisis dan Waktu Hidrolisis Berbeda*.
- Cruz, A., Cunha, W., Del Rosso, T., Dmitriev, V., & Costa, K. (2023). Spectral Analysis of a SPR Sensor based on Multilayer Graphene in the Far Infrared Range. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 22(1), 184–195. <https://doi.org/10.1590/2179-10742023v22i1270773>
- Du, W., & Zhao, F. (2017). Silicon carbide based surface plasmon resonance waveguide sensor with a bimetallic layer for improved sensitivity. *Materials Letters*, 186, 224–226. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.120>
- Faziatus, W., & Rubiyanto, A. (2018). *928X Print) B38*. 7(1), 38–42.
- Gupta, B. D., Shrivastav, A. M., & Usha, S. P. (2016). Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors utilizing molecular imprinting. *Sensors (Switzerland)*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/s16091381>
- Hanif, I., & Arnaldy, D. (2017). Analisis Penyambungan Kabel Fiber Optik Akses dengan Kabel Fiber Optik Backbone pada Indosat Area Jabodetabek. *Multinetics*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.32722/vol3.no2.2017.pp12-17>
- 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*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89358-2>

- Huang, Y., Wang, Y., Xu, G., Rao, X., Zhang, J., Wu, X., Liao, C., & Wang, Y. (2022a). Compact Surface Plasmon Resonance IgG Sensor Based on H-Shaped Optical Fiber. *Biosensors*, *12*(3), 141. <https://doi.org/10.3390/bios12030141>
- Huang, Y., Wang, Y., Xu, G., Rao, X., Zhang, J., Wu, X., Liao, C., & Wang, Y. (2022b). Compact Surface Plasmon Resonance IgG Sensor Based on H-Shaped Optical Fiber. *Biosensors*, *12*(3), 1–11. <https://doi.org/10.3390/bios12030141>
- Kusumaningrum, F., & Suzanti Betha, O. (2018). Diferensiasi Gelatin Sapi dan Gelatin Babi pada Gummy Vitamin C Menggunakan Metode Kombinasi Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Principal Component Analysis (PCA) Differentiation of Bovine and Porcine Gelatin Extracted from Vitamin C Gummy. *Pharmaceutical Sciences and Research*, *5*(2), 90–96.
- Leal-Junior, A., Lopes, G., & Marques, C. (2023). Development and Analysis of Multifeature Approaches in SPR Sensor Development. *Photonics*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/photonics10060694>
- Lee, C. H., & Chin, K. B. (2022). Effect of Pork Skin Gelatin on the Physical Properties of Pork Myofibrillar Protein Gel and Restructured Ham with Microbial Transglutaminase. *Gels*, *8*(12), 822. <https://doi.org/10.3390/gels8120822>
- Lesina, A. C., Vaccari, A., Berini, P., & Ramunno, L. (2015). On the convergence and accuracy of the FDTD method for nanoplasmonics. *Optics Express*, *23*(8), 10481. <https://doi.org/10.1364/OE.23.010481>
- Maheswari, P., Ravi, V., Rajesh, K. B., Rahman, S. M. H., & Jha, R. (2023). High performance SPR biosensor using Cu-Pt bimetallic layers and 2D materials. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, *18*(1), 221–234. <https://doi.org/10.15251/DJNB.2023.181.221>
- Maiyena, S., & Mawarnis, E. R. (2022). Kajian analisis konsumsi daging sapi dan daging babi ditinjau dari kesehatan. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, *6*(1), 3131–3136. <https://jptam.org/index.php/jptam/article/view/3359>
- Maula, M. I. (2022). Analisis Pemahaman Mahasiswa Pendidikan Fisika terhadap Sinar Inframerah sebagai Gelombang Elektromagnetik Analysis of Physics Education Students' Understanding of Infrared Rays as Electromagnetic Waves. *7*(3), 198–203. <https://doi.org/10.36709/jipfi.v7i3.33>
- Mauludi, L. D., Yantidewi, M., & Firdaus, R. A. (2024). Optimalisasi Sensor ( SPR ) Surface Plasmon Resonance dengan Lapisan Emas dan Perak untuk Deteksi Logam Berat Optimization of Surface Plasmon Resonance Sensor with Gold and Silver Coating for Heavy Metal Detection. *7*(7), 2328–2336. <https://doi.org/10.56338/jks.v7i7.5545>
- Mendes, J. P., dos Santos, P. S. S., Dias, B., Núñez-Sánchez, S., Pastoriza-Santos, I., Pérez-Juste, J., Pereira, C. M., Jorge, P. A. S., de Almeida, J. M. M. M., & Coelho, L. C. C. (2024). Exciting Surface Plasmon Resonances on Gold Thin

- Film-Coated Optical Fibers Through Nanoparticle Light Scattering. *Advanced Optical Materials*, 12(25), 1–12. <https://doi.org/10.1002/adom.202400433>
- Meng, Q. Q., Zhao, X., Lin, C. Y., Chen, S. J., Ding, Y. C., & Chen, Z. Y. (2017). Figure of merit enhancement of a surface plasmon resonance sensor using a low-refractive-index porous silica film. *Sensors (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/s17081846>
- Nada, U. (2017). *Ekstraksi Dan Karakterisasi Gelatin Kulit Kambing Peranakan Etawah Menggunakan Hidrolisis Asam Klorida Pada Kulit Yang Mengalami Proses Buang Bulu Secara Pemanasan*. 1–71.
- Nugroho, A., dan Kurniawan, F. (2015). Deteksi Gelatin Babi Menggunakan Sensor Emas Termodifikasi NiO nanopartikel pada Quartz Crystal Microbalance. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 4(2), 42–44.
- Philosophy, D. O. F. (2014). *Studies on Surface Plasmon Resonance Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the Degree of*.
- Pradini, D. (2017). *Deteksi Gelatin Babi dalam Marshmallow Menggunakan Sensor Quartz Crystal Microbalance (QCM) Termodifikasi NiO Nanopartikel*. <https://repository.its.ac.id/49212/>
- Rahmawati, A., Kuswandi, B., & Retnaningtyas, Y. (2015). Deteksi Gelatin Babi pada Sampel Permen Lunak Jelly Menggunakan Metode Fourier Transform Infra Red (FTIR) dan Kemometrik. *E-Jurnal Pustaka Kesehatan*, 3(2), 278–283.
- Riana, D. (2023). *Optimasi Desain Sensor SPR Berbasis Fiber Optik Menggunakan Metode Beda Hingga Domain Waktu (FDTD) untuk Mengukur Konsentrasi Glukosa dalam Urine*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
- Shabrina, N. H. (2017). *Literature Review : Metode Komputasi Numerik untuk Analisis Gelombang Elektromagnetik*. IX(2), 1–5.
- Shabrina, N. H., Nusantara, H., & Munir, A. (2018). Penggunaan Metode FDTD untuk Analisis Gelombang pada Struktur Berbasis Kartesian dan Silinder. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 7(3). <https://doi.org/10.22146/jnteti.v7i3.442>
- Siburian, W. Z., Rochima, E., Andriani, Y., & Praseptiangga, D. (2020). Fish gelatin (definition, manufacture, analysis of quality characteristics, and application): A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 8(4), 90–95.
- Siregar, R. E. (2016). *Rambatan Gelombang Optik dalam Medium Berlapis*. UNPADPRESS.
- Suryati, S., ZA, N., Meriatna, M., & Suryani, S. (2017). Pembuatan dan Karakterisasi Gelatin dari Ceker Ayam dengan Proses Hidrolisis. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 4(2), 66. <https://doi.org/10.29103/jtku.v4i2.74>
- Syarifah, U. (2024). No Title. *The Concept of Thayyib in A Review of the Quran*

and Science: Consumer Selection Over Quality Food, Volume 8.  
<https://doi.org/DOI: 10.29240/alquds.v8i1.7841>

- Tazi, I. (2023). *Sensor Modern dan Aplikasinya*. Literasi Nusantara Abadi.
- Tazi, I., Riana, D., Syahadi, M., Muthmainnah, Sasmitaninghidayah, W., Aprilia, L., & Tresna, W. P. (2024). Performance evaluation of single-mode fiber optic-based surface plasmon resonance sensor on material and geometrical parameters. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 14(5), 5072–5082. <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i5.pp5072-5082>
- Tazwir, T., Ayudiarti, D. L., & Peranginangin, R. (2014). Optimasi Pembuatan Gelatin dari Tulang Ikan Kaci-Kaci (*Plectorhynchus chaetodonoides* Lac.) Menggunakan Berbagai Konsentrasi Asam dan Waktu Ekstraksi. *Jurnal Pascapanen Dan Bioteknologi Kelautan Dan Perikanan*, 2(1), 35. <https://doi.org/10.15578/jpbkp.v2i1.26>
- Topani, R., Terapan, F. I., Telkom, U., Indah, P., Budget, R. T., Optik, F., Service, T. P., Budget, R. T., & Budget, P. L. (2017). *Perancangan Fiber To The Home ( FTTH ) di Perumahan Panorama Indah Purwakarta Fiber To The Home ( FTTH ) Network Design at Panorama Indah Residence-*. 3(2), 1047–1058.
- Torino, S., Conte, L., Iodice, M., Coppola, G., & Prien, R. D. (2017). PDMS membranes as sensing element in optical sensors for gas detection in water. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 16, 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2017.11.008>
- Utami, D. R. W. W., & Muslim, B. (2023). *Katalog Publikasi 2023*. 23.
- Verma, R., Gupta, B., & Srivastava, S. (2015). *Fiber Optic Sensors Based on Plasmonics*. <https://doi.org/10.1142/9289>
- Wang, Z. L. (2020). On the first principle theory of nanogenerators from Maxwell's equations. *Nano Energy*, 68, 104272. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104272>
- Yuliantono, F. D., Sufandi, M. D. P., & Asrori, M. Z. (2023). *Analisis Pola Radiasi Antena Mikrostrip*. June, 1–7.
- Zhang, R., & Pu, S. (2019). *Index and Temperature Sensing with Hetero-Core*.

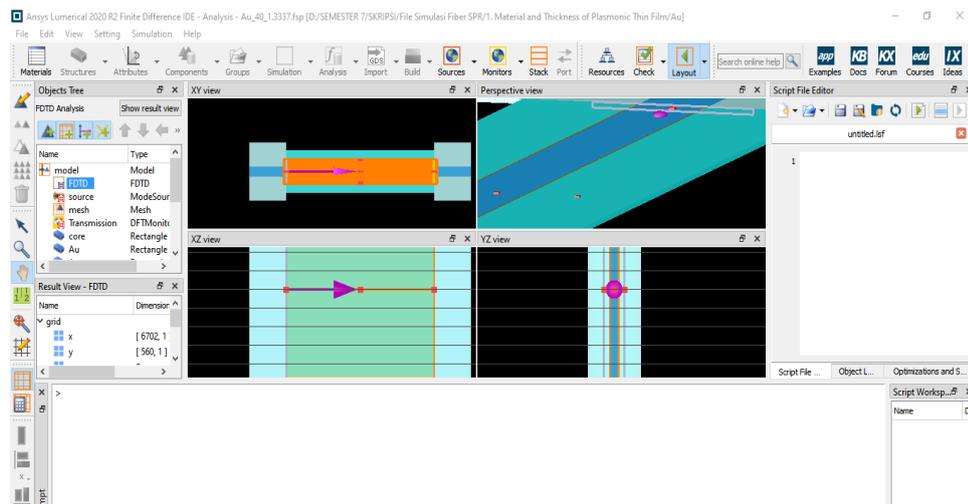
# LAMPIRAN

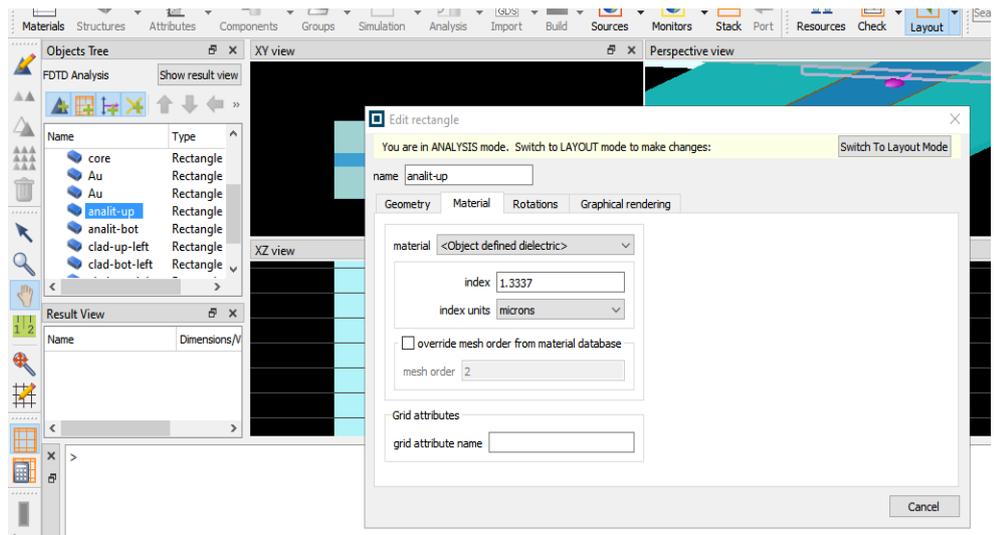
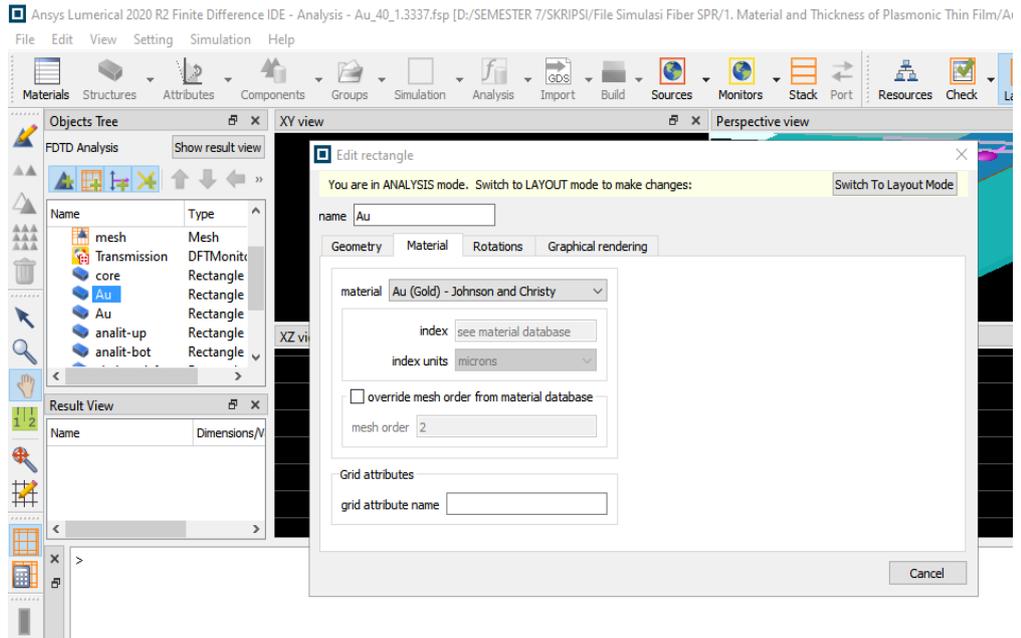
## Lampiran 1

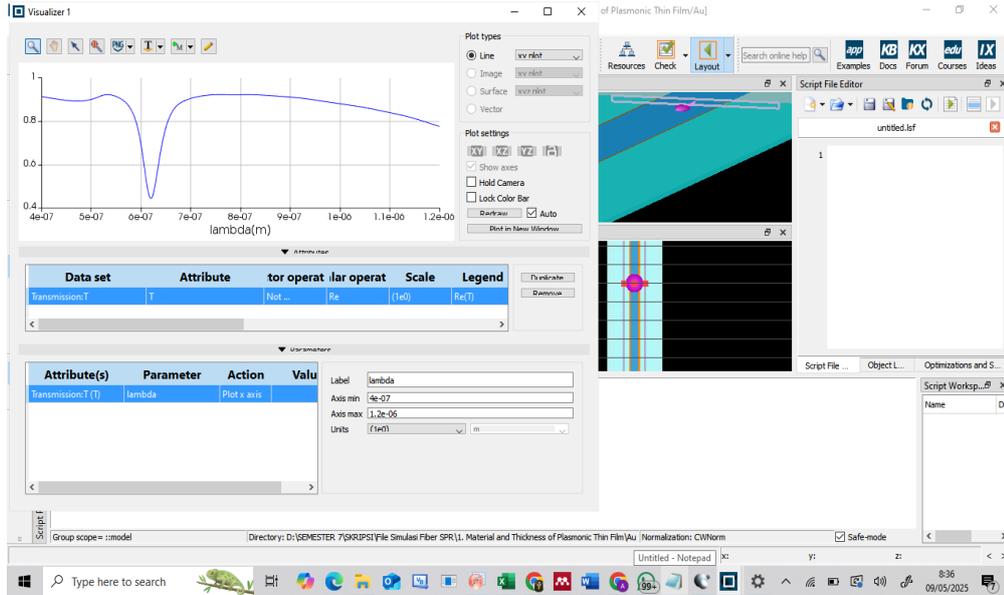
### 1. Pengambilan data indeks bias gelatin babi



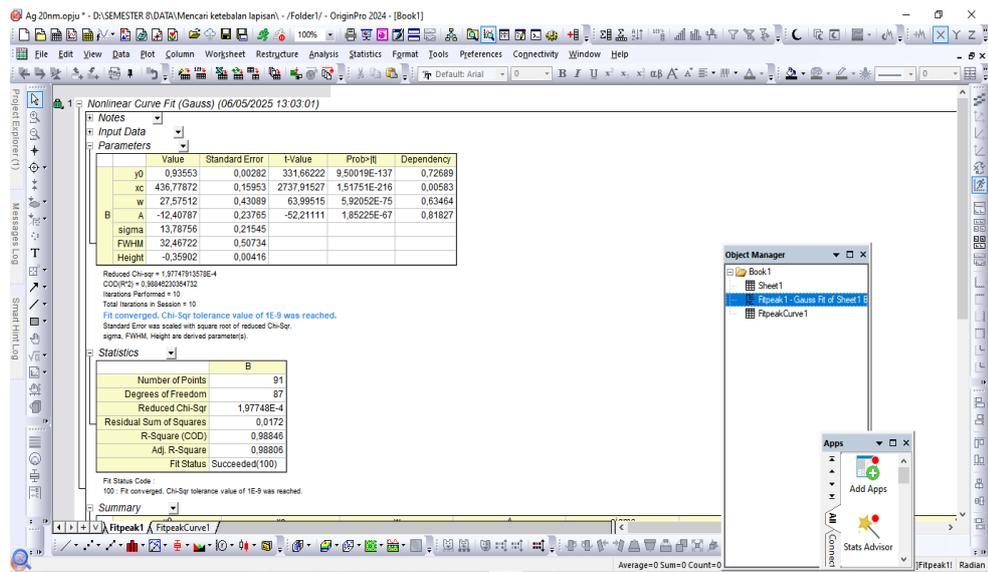
### 2. Desain sensor SPR berbasis fiber optik dengan metode FDTD

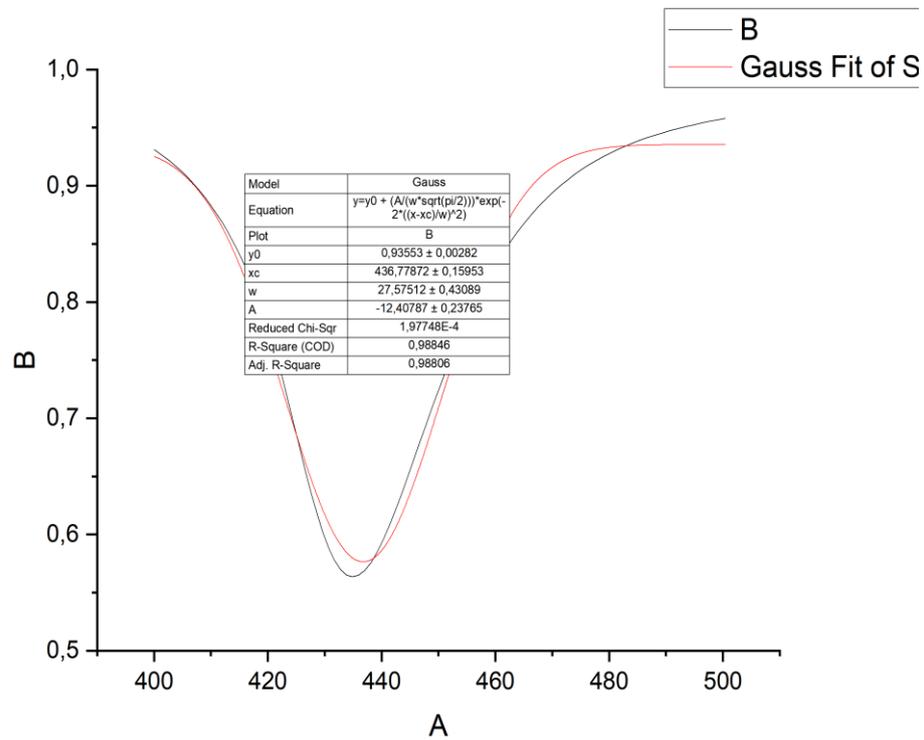






### 3. Mencari FWHM pada origin





4. Pengolahan data hasil simulasi pada excel

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Material	Konsentrasi	Indeks Bias	Δ ASPR	Δn	TSPR	FWHM	c	Sensitivitas	Deteksi Akurasi	Faktor Kualitas	Figure of Merit
Ag (Perak)	0,40%	1,3335	1,719	0,0005	0,55183	39,80073	3438	0,043190163	86,38032519	38,71307034	
	0,60%	1,3337	1,719	0,0007	0,55057	39,86426	2455,714286	0,043121332	61,6019032	27,68574336	
	0,80%	1,3340	1,719	0,0010	0,549347	39,96017	1719	0,043017835	43,01783501	19,3861164	
	1,00%	1,3343	1,719	0,0013	0,548946	40,05692	1322,307692	0,042913933	33,01071806	14,88961642	
	1,20%	1,3345	3,449	0,0015	0,548257	40,12189	2299,333333	0,085963049	57,3086994	25,88880379	
	1,40%	1,3350	3,449	0,0020	0,546162	40,28585	1724,5	0,085613187	42,80659338	19,42725873	
	1,60%	1,3355	5,19	0,0025	0,544754	40,4522	2076	0,128299573	51,31982933	23,36314702	
	1,80%	1,3360	5,19	0,0030	0,543084	40,62108	1730	0,127766175	42,58872487	19,45946981	
	2,00%	1,3365	6,942	0,0035	0,54136	40,79233	1983,428571	0,170179051	48,62258595	22,30026282	
	Au (Emas)	0,40%	1,3335	2,133	0,0005	0,444323	43,74123	4266	0,048764061	97,52812164	54,19413405
0,60%		1,3337	2,133	0,0007	0,442993	43,7449	3047,142857	0,04875997	69,65709962	38,79949209	
0,80%		1,3340	2,133	0,0010	0,441327	43,75754	2133	0,048745885	48,74588471	27,23300965	
1,00%		1,3343	2,133	0,0013	0,440068	43,76847	1640,769231	0,048733712	37,48747056	20,99043437	
1,20%		1,3345	2,133	0,0015	0,439459	43,7763	1422	0,048724995	32,48333002	18,20823829	
1,40%		1,3350	4,281	0,0020	0,436456	43,79743	2140,5	0,097745461	48,87273066	27,54193413	
1,60%		1,3355	4,281	0,0025	0,433363	43,82116	1712,4	0,09769253	39,07701211	22,13204735	
1,80%		1,3360	4,281	0,0030	0,432004	43,8474	1427	0,097634067	32,54468908	18,48525322	
2,00%		1,3365	6,444	0,0035	0,428787	43,88004	1841,142857	0,146867209	41,9620597	23,969274	
Cu (Tembaga)		0,40%	1,3335	1,607	0,0005	0,524182	44,78966	3214	0,035849618	71,6992362	34,11578717
	0,60%	1,3337	1,607	0,0007	0,522874	44,79814	2295,714286	0,035878817	51,25545239	24,45530898	
	0,80%	1,3340	1,607	0,0010	0,521105	44,73814	1607	0,035920134	35,92013436	17,20197275	
	1,00%	1,3343	1,607	0,0013	0,519572	44,69042	1236,153846	0,03595849	27,66037657	13,28881939	
	1,20%	1,3345	1,607	0,0015	0,518685	44,66053	1071,333333	0,035982556	23,98837034	11,54596247	
	1,40%	1,3350	3,222	0,0020	0,515794	44,59346	1611	0,072252747	36,12637369	17,4926069	
	1,60%	1,3355	3,222	0,0025	0,5128	44,53634	1288,8	0,072345415	28,938166	14,09867448	
	1,80%	1,3360	3,222	0,0030	0,510518	44,48916	1074	0,072422136	24,14071203	11,81644401	
	2,00%	1,3365	4,845	0,0035	0,507549	44,45182	1384,285714	0,108994412	31,14126068	15,33554496	

Ketebalan	Material	Lambda (nm)	T SPR	Lambda (nm)	T SPR	Δ ASPR	Δn	FWHM	S	DA	QF	FoM
20nm	Ag	434,309	0,584901	434,309	0,583545	0	0,0005	32,46722	0	0	0	0
	Au	525,724	0,659867	525,724	0,656986	0	0,0005	45,3661	0	0	0	0
	Cu	0	0	0	0	0	0,0005	0	0	0	0	0
40nm	Ag	584,58	0,552983	582,279	0,55183	1,719	0,0005	33,86855	3438	0,050755962	101,570703	45,48378288
	Au	617,556	0,447158	619,688	0,444323	2,133	0,0005	43,72237	4266	0,048789096	97,5701919	54,2751103
	Cu	619,405	0,527111	621,012	0,524182	1,607	0,0005	37,22429	3214	0,043107736	86,34474219	41,08282682
60nm	Ag	583,415	0,846267	585,318	0,845615	1,903	0,0005	34,28961	3806	0,055497861	110,395724	17,13607446
	Au	648,825	0,781675	648,825	0,780183	0	0,0005	32,35399	0	0	0	0
	Cu	644,165	0,63832	644,165	0,635391	0	0,0005	32,8569	0	0	0	0
80nm	Ag	583,163	0,958476	581,104	0,95845	1,941	0,0005	34,55126	3882	0,056177401	112,3548027	4,702610267
	Au	655,341	0,331918	655,341	0,331633	0	0,0005	33,14348	0	0	0	0
	Cu	652,393	0,334417	652,393	0,334232	0	0,0005	22,49184	0	0	0	0
100nm	Ag	533,058	0,984237	533,058	0,98421	0	0,0005	51,23867	0	0	0	0
	Au	658,243	0,372411	658,243	0,372294	0	0,0005	31,74561	0	0	0	0
	Cu	655,341	0,372786	655,341	0,37266	0	0,0005	42,34636	0	0	0	0

Material	Konsentrasi	Indeks Bias	$\Delta ASPR$	$\Delta n$	TSPR	FWHM	Parameter			
							Sensitivitas	Deteksi Akurasi	Faktor Kualitas	Figure of Merit
100	0,40%	1,3335	1,719	0,0005	0,55183	39,80073	4266	0,043190163	107,1839637	48,03663702
	0,60%	1,3337	1,719	0,0007	0,55057	39,86426	3047,142857	0,043121332	76,43796366	34,35351401
	0,80%	1,3340	1,719	0,0010	0,54935	39,96017	2133	0,043017835	53,37815129	24,05502402
	1,00%	1,3343	1,719	0,0013	0,54895	40,05692	1640,769231	0,042913933	40,96094335	18,47559734
	1,20%	1,3345	3,449	0,0015	0,54826	40,12189	1422	0,085963049	35,44199937	16,01067512
	1,40%	1,3350	3,449	0,0020	0,54616	40,28585	2140,5	0,085613187	53,13279973	24,11368356
	1,60%	1,3355	5,19	0,0025	0,54475	40,4522	1712,4	0,128299573	42,33144304	19,27122012
	1,80%	1,3360	5,19	0,0030	0,54308	40,62108	1427	0,127766175	35,12954358	16,05125053
	2,00%	1,3365	6,942	0,0035	0,54136	40,79233	1841,142857	0,170179051	45,13453527	20,70050326
	0,40%	1,3335	0	0,0005	0,01507	51,54606	0	0	0	0
200	0,60%	1,3337	2,011	0,0007	0,01405	51,6456	2872,857143	0,038938457	55,62636784	54,84493975
	0,80%	1,3340	2,011	0,0010	0,0134	51,7965	2011	0,038825017	38,82501713	38,3049172
	1,00%	1,3343	2,011	0,0013	0,01465	51,94925	1546,923077	0,038710857	29,77758249	29,34145108
	1,20%	1,3345	4,034	0,0015	0,01547	52,05211	2689,333333	0,07749926	51,66617325	50,86679422
	1,40%	1,3350	4,034	0,0020	0,01425	52,31306	2017	0,077112675	38,55633756	38,00691746
	1,60%	1,3355	6,069	0,0025	0,01562	52,57929	2427,6	0,115425674	46,1702697	45,4492009
	1,80%	1,3360	6,069	0,0030	0,01539	52,85104	2023	0,114832177	38,27739246	37,68829191
	2,00%	1,3365	8,116	0,0035	0,01602	53,12831	2318,857143	0,152762247	43,64635621	42,94709793
	0,40%	1,3335	2,011	0,0005	0,01818	59,95744	4022	0,033540458	67,08091606	65,86155942
	0,60%	1,3337	2,011	0,0007	0,018	60,10132	2872,857143	0,033460164	47,80023372	46,93960007
300	0,80%	1,3340	2,011	0,0010	0,01822	60,31952	2011	0,033339125	33,33912471	32,7317192
	1,00%	1,3343	2,011	0,0013	0,019	60,54054	1546,923077	0,033217411	25,55185462	25,0662774
	1,20%	1,3345	4,034	0,0015	0,01925	60,68958	2689,333333	0,066469401	44,31293368	43,45980335
	1,40%	1,3350	4,034	0,0020	0,01956	61,06806	2017	0,066057445	33,02872238	32,38280278
	1,60%	1,3355	6,069	0,0025	0,02041	61,45528	2427,6	0,098754737	39,50189471	38,69556624
	1,80%	1,3360	6,069	0,0030	0,021	61,89464	2023	0,098053725	32,68457495	31,99808448
	2,00%	1,3365	8,116	0,0035	0,02167	62,25679	2318,857143	0,13036329	37,24665443	36,43953432



JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 210604110018  
 Nama : APRILINA EKA SARI  
 Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI  
 Jurusan : FISIKA  
 Dosen Pembimbing 1 : WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si  
 Dosen Pembimbing 2 : Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA  
 Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : SIMULASI DETEKSI GELATIN BABI DENGAN SENSOR SPR BERBASIS FIBER OPTIK MENGGUNAKAN METODE FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD)

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	22 Agustus 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	Konsultasi Judul	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
2	05 September 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	BAB I Pendahuluan	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
3	17 Oktober 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	BAB II Tinjauan Pustaka	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
4	28 November 2024	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	BAB III Metodologi	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
5	30 Januari 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	Revisi Seminar Proposal	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
6	19 Februari 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Bimbingan Integrasi Al-Qur'an Bab 1 dan 2	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
7	19 Maret 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	Bimbingan Bab 1-5	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
8	19 Maret 2025	WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si	Bimbingan BAB 1-5	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9	21 Maret 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Konsultasi Integrasi Bab 4	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
10	14 Mei 2025	Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA	Revisi Bab 1-5	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui  
 Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

Dr. UMAIYATUS SYARIFAH, MA

Malang, 10 April 2025

Dosen Pembimbing 1

WIWIS SASMITANINGHIDAYAH,M.Si

Kajur / Kaprodi,

